



REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

Assessoradu de s'indùstria - Assessoradu de sos traballos pùblicos
Assessorato dell'industria - Assessorato dei lavori pubblici



Ente acque della Sardegna



SARDEGNA RICERCHE

ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA L'ASS.TO DELL'INDUSTRIA, L'ENAS E SARDEGNA RICERCHE DEL 29/07/2011



Consorzio Industriale Provinciale • Nuoro

ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA L'ENAS E IL CONSORZIO INDUSTRIALE PROVINCIALE DI NUORO DEL 01/04/2010

**PROGETTO DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DI
ENERGIA RINNOVABILE SOLARE**

NELL'AREA INDUSTRIALE DI OTTANA

Stralcio del Progetto Definitivo Generale 1° Lotto - 1° Comparto

Parte A - PARTE GENERALE

Schema di contratto e Capitolato speciale d'appalto

Disciplinare tecnico impianto solare termodinamico

Tavola

A 6.2

scala:

Redatto dai Servizi: Studi - Progetti e Costruzioni

- **Progettisti:** Ing. Dina Cadoni
Ing. Bruno Loffredo
Ing. Francesco Serra

- **Geologo:** Dott. Maria Rita Lai

- **Collaborazione ingegneristica:** Ing. Nicoletta Sale - Ing. Francesco Caturano

- **Collaborazione specialistica:** Ing. Giancarlo Pusceddu
Per. Ind. Fabrizio Pedditzi

- **Collaborazioni tecniche:** Geom. Paolo Atzori, Geom. Corrado Balistreri,
Geom. Bruno Caredda, Geom. Osvaldo Carta, Geom. Pierpaolo Corona,
Per. Ind. Salvatore Melis, Geom. Luigi Usala

CON IL CONTRIBUTO SCIENTIFICO

Università degli Studi di Cagliari
Dipartimenti di ingegneria meccanica
e di ingegneria elettrica ed elettronica

Prof. Giorgio Cau

Prof. Daniele Cocco

Prof. Alfonso Damiano

Il Direttore del Servizio Studi
Ing. Dina Cadoni

Il Direttore Generale
Ing. Franco Ollargiu

**Il Direttore del Servizio Progetti
e Costruzioni**
Ing. Bruno Loffredo

Aggiornamento ottobre 2012



Università degli Studi di Cagliari
**Dipartimento di Ingegneria Meccanica,
Chimica e dei Materiali**
Via Marengo 2, 09123 Cagliari - Italy



Impianto di Produzione di Energia Rinnovabile
Solare nell'area industriale di Ottana

**PROGETTO DEFINITIVO
LOTTO I – 1° COMPARTO
PARCO SPERIMENTALE SOLARE**

**Allegato Disciplinare Tecnico
Impianto Solare
Termodinamico**

Predisposto da:
Prof. Ing. Daniele Cocco

Approvato da:
Prof. Ing. Giorgio Cau

Ottobre 2012

INTRODUZIONE

Il presente disciplinare tecnico contiene le principali specifiche tecniche applicabili alla fornitura e al montaggio per dare l'opera finita dell'impianto solare termodinamico da 600 kWe con accumulo termico da 14,6 MWh facente parte del Parco Sperimentale Solare previsto all'interno dell'Impianto di Produzione di Energia Rinnovabile Solare nell'area industriale di Ottana (NU).

Il Parco Sperimentale Solare include oltre all'impianto solare termodinamico con accumulo termico anche un impianto solare fotovoltaico a concentrazione da circa 400 kWe, con un sistema di accumulo elettrochimico da 200 kW e capacità di 400 kWh. La realizzazione del Parco Sperimentale Solare intende sperimentare la possibilità di esercire in maniera sinergica le due sezioni di generazione elettrica basate sulle tecnologie del solare termodinamico e del fotovoltaico a concentrazione unitamente ai due sistemi di accumulo termico ed elettrochimico dell'energia, al fine di realizzare profili programmati di produzione ed immissione dell'energia elettrica in rete e fornire servizi ancillari alla stessa rete di distribuzione elettrica. Nello specifico, l'impianto solare termodinamico è composto dal campo solare, basato su collettori a concentrazione lineare di tipo Fresnel e con l'utilizzo di olio diatermico come fluido termovettore, dalla sezione di generazione elettrica basata su un impianto ORC (Organic Rankine Cycle) e dalla sezione di accumulo termico, basata su due serbatoi di accumulo dell'olio diatermico ad alta e a bassa temperatura.

Il progetto esecutivo dovrà sviluppare nel dettaglio il progetto definitivo, dimensionando tutti i componenti dell'impianto in relazione alle tipologie effettivamente utilizzate, stabilendo le apparecchiature, i materiali, le modalità di collegamento e di montaggio e tutti gli ulteriori aspetti di dettaglio necessari alla completa realizzazione in opera dell'impianto ed al suo corretto funzionamento in accordo alle finalità sopra illustrate, in condizioni di efficienza e di rispondenza alle normative ambientali e sulla sicurezza.

1. DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

La Figura 1 illustra lo schema di processo dell'impianto solare termodinamico, nel quale sono evidenziate le tre sezioni principali (Campo Solare, Accumulo Termico e Generazione Elettrica), con i rispettivi componenti e circuiti principali. Nel complesso, l'impianto solare termodinamico risulta pertanto composto da:

SEZIONE 1 – CAMPO SOLARE. Il campo solare produce l'energia termica ed è basato su collettori lineari Fresnel che concentrano la radiazione solare su un tubo ricevitore all'interno del quale scorre il fluido termovettore, costituito da olio diatermico;

SEZIONE 2 – ACCUMULO TERMICO. La sezione di accumulo termico è basata su due serbatoi, uno ad alta e uno a bassa temperatura, ed ha la funzione di stoccare l'olio diatermico ad alta temperatura prodotto in eccesso dal campo solare e l'olio a bassa temperatura proveniente dalla sezione di generazione elettrica.

SEZIONE 3 – GENERAZIONE ELETTRICA. La sezione di generazione elettrica utilizza l'energia termica prodotta dal campo solare ed è basata su un impianto a ciclo Rankine percorso da un fluido organico (Organic Rankine Cycle, ORC) integrato con una sezione di raffreddamento dell'acqua del condensatore che utilizza refrigeratori a secco.

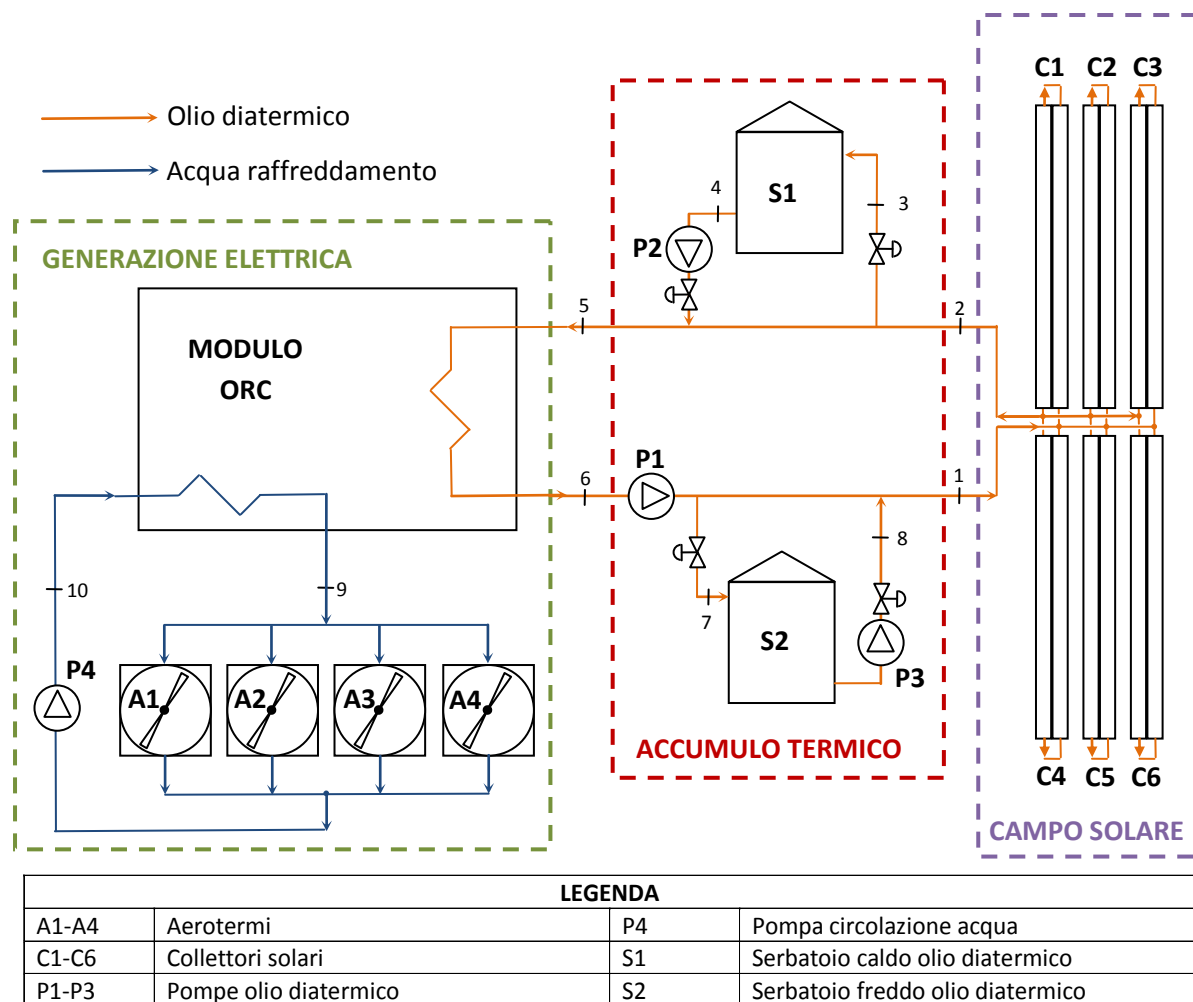


Figura 1 – Schema di processo dell'impianto solare termodinamico.

La Tabella 1 riporta i principali dati caratteristici dell'impianto in condizioni di progetto. In particolare, l'impianto solare termodinamico è costituito da un campo solare con specchi Fresnel con una superficie netta di captazione solare pari a 8400 m². In condizioni di progetto, il campo solare produce circa 4690 kW sotto forma di olio diatermico a 260 °C. La potenza termica viene convertita in energia elettrica mediante un impianto ORC da 600 kWe lordi, cui corrispondono circa 550 kWe netti. L'impianto è inoltre dotato di una sezione di accumulo termico, realizzata mediante due serbatoi, uno ad alta temperatura (circa 260 °C) e l'altro a bassa temperatura (circa 150 °C), dimensionati per contenere complessivamente circa 195 t di olio diatermico, cui corrisponde un'autonomia dell'impianto ORC di quasi 5 ore a potenza nominale.

SEZIONE 1 - Campo solare con collettori lineari Fresnel	
Numero di loop (su file parallele)	6
Superficie lorda di captazione del loop (200mx9,0m)	1800 m ²
Superficie lorda dei collettori solari (n. 6 loop)	10800 m ²
Superficie netta di captazione solare (specchi)	8400 m ²
Distanza fra le file	5 m
Efficienza di riferimento dei collettori solari	62%
Potenza termica prodotta (DNI=900 W/m ²)	4690 kW
Multiplo solare	1,56
Portata olio diatermico nominale	17,3 kg/s
SEZIONE 2 - Accumulo termico	
Numero serbatoi	2
Volume di ciascun serbatoio	330 m ³
Massa olio accumulata	195 t
Capacità di accumulo termico	14,6 MWh
Ore autonomia modulo ORC da solo accumulo	4,9 h
SEZIONE 3 – Generazione elettrica con impianto ORC	
Potenza elettrica lorda	600 kW
Potenza termica ingresso modulo ORC	3000 kW
Temperatura olio ingresso/uscita modulo ORC	260/150 °C
Portata olio diatermico	11,1 kg/s
Rendimento lordo modulo ORC	20%
Potenza termica al circuito di raffreddamento	2350 kW
Numero aerotermini	4
Potenza nominale di ciascun aerotermino	600 kW
IMPIANTO SOLARE TERMODINAMICO	
Assorbimenti elettrici interni	50 kW

I dati riportati nelle seguenti specifiche tecniche si riferiscono alle soluzioni impiantistiche, alle modalità di funzionamento ed alle prestazioni valutate in sede di progettazione definitiva. Il progetto esecutivo dovrà sviluppare nel dettaglio il progetto definitivo, dimensionando tutte le apparecchiature in relazione alle tipologie effettivamente utilizzate, stabilendo i componenti, i materiali, le modalità di collegamento e di montaggio e tutti gli ulteriori aspetti di dettaglio necessari alla fornitura del sistema in opera completo di tutto quanto necessario al suo corretto funzionamento in accordo alle finalità operative previste, alle normative vigenti e in condizioni di sicurezza. In tal senso, i dati riportati sono da considerarsi nominali e pertanto suscettibili di piccole variazioni in sede di progetto esecutivo.

2.1 Specifiche tecniche Campo Solare

Nel seguito sono riportate le specifiche tecniche applicabili alla fornitura e al montaggio in opera presso il sito di Ottana (NU) del campo solare integrato nell'impianto solare termodinamico da 600 kWe con accumulo termico da 14,6 MWh del Parco Sperimentale Solare di ENAS. Il campo solare ha la funzione di produrre l'energia termica richiesta dal modulo ORC sotto forma di olio diatermico ad alta temperatura, a partire da energia solare. Il campo solare è dimensionato per produrre, in condizioni di progetto (DNI pari a 900 W/m^2) una potenza termica di circa 4690 kW, ricevendo in ingresso olio diatermico a 150°C e riscaldandolo fino alla temperatura d'uscita di circa 260°C .

2.1.1 Descrizione dell'apparecchiatura

Il campo solare oggetto della presente specifica tecnica è basato su un insieme di collettori lineari con specchi Fresnel (moduli Fresnel) collegati in serie al fine di costituire una linea e ottenere il prefissato valore di temperatura dell'olio diatermico in circolazione. Al fine di ottenere la potenza termica prefissata, il campo solare è costituito dall'insieme di più linee di collettori collegate fra loro in parallelo. Ciascuna linea è realizzata a forma di "U" (loop) per consentire il posizionamento dei collettori principali dell'olio diatermico sullo stesso lato e minimizzare la lunghezza delle tubazioni di collegamento con le sezioni di accumulo termico e di generazione elettrica. Ciascun modulo Fresnel è composto da più file di specchi disposti in parallelo che ruotano intorno al proprio asse longitudinale per seguire il percorso del sole e indirizzare la radiazione solare in corrispondenza del ricevitore solare. Quest'ultimo è costituito da un

tubo in acciaio dotato di rivestimento selettivo e installato all'interno di un tubo in vetro nella cui intercapedine sono mantenute condizioni di vuoto. Il ricevitore solare è inoltre provvisto di un riflettore secondario avente la funzione di indirizzare verso il tubo ricevitore la radiazione solare non direttamente intercettata da quest'ultimo. All'interno dei tubi ricevitori circola l'olio diatermico che aumenta la sua temperatura con l'assorbimento dell'energia solare captata, rendendola poi disponibile all'impianto ORC o alla sezione di accumulo termico. L'intero sistema è ancorato al terreno e dotato di un sistema di controllo e monitoraggio che ne garantisce il funzionamento in condizioni di efficienza e di sicurezza.

2.1.2 Condizioni di progetto

La Tabella 2 sintetizza le condizioni di progetto del campo solare. Come si evince dall'esame di tale Tabella, il campo solare dovrà essere progettato per produrre una potenza termica di 4690 kW in corrispondenza di una DNI di 900 W/m². In particolare, la potenza termica prodotta dal campo solare è rappresentata dal prodotto della portata massica di olio diatermico per la differenza di entalpia fra l'uscita e l'ingresso.

Potenza termica prodotta	4690 kW
Temperatura ingresso olio diatermico	150 °C
Temperatura uscita olio diatermico	260 °C
Irraggiamento normale diretto (DNI)	900 W/m ²
Temperatura media annua dell'aria	17 °C
Velocità media annua del vento (a 10 m)	4,4 m/s
Velocità massima del vento (a 10 m)	20 m/s

Tabella 2 – Condizioni di progetto del campo solare.

2.1.3 Specifiche tecniche delle apparecchiature

La Tabella 3 riporta le specifiche tecniche essenziali del campo solare riferite alle condizioni nominali di progetto così come valutate in sede di progetto definitivo. Con riferimento ai dati riportati nella Tabella 3, la potenza solare disponibile è il prodotto della superficie netta di captazione per la radiazione diretta normale (DNI). Il rendimento del campo solare è definito dal rapporto fra la potenza termica prodotta e quella solare disponibile.

In corrispondenza di un rendimento globale di riferimento del 62%, la superficie netta a specchi (apertura) del campo solare è pari a 8400 m². In sede di progettazione definitiva è stato previsto un campo solare composto da 6 loop ad “U”, con due gruppi da 3 loop ciascuno disposti simmetricamente rispetto alle tubazioni principali di arrivo e di mandata dell’olio diatermico. Complessivamente, la superficie effettiva di captazione solare è pari a 1400 m² per singolo loop, cui corrisponde una occupazione in pianta di 1800 m² per tener conto della distanza fra le file degli specchi necessaria ad evitare i reciproci ombreggiamenti. Il campo solare verrà installato su una superficie piana, con una orientazione delle file di specchi lungo la direzione Nord-Sud.

Potenza termica prodotta	4690 kW
Portata olio diatermico (T _{IN} =150 °C, T _{OUT} =260 °C)	17,3 kg/s
Superficie netta di captazione solare (specchi)	8400 m ²
Potenza solare disponibile (DNI=900 W/m ²)	7560 kW
Rendimento globale di riferimento	62,0 %
Numero di linee a “U” (loop)	6
Lunghezza del loop (somma dei 2 rami della linea a “U”)	200 m
Larghezza del loop (somma dei due rami)	18,0 m
Numero di moduli Fresnel per loop	50
Distanza trasversale fra i singoli loop	5 m
Superficie netta a specchi del singolo loop	1400 m ²
Superficie lorda del singolo loop	1800 m ²
Superficie netta a specchi del singolo loop	1400 m ²
Superficie lorda collettori solari	10800 m ²

Tabella 3 – Principali specifiche tecniche del campo solare con collettori lineari Fresnel.

Ciascuna delle 6 linee è costituita da 50 moduli Fresnel, aventi lunghezza di 4,0 m e larghezza complessiva di 9,0 m, collegati in serie al fine di realizzare un loop a forma di “U” complessivamente lungo circa 200 metri e costituito da due rami paralleli lunghi circa 100 metri. Come sintetizzato in Tabella 4, ciascun modulo è composto da 14 file di specchi aventi larghezza di 50 cm e disposti ad una distanza di 15 cm l’uno dall’altro (il fattore di riempimento della superficie a specchi è pertanto del 77% circa). Gli specchi sono in vetro e con una riflettanza minima del 95% entro un cono di apertura di ampiezza pari a 4 mrad. Il ricevitore di ciascun modulo è disposto ad una altezza di 5,4 m da terra ed è costituito da un riflettore secondario e da un tubo assorbitore sotto vuoto.

L'intera struttura deve essere vincolata al terreno attraverso un sistema di fissaggio idoneo a garantire in maniera stabile l'orientazione prevista dal progetto, con venti fino a 20 m/s. In corrispondenza di tutti i collegamenti flangiati sono previsti opportuni pozzetti di contenimento e di raccolta delle eventuali perdite di olio.

Lunghezza del tubo	4 m
Diametro esterno tubo ricevitore	70 mm
Assorbanza ricevitore	95%
Emittanza ricevitore	9%
Diametro esterno tubo in vetro	125 mm
Trasmittanza vetro	96%
Larghezza riflettore secondario	60 cm

Tabella 5 – Principali specifiche tecniche del ricevitore solare.

Il campo solare deve essere progettato e realizzato in accordo alle vigenti normative in materia (in particolare la Direttiva Macchine 2006/42/CE e la Direttiva PED 97/23/CE) e dovranno essere fornite le relative dichiarazioni di conformità.

Le dimensioni, la tipologia, i materiali e le modalità di collegamento e montaggio dei diversi componenti del campo solare che scaturiranno dalla progettazione esecutiva potranno differire rispetto a quanto sopra riportato fermo restando la necessità di assicurare un funzionamento efficiente e in condizioni di sicurezza dell'impianto solare termodinamico in accordo alle finalità operative previste (produzione di energia elettrica secondo profili programmati avvalendosi della presenza di una sezione di accumulo termico) ed ai valori di potenza nominale e producibilità media annua attesi.

Il campo solare dovrà funzionare in modalità completamente automatica senza la necessità di alcuna supervisione da parte del personale, sia in condizioni di normale esercizio sia in condizioni emergenza. In caso di malfunzionamento o di condizioni di pericolo (eccessiva velocità del vento, sovratemperatura dell'olio, perdite di olio, etc.) l'alimentazione dell'olio diatermico dovrà essere interrotta e il campo specchi posto in condizioni di sicurezza. Il controllo dell'impianto deve poter avvenire anche in remoto mediante collegamento ADSL o equivalente.

La potenza termica prodotta dal campo solare dovrà essere regolabile almeno fra il 20% e il 100% in relazione all'esigenza di produrre minori portate di olio diatermico rispetto a quelle consentite dalla energia solare disponibile (serbatoio di accumulo termico completamente carico o indisponibile).

L'impianto dovrà essere dotato di un sistema di acquisizione dati e di visualizzazione dei principali parametri operativi e prestazionali interfacciabile con il sistema di acquisizione dati delle altre sezioni dell'impianto solare termodinamico. In particolare, dovranno essere misurate, visualizzate e registrate le pressioni, le temperature e le portate dell'olio diatermico all'ingresso e all'uscita di ciascun loop. Inoltre, su uno dei 6 loop dovranno essere misurate, visualizzate e registrate anche le temperature dell'olio diatermico in almeno 5 punti. Dovranno essere misurate, visualizzate e registrate la direzione (azimuth e altezza solare) e l'intensità della radiazione solare diretta, diffusa e globale, la direzione e l'intensità della velocità del vento, la temperatura e l'umidità dell'aria, nonché la potenza assorbita dal sistema di regolazione e controllo e le informazioni relative alla posizione degli specchi.

2.1.4 Consistenza della fornitura

I limiti di batteria del campo solare con il resto dell'impianto solare termodinamico sono rappresentati dalle flange di ingresso e di uscita dell'olio diatermico dai ricevitori solari e dai cavi dei quadri elettrici di alimentazione del sistema di controllo.

Lo scopo della fornitura di cui alla presente specifica tecnica è pertanto costituito dalla fornitura, l'installazione e la messa in funzione di un campo solare integrato in un impianto solare termodinamico e include gli specchi, i tubi ricevitori, i riflettori secondari, la struttura di sostegno e le relative fondazioni, i motori per la movimentazione degli specchi, le tubazioni di collegamento fra i diversi componenti, i quadri elettrici di alimentazione, gli organi, la strumentazione e il software per il controllo, la regolazione e il monitoraggio e comunque tutto quanto necessario a garantire il corretto funzionamento in condizioni di sicurezza del campo solare.

La fornitura comprende la verniciatura e la finitura di tutte le parti che compongono il campo solare, i collaudi e le prove idrauliche in officina e in sito, il trasporto delle apparecchiature e dei materiali in sito, l'assemblaggio per dare l'opera finita fino ai limiti di batteria, nonché la progettazione esecutiva e la fornitura di tutta l'eventuale documentazione necessaria per l'espletamento delle pratiche nei confronti degli Enti competenti.

La fornitura include la documentazione completa del campo solare fra cui in particolare quella relativa a: dimensionamento meccanico e termodinamico, disegni di dettaglio e di insieme, schemi di montaggio, schemi elettrici, elenco delle parti di ricambio raccomandate con prezzi e tempi di consegna, elenco delle parti soggette ad usura, lista della strumentazione, manuali di uso e manutenzione, dichiarazioni di conformità CE per le apparecchiature e gli strumenti installati, certificazioni su prove e controlli.

Inoltre nella fornitura è incluso anche l'addestramento del personale preposto alla gestione operativa dell'impianto. Il corso di addestramento sarà svolto in italiano, avrà una durata minima di 1 giorno e comprenderà l'illustrazione delle procedure di esercizio, manutenzione, ricerca e riparazione di guasti e malfunzionamenti.

2.2 Specifiche tecniche Modulo ORC

Nel seguito sono riportate le specifiche tecniche applicabili alla fornitura e al montaggio in opera presso il sito di Ottana (NU) del modulo ORC integrato nell'impianto solare termodinamico da 600 kWe con accumulo termico da 14,6 MWh del Parco Sperimentale Solare di ENAS. Il modulo ORC riceve l'energia termica, prodotta sotto forma di olio diatermico ad alta temperatura dal campo solare, e la converte parzialmente in energia elettrica. Il modulo ORC produce, in condizioni nominali, una potenza elettrica lorda di circa 600 kWe, cui corrisponde una potenza elettrica netta di circa 575 kWe, ricevendo in ingresso una potenza termica di circa 3000 kW sotto forma di olio diatermico che si raffredda da circa 260 °C a circa 150 °C.

2.2.1 Descrizione dell'apparecchiatura

Un impianto ORC (Organic Rankine Cycle) opera secondo un ciclo termodinamico Rankine e utilizza un fluido operativo ad elevata massa molare e a basso salto entalpico specifico che consente di impiegare turbine monostadio, con diametri relativamente elevati e quindi basse velocità periferiche. Il fluido operativo in pressione e allo stato liquido viene dapprima preriscaldato in uno scambiatore rigenerativo mediante il parziale raffreddamento dello stesso fluido operativo uscente dalla turbina, portato in condizioni di liquido saturo e poi vaporizzato negli scambiatori di calore mediante il raffreddamento dell'olio diatermico. Il vapore così prodotto espande quindi in una turbina collegata meccanicamente al generatore elettrico. All'uscita della turbina il fluido operativo, che si trova ancora allo stato di vapore, viene raffreddato nel rigeneratore, riportato allo stato liquido nel condensatore e poi compresso mediante una pompa. L'impianto in oggetto è costituito da un unico modulo ORC montato su di una apposita piattaforma in acciaio (skid) predisposta per il fissaggio a pavimento all'interno di un locale chiuso e ventilato. Il modulo ORC dovrà essere completamente autonomo e dotato di un sistema di controllo e monitoraggio che ne garantisca il funzionamento in condizioni di efficienza e di sicurezza in tutte le condizioni operative.

2.2.2 Condizioni di progetto

La Tabella 6 sintetizza le condizioni di progetto del modulo ORC. Il modulo ORC dovrà essere progettato per produrre una potenza elettrica nominale di 600 kW utilizzando olio diatermico come fluido termovettore.

Potenza elettrica nominale	600 kW
Temperatura media dell'aria ambiente	17 °C
Temperatura minima/massima sala macchine	5/40 °C
Umidità relativa media	74 %

Tabella 6 – Condizioni di progetto del modulo ORC.

2.2.3 Specifiche tecniche delle apparecchiature

La Tabella 7 riporta le specifiche tecniche essenziali del modulo ORC riferite alle condizioni nominali così come valutate in sede di progetto definitivo.

Potenza elettrica lorda	600 kW
Potenza termica ingresso	3000 kW
Temperatura di ingresso dell'olio diatermico	260 °C
Temperatura di uscita dell'olio diatermico	150 °C
Portata olio diatermico	11,1 kg/s
Potenza termica al condensatore	2350 kW
Portata acqua di raffreddamento del condensatore	200 m ³ /h
Temperatura ingresso/uscita acqua di raffreddamento	25/35 °C
Consumi elettrici interni	25 kW
Potenza elettrica netta	575 kW
Rendimento lordo modulo ORC	20,0%
Rendimento netto modulo ORC	19,2%

Tabella 7 – Principali specifiche tecniche del modulo ORC.

Con riferimento ai dati riportati nella Tabella 7, la potenza elettrica lorda, o nominale, è rappresentata dalla potenza elettrica misurata ai morsetti del generatore elettrico. La potenza elettrica netta è la potenza lorda decurtata dei consumi elettrici interni del modulo ORC. La potenza termica in ingresso è rappresentata dal prodotto della portata massica di olio diatermico per la differenza di entalpia fra l'ingresso e l'uscita del

modulo ORC, mentre la potenza termica asportata dal condensatore è rappresentata dal prodotto della portata massica di acqua di raffreddamento per la differenza di entalpia fra l'ingresso e l'uscita del modulo ORC. Il rendimento lordo del modulo ORC è definito dal rapporto fra la potenza elettrica lorda e la potenza termica in ingresso, mentre il rendimento netto del modulo ORC è definito dal rapporto fra la potenza elettrica netta e la potenza termica in ingresso.

La potenza termica in ingresso al modulo ORC di 3000 kW è stata determinata in corrispondenza di un rendimento lordo del modulo del 20%, conseguibile con impianti della taglia in esame e caratterizzati da temperature dell'olio diatermico in ingresso di circa 260 °C e dall'adozione di un ciclo Rankine rigenerato. Corrispondentemente ad una temperatura di uscita di 150 °C, la portata di olio richiesta in condizioni di progetto è di 11,1 kg/s (il calore specifico medio considerato in sede di progettazione definitiva è di 2,45 kJ/kgK). La potenza termica al condensatore, pari a circa 2350 kW viene asportata attraverso una portata d'acqua di raffreddamento di circa 200 m³/h con un incremento di temperatura di 10 °C (da 25 a 35 °C). Al netto degli assorbimenti elettrici interni (pompa fluido operativo, strumentazione, elettrovalvole, etc.), valutate pari a 25 kW, la potenza elettrica netta è pari a 575 kW, cui corrisponde un rendimento netto del modulo ORC del 19,2%.

Il modulo ORC dovrà essere progettato per operare all'interno di un locale chiuso, ventilato e non polveroso, con una temperatura interna compresa fra 5 °C e 40 °C. Il modulo dovrà essere preassemblato in fabbrica e montato su di una apposita piattaforma adatta ad essere installata all'interno di un locale avente dimensioni pari a 7,5 metri di larghezza per 19 metri di lunghezza e 5,5 metri di altezza. La piattaforma dovrà essere predisposta per l'installazione e il fissaggio su una fondazione in calcestruzzo. Le flange delle tubazioni di ingresso e di uscita dell'olio diatermico avranno dimensioni DN 125 con pressione nominale PN16. Le flange di ingresso e di uscita dell'acqua di raffreddamento del condensatore avranno dimensioni DN 150 e pressione nominale PN16. Tutti i componenti del modulo ORC dovranno essere verniciati a polvere e provvisti di un isolamento termico in materiale isolante con rivestimento in lamierino di alluminio idoneo a mantenere la temperatura superficiale entro un valore massimo di 80 °C. Il livello di pressione sonora massimo del modulo ORC sarà di 90 dB(A) misurato ad una distanza di 1 metro e con l'impianto funzionante in condizioni nominali.

Il generatore elettrico è di tipo asincrono trifase, con frequenza in uscita di 50 Hz e tensione nominale di 400 V. La regolazione della potenza elettrica prodotta dal modulo

ORC avviene mediante variazione della potenza termica fornita sotto forma di olio diatermico. La potenza termica in ingresso al modulo ORC dovrà essere regolabile almeno fra il 40% e il 100% del valore nominale. La curva di rendimento del modulo ORC in corrispondenza di condizioni di funzionamento a carico parziale dovrà essere tale che al 70% del carico termico nominale, il rendimento elettrico netto risulti almeno pari al 17,8% (potenza elettrica netta almeno pari a 374 kW) e che al 40% del carico termico nominale, il rendimento elettrico netto risulti almeno pari al 13,8% (potenza elettrica netta almeno pari a 166 kW). Nell'ambito di tale possibilità di regolazione della potenza elettrica, la rampa di carico minima richiesta è di 1,5 kW/s.

Il modulo ORC dovrà essere in grado di operare con temperature dell'acqua di raffreddamento diverse da quelle di progetto (25 °C all'ingresso e 35 °C all'uscita) in relazione alla variazione della temperatura dell'aria ambiente. La temperatura dell'acqua di raffreddamento inviata al modulo ORC potrà variare fra 10 °C e 45 °C. Il rendimento netto del modulo ORC in corrispondenza della massima temperatura dell'acqua di raffreddamento (45 °C) è del 15,5%.

L'impianto dovrà essere dotato di un sistema di acquisizione dati e visualizzazione dei principali parametri operativi e prestazionali interfacciabile con il sistema di acquisizione dati delle altre sezioni dell'impianto solare termodinamico. In particolare, dovranno essere misurate, visualizzate e registrate le pressioni e le temperature dell'olio diatermico all'ingresso e all'uscita del riscaldatore e del vaporizzatore, dell'acqua di raffreddamento all'ingresso e all'uscita del condensatore, del fluido organico all'ingresso e all'uscita del preriscaldatore, del vaporizzatore, del rigeneratore, della turbina, del condensatore e della pompa. Inoltre, dovranno essere misurate, visualizzate e registrate le temperature del circuito di lubrificazione, degli avvolgimenti e dei supporti del generatore elettrico, nonché la frequenza, la tensione e la potenza prodotta e la potenza assorbita dagli ausiliari. Infine, dovranno essere misurate, visualizzate e registrate le informazioni relative alla velocità di rotazione della turbina, alla posizione della valvola di regolazione dell'ammissione in turbina ed ai livelli di vibrazione della turbina, del generatore elettrico e della pompa.

Il modulo ORC dovrà funzionare in modalità completamente automatica senza la necessità di alcuna supervisione da parte del personale, sia in condizioni di normale esercizio sia in condizioni di emergenza. In caso di malfunzionamento o di condizioni di pericolo, il modulo ORC dovrà disconnettersi in automatico dalla rete elettrica e portarsi in condizioni di sicurezza. Il controllo dell'impianto deve poter avvenire anche in remoto mediante collegamento ADSL o equivalente.

L'impianto deve essere progettato e realizzato in accordo alle vigenti Direttive Europee in materia (in particolare la Direttiva Macchine 2006/42/CE e la Direttiva PED 97/23/CE) e dovranno essere fornite le relative dichiarazioni di conformità. Le flange e le apparecchiature attraversate dall'olio diatermico dovranno essere realizzate per una pressione di progetto minima di 12 bar e una temperatura di almeno 100 °C superiore a quella dell'olio diatermico in ingresso. Al fine di evitare la presenza di una atmosfera esplosiva all'interno del locale che ospita il modulo ORC, lo stesso dovrà essere provvisto di un sistema di controllo e di evacuazione in continuo delle eventuali perdite di fluido organico in pressione dalle flange di collegamento fra i diversi componenti.

Le dimensioni, la tipologia, i materiali e le modalità di collegamento e montaggio dei diversi componenti del modulo ORC che scaturiranno dalla progettazione esecutiva potranno differire rispetto a quanto sopra riportato fermo restando la necessità di assicurare un funzionamento efficiente e in condizioni di sicurezza dell'impianto solare termodinamico in accordo alle finalità operative previste (produzione di energia elettrica secondo profili programmati avvalendosi della presenza di una sezione di accumulo termico) ed ai valori di potenza nominale e producibilità media annua attesi.

2.2.4 Consistenza della fornitura

I limiti di batteria del modulo ORC con il resto dell'impianto solare termodinamico sono rappresentati dalle flange di ingresso e di uscita dell'olio diatermico, dalle flange di ingresso e di uscita dell'acqua di raffreddamento del condensatore, dai cavi dei quadri elettrici relativi alla potenza prodotta e alla potenza assorbita dagli ausiliari, dai cavi del quadro di regolazione e controllo.

Lo scopo della fornitura di cui alla presente specifica tecnica è pertanto costituito dalla fornitura, l'installazione e la messa in esercizio di un modulo ORC integrato in un impianto solare termodinamico e include gli scambiatori per il riscaldamento e la vaporizzazione del fluido operativo, lo scambiatore rigenerativo, la turbina, il generatore elettrico, il condensatore, la pompa, nonché il fluido operativo stesso, le tubazioni di collegamento fra i diversi componenti, i quadri elettrici, il sistema di lubrificazione, gli organi, la strumentazione e il software per il controllo e la regolazione e comunque tutto quanto necessario a garantire la messa in opera completa e il corretto funzionamento in condizioni di efficienza, sicurezza e compatibilità ambientale dell'impianto. La fornitura include altresì la progettazione esecutiva e tutta la documentazione eventualmente

necessaria per l'espletamento delle pratiche nei confronti degli Enti competenti relative alla realizzazione ed alla messa in esercizio dell'impianto.

La fornitura include il trasporto delle apparecchiature e dei materiali in sito, l'assemblaggio del modulo ORC per dare l'opera finita ai limiti di batteria, la verniciatura e la finitura di tutte le parti che compongono la fornitura, i collaudi e le prove idrauliche in officina e in sito.

Più nel dettaglio, la fornitura include la documentazione completa dell'impianto ORC fra cui in particolare quella relativa a: dimensionamento meccanico e termodinamico, disegni di dettaglio e di insieme, schemi di montaggio, schemi elettrici, elenco delle parti di ricambio raccomandate con prezzi e tempi di consegna, elenco delle parti soggette ad usura, lista della strumentazione, manuali di uso e manutenzione, dichiarazioni di conformità CE per le apparecchiature e gli strumenti installati, certificazioni su prove e controlli.

Inoltre nella fornitura è incluso anche l'addestramento del personale preposto alla gestione operativa dell'impianto. Il corso di addestramento sarà svolto in italiano, avrà una durata minima di 1 giorno e comprenderà l'illustrazione delle procedure di esercizio, manutenzione, ricerca e riparazione di guasti e malfunzionamenti.

2.3 Specifiche tecniche sezione di refrigerazione dell'acqua

Nel seguito sono riportate le specifiche tecniche applicabili alla fornitura e al montaggio in opera presso il sito di Ottana (NU) della sezione di refrigerazione dell'acqua integrata nell'impianto solare termodinamico da 600 kWe con accumulo termico da 14,6 MWh del Parco Sperimentale Solare di ENAS. La sezione di refrigerazione dell'acqua dissipa una potenza termica nominale di circa 2350 kW attraverso il raffreddamento da 35 °C a 25 °C di una portata d'acqua di 200 m³/h.

2.3.1 Descrizione dell'apparecchiatura

La sezione di raffreddamento dell'acqua dell'impianto solare termodinamico oggetto della presente specifica tecnica ha la funzione di dissipare l'energia termica di scarico del modulo ORC, disponibile sotto forma di acqua di raffreddamento del condensatore. L'acqua all'uscita del condensatore viene raffreddata in circuito chiuso mediante una batteria di refrigeratori e ricircolata al condensatore.

I refrigeratori dell'acqua operano a secco (Dry Air Coolers) impiegando scambiatori di calore con tubi alettati, nei quali l'acqua viene raffreddata mediante circolazione forzata di aria. La circolazione dell'aria avviene attraverso l'utilizzo di una batteria di ventilatori assiali, mentre quella dell'acqua è operata mediante una pompa di circolazione. Una parte dell'acqua calda proveniente dal modulo ORC potrà anche essere eventualmente utilizzata per il riscaldamento degli edifici dell'impianto solare termodinamico mediante sistemi a bassa temperatura (pannelli radianti a pavimento).

I refrigeratori dell'acqua dovranno essere installati all'aperto, sopra un basamento in calcestruzzo realizzato in adiacenza all'edificio che ospita il modulo ORC. La pompa di circolazione dell'acqua dovrà invece essere installata all'interno dell'edificio che ospita il modulo ORC. Al fine di ridurre le emissioni sonore entro valori compatibili con il rispetto dei limiti normativi, verranno inoltre installate due apposite barriere acustiche. La sezione di refrigerazione dell'acqua è dotata di un sistema di controllo e monitoraggio che ne garantisce il funzionamento in condizioni di efficienza e di sicurezza.

2.3.2 Condizioni di progetto

La Tabella 8 sintetizza le condizioni di progetto della sezione di refrigerazione dell'acqua. Come si evince dall'esame di tale Tabella, il sistema dovrà essere progettato

per dissipare una potenza termica nominale di 2350 kW con una temperatura dell'acqua in ingresso di 35 °C e una temperatura dell'acqua in uscita di 25 °C.

Potenza termica nominale	2350 kW
Portata acqua nominale	200 m ³ /h
Temperatura ingresso/uscita acqua	35/25 °C
Temperatura media dell'aria ambiente	17 °C
Pressione aria ambiente	1,01 bar
Umidità relativa media	74 %
Velocità media del vento	4,4 m/s
Temperatura minima/massima aria	2/34 °C

Tabella 8 – Condizioni di progetto della sezione di refrigerazione dell'acqua.

2.3.3 Specifiche tecniche delle apparecchiature

La sezione di refrigerazione dell'acqua di raffreddamento del modulo ORC è costituita da 4 refrigeratori operanti in parallelo, ciascuno con potenza termica nominale di 600 kW. La Tabella 9 riporta le specifiche tecniche essenziali dei refrigeratori dell'acqua così come valutate in sede di progetto definitivo.

Potenza termica al circuito di raffreddamento	2350 kW
Temperatura ingresso/uscita	35/25 °C
Portata d'acqua al singolo refrigeratore	50 m ³ /h
Numero refrigeratori	4
Potenza nominale singolo refrigeratore	600 kW
Portata d'aria refrigeratore (DT 15 °C)	145000 m ³ /h
Perdite di carico lato acqua	35 kPa
Numero ventilatori	18
Potenza elettrica assorbita singolo refrigeratore	3,6 kW
Potenza elettrica assorbita totale	14,4 kW

Tabella 9 – Principali specifiche tecniche dei refrigeratori d'acqua a secco.

Tali specifiche sono riferite alle condizioni nominali di prova della norma UNI EN 1048, la quale stabilisce che le potenze termiche delle apparecchiature di refrigerazione dell'acqua a secco siano riferite ad una differenza di temperatura dell'acqua fra ingresso

e uscita (DT_w) di 5 °C (acqua entrante a 40 °C e uscente a 35 °C) e ad una temperatura dell'aria ambiente di 25 °C, cosicché la differenza di temperatura fra acqua in ingresso e aria in ingresso (DT) è di 15 °C. Le condizioni di progetto della sezione di refrigerazione dell'acqua del modulo ORC prevedono invece una diminuzione di temperatura dell'acqua di 10 °C, una temperatura media dell'aria di 17 °C e una differenza di temperatura fra acqua in ingresso e aria in ingresso di 18 °C. La potenza termica nominale di Tabella 9 è stata valutata attraverso l'utilizzo dei fattori di correzione forniti dai costruttori ed è quindi conforme alla UNI EN 1048 (ovvero riportata a $DT_w=5$ °C e $DT=14$ °C).

I refrigeratori sono realizzati con tubazioni in rame provviste di alette in alluminio. La pressione massima di progetto dei tubi è di 12 bar. La struttura dei refrigeratori è realizzata in acciaio zincato con verniciatura a polvere. I ventilatori sono di tipo assiale, provvisti di griglie di protezione e azionati da motori elettrici trifase a 400 V. Il refrigeratori dell'acqua verranno installati all'aperto e fissati su un basamento in calcestruzzo.

Nel circuito sono installate due pompe di circolazione uguali, una di riserva all'altra. Le perdite di carico nel circuito di refrigerazione sono state valutate pari a circa 1,3 bar, in relazione alle quali la pompa di circolazione dell'acqua di refrigerazione presenta una prevalenza di circa 15 m. La pompa di circolazione dell'acqua è una elettropompa centrifuga, con rendimento nominale dell'80% e una potenza elettrica assorbita di 10,0 kW. Il corpo pompa, la girante, il supporto dei cuscinetti e l'anello di tenuta sono in ghisa, l'albero è in acciaio al carbonio e la bussola di protezione dell'albero è in acciaio inox. La pompa è montata orizzontalmente su un basamento in profilato in acciaio e accoppiata al motore elettrico mediante giunto elastico. Il corpo pompa, il motore e il basamento sono verniciati a polvere. Il motore elettrico è asincrono trifase a 400 V, ventilato esternamente, IP 55, classe di isolamento F, con velocità di rotazione nominale di 1450 giri/min e controllabile mediante inverter. La pressione massima di esercizio è 16 bar mentre il campo di temperatura è compreso fra -30 °C e +140 °C.

Le tubazioni di collegamento fra i refrigeratori e il modulo ORC sono in acciaio senza saldature, con rivestimento esterno in polietilene, con giunzioni saldate, classe di pressione PN16, diametro esterno DN150 e lunghezza complessiva di circa 70 m. Il circuito idraulico include inoltre i necessari giunti, raccordi, collettori e supporti. Sono inoltre incluse le valvole di intercettazione a monte e a valle delle pompe, del modulo ORC e di ciascun refrigeratore.

La sezione di refrigerazione dell'acqua è inoltre dotata di due schermi acustici con lunghezza di 18 m, altezza di 4 m e spessore di 0,1 m. La presenza di tali schermi è richiesta in relazione al livello di emissione acustica dei refrigeratori, pari a 71 dB(A) a 10 m, ed alla necessità di rispettare i limiti di immissione acustica in corrispondenza del recettore più sfavorito. Il rispetto di tali limiti richiede infatti un livello massimo di pressione acustica di 70 dB(A) a 8 m di distanza dal centro della batteria di aerotermini (4 m di distanza dagli schermi).

La sezione di refrigerazione dell'acqua dovrà operare in modalità completamente automatica senza la necessità di alcuna supervisione da parte del personale, sia in condizioni di normale esercizio sia in condizioni di emergenza. In tal senso, la pompa di circolazione e i ventilatori dei refrigeratori dell'acqua devono regolare automaticamente le condizioni di funzionamento al variare della potenza termica da dissipare e delle condizioni ambientali. La sezione di refrigerazione deve essere in grado di regolare la potenza termica dissipata almeno fra il 40% e il 100% della potenza nominale.

L'impianto dovrà essere dotato di un sistema di acquisizione dati e visualizzazione dei principali parametri operativi e prestazionali interfacciabile con il sistema di acquisizione dati delle altre sezioni dell'impianto solare termodinamico. In particolare, dovranno essere misurate, visualizzate e registrate la portata e le temperature dell'acqua all'ingresso e all'uscita del condensatore, nonché la potenza assorbita dai ventilatori e dalla pompa di circolazione.

Tutti i componenti del sistema di refrigerazione dell'acqua devono essere progettati e realizzati in accordo alle vigenti normative tecniche (UNI, EN, ISO, etc.). I refrigeratori e le pompe devono essere progettati e realizzati in accordo alle vigenti Direttive Europee in materia, fra cui in particolare la Direttiva Macchine 2006/42/CE, la Direttiva 2004/108/CE sulla compatibilità elettromagnetica e la Direttiva 2006/95/CE sulle apparecchiature in bassa tensione. Le tubazioni dovranno rispondere alle UNI EN 10204, EN 10220 e UNI EN 10224. Della rispondenza alle sopracitate normative dovranno essere fornite le relative dichiarazioni di conformità.

Le dimensioni, la tipologia, i materiali e le modalità di collegamento e montaggio dei diversi componenti della sezione di refrigerazione dell'acqua che scaturiranno dalla progettazione esecutiva potranno differire rispetto a quanto sopra riportato fermo restando la necessità di assicurare un funzionamento efficiente, compatibile con le normative ambientali vigenti e in condizioni di sicurezza dell'impianto solare termodinamico in accordo alle finalità operative previste (produzione di energia elettrica secondo profili programmati avvalendosi della presenza di una sezione di accumulo termico) ed ai valori di potenza nominale e producibilità media annua attesi.

2.3.4 Consistenza della fornitura

I limiti di batteria della sezione di refrigerazione dell'acqua con il resto dell'impianto solare termodinamico sono rappresentati dalle flange di ingresso e di uscita dell'acqua dal condensatore del modulo ORC, dai cavi dei quadri elettrici di alimentazione delle pompe di circolazione e dei refrigeratori a secco e dai cavi del quadro di regolazione e controllo.

Lo scopo della fornitura di cui alla presente specifica tecnica è pertanto costituito dalla fornitura, l'installazione e la messa in opera di un sistema di refrigerazione dell'acqua di raffreddamento del condensatore di un impianto ORC e include i refrigeratori d'acqua a secco, le pompe di circolazione, le tubazioni di collegamento fra i diversi componenti, la raccorderia idraulica, gli organi di intercettazione e regolazione, i quadri elettrici di alimentazione delle apparecchiature elettriche, la strumentazione e il software per il controllo e la regolazione e comunque tutto quanto necessario a garantire la messa in opera completa e il corretto funzionamento in condizioni di efficienza, sicurezza e compatibilità ambientale dell'impianto.

La fornitura include inoltre la progettazione esecutiva e la documentazione completa della sezione di refrigerazione dell'acqua, con particolare riferimento a quella relativa a: dimensionamento meccanico e termodinamico, disegni di dettaglio e di insieme, schemi di montaggio, schemi elettrici, elenco delle parti di ricambio raccomandate con prezzi e tempi di consegna, elenco delle parti soggette ad usura, lista della strumentazione, manuali di uso e manutenzione, dichiarazioni di conformità CE per le apparecchiature e gli strumenti installati, certificazioni su prove e controlli. La fornitura include altresì tutta la documentazione eventualmente necessaria per l'espletamento delle pratiche nei confronti degli Enti competenti relative alla realizzazione ed all'esercizio dell'impianto.

La fornitura include il trasporto delle apparecchiature e dei materiali in sito, l'assemblaggio dell'impianto per dare l'opera finita ai limiti di batteria, la verniciatura e la finitura di tutte le parti che compongono la fornitura, i collaudi e le prove idrauliche in officina e in sito.

Inoltre nella fornitura è incluso anche l'addestramento del personale preposto alla gestione operativa dell'impianto. Il corso di addestramento sarà svolto in italiano, avrà una durata minima di 1 giorno e comprenderà l'illustrazione delle procedure di esercizio, manutenzione, ricerca e riparazione di guasti e malfunzionamenti.

2.4 Specifiche tecniche sezione di accumulo termico

Nel seguito sono riportate le specifiche tecniche applicabili alla fornitura e al montaggio in opera presso il sito di Ottana (NU) della sezione di accumulo termico integrata nell'impianto solare termodinamico da 600 kWe con accumulo termico da 14,6 MWh del Parco Sperimentale Solare di ENAS. La sezione di accumulo termico è costituita da due serbatoi e ha la funzione di accumulare una parte dell'energia termica prodotta dal campo solare sottoforma di olio diatermico ad alta temperatura. I 2 serbatoi di accumulo sono dimensionati per contenere complessivamente circa 195 t di olio diatermico alla temperatura massima di 260 °C.

2.4.1 Descrizione dell'apparecchiatura

La sezione di accumulo termico dell'impianto solare termodinamico è di tipo diretto a doppio serbatoio. L'olio diatermico prodotto in surplus dal campo solare rispetto alle richieste della sezione di potenza viene accumulato nel serbatoio "caldo". Corrispondentemente, una uguale quantità di olio diatermico viene prelevata dal serbatoio "freddo" e alimentata al campo solare. L'olio diatermico accumulato nel serbatoio "caldo" viene successivamente alimentato alla sezione di potenza e poi stoccato a minore temperatura nel serbatoio "freddo".

I due serbatoi operano a pressione atmosferica e sono coibentati per minimizzare le perdite termiche verso l'esterno. I serbatoi sono inoltre dotati di un sistema di iniezione di azoto atto a mantenere un'atmosfera inerte sopra il pelo libero dell'olio ed evitare fenomeni di ossidazione. I serbatoi verranno posizionati all'aperto, all'interno di un bacino di contenimento in calcestruzzo. Inoltre è prevista la presenza di tutti i necessari sistemi di sicurezza e di un adeguato sistema antincendio.

2.4.2 Condizioni di progetto

La Tabella 10 sintetizza le condizioni di progetto dei serbatoi di accumulo dell'olio diatermico. Come si evince dall'esame di tale Tabella, ciascun serbatoio è stato dimensionato per poter contenere una quantità di olio diatermico pari a 195 t, cui corrisponde un volume di circa 280 m³, valutato in corrispondenza di una densità dell'olio diatermico di 700 kg/m³ alla temperatura massima di 260 °C. A tale quantità di olio diatermico corrisponde una capacità di accumulo termico pari a 14,6 MWh, in

corrispondenza di un calore specifico medio di 2,45 kJ/(kgK) e di una diminuzione di temperatura dell'olio di 110 °C (da 260 °C a 150 °C). Tale accumulo termico equivale ad una autonomia di quasi 5 ore del modulo ORC a potenza nominale (3 MW termici in ingresso).

Energia termica accumulata da ciascun serbatoio	14,6 MWh
Temperatura operativa	260 °C
Massa olio diatermico	195 t
Volume minimo olio diatermico nel serbatoio	280 m ³
Temperatura media aria ambiente	17 °C
Velocità media del vento (a 10 m)	4,4 m/s
Velocità massima del vento (a 10 m)	20 m/s

Tabella 10 – Condizioni di progetto dei serbatoi di accumulo termico.

2.4.3 Specifiche tecniche delle apparecchiature

I 2 serbatoi di accumulo termico sono uguali fra loro e sono stati dimensionati per poter contenere una quantità di olio diatermico pari a 195 t ciascuno, sufficiente a garantire il funzionamento della sezione di potenza per quasi 5 ore a potenza nominale. In corrispondenza di una densità dell'olio diatermico di 700 kg/m³ (valutata in corrispondenza della temperatura massima di 260 °C) il volume occupato dall'olio all'interno di ciascun serbatoio risulta pari a circa 280 m³.

I serbatoi sono stati dimensionati a partire da un rapporto altezza/diametro pari a circa 0,32 e prevedendo un adeguato margine di sicurezza sul volume di olio accumulabile. In tal senso, è stato assunto un diametro interno di 11,0 metri e una altezza utile di 3,5 metri (cosicché l'effettiva capacità di accumulo, è pari a circa 330 m³). Il tetto è autoportante, conico con altezza interna al colmo pari a 4 metri.

I serbatoi sono del tipo a tetto fisso, realizzati in acciaio S 275 JR con mantello a due virole di spessore costante e saldate in maniera sfalsata. In accordo alle norme API 650 (Welded Steel Tanks for Oil Storage), le piastre del tetto e del mantello hanno uno spessore di 5 mm, mentre quelle del fondo hanno uno spessore di 7 mm. Il mantello poggia su un trincarino avente uno spessore di 12 mm, sporgente verso l'esterno per 10 cm e verso l'interno per 25 cm e raccordato alle piastre del fondo. Alla parte terminale dell'ultima virola è saldato un profilato angolare di rinforzo e di supporto alle lamiere

del tetto. Due passi d'uomo da 600 mm posizionati alla base e contrapposti assicurano l'accessibilità. Sono inoltre presenti i bocchelli di entrata e di uscita dell'olio (dimensione DN 125 e classe di pressione PN16) e il pozzetto di scarico dal fondo.

I serbatoi sono dotati di un sistema di iniezione di azoto atto a mantenere un'atmosfera inerte sopra il pelo libero dell'olio ed evitare fenomeni di ossidazione, nonché di misuratori di livello a stadia con segnalazione di allarme di minimo e massimo livello e di una valvola di sfiato. I due serbatoi sono collegati fra loro da una tubazione di recupero dell'azoto, necessaria per trasferire l'azoto dal serbatoio in fase di carica a quello in fase di scarica. L'azoto di reintegro viene fornito da un pacco bombole in pressione installato in adiacenza alla zona serbatoi. I serbatoi saranno completi di carpenteria di servizio, scala alla marinara e passerelle sul tetto. Le superfici esterne saranno sabbiare e verniciate con zincante inorganico di spessore pari a 75 μm .

I serbatoi sono dotati di una coibentazione dimensionata per ridurre le perdite termiche verso l'esterno entro valori inferiori allo 0,5% giornaliero dell'energia termica accumulata. In tal senso, i serbatoi sono coibentati, nel mantello e nel tetto, con pannelli di lana di roccia (spessore 50 cm) rivestiti con lamierino in alluminio. Il fondo dei serbatoi poggia su un supporto costituito da uno strato di sabbia (10 cm), uno strato di mattoni refrattari (6 cm), i pannelli isolanti in vetro cellulare (25 cm) e la fondazione in calcestruzzo. Nel complesso, il diametro esterno dei serbatoi risulta pertanto pari a circa 12 metri, mentre l'altezza esterna al colmo è di 4,50 metri.

I due serbatoi verranno posizionati all'interno di un bacino di contenimento in calcestruzzo largo 22 metri, lungo 44 metri e con pareti alte 70 cm. Il volume utile del bacino di contenimento (circa 670 m³) è pari ad oltre il doppio della capacità dei due serbatoi. Il bacino di contenimento dei serbatoi è completamente stagno e dotato di pozzetti interni di raccolta, munito di pompa auto-adescente, e con le tubazioni di adduzione e di prelievo che attraversano gli argini del bacino mediante passaggi opportunamente sigillati. Lo scolo delle acque meteoriche avviene attraverso canali dotati di valvole comandate dall'esterno. La Tabella 11 riporta le principali specifiche tecniche dei serbatoi di accumulo termico.

Inoltre la sezione di accumulo è dotata di tutti i necessari sistemi di sicurezza e di un sistema antincendio. Quest'ultimo è costituito da una tubazione ad anello su ogni serbatoio con erogatori a schiuma, integrato da dispositivi trasportabili disposti in adiacenza ai serbatoi stessi.

I serbatoi devono essere progettati e realizzati in accordo alle vigenti normative in materia (in particolare la normativa API 650 relativa ai serbatoi di stoccaggio di oli minerali o equivalente) e dovranno essere fornite le relative dichiarazioni di conformità.

Energia termica accumulata	14,6 MWh
Temperatura operativa	260 °C
Massa totale olio diatermico	195 t
Diametro interno/esterno	11,0/12,0 m
Altezza utile interna	3,5 m
Altezza esterna al colmo	4,5 m
Volume utile unitario	330 m ³
Spessore lamiera mantello e tetto (acciaio S 275 JR)	5 mm
Spessore lamiera fondo (acciaio S 275 JR)	7 mm
Spessore isolante (lana di roccia) mantello e tetto	50 cm
Spessore isolante (vetro cellulare) fondo	25 cm

Tabella 11 – Principali dati caratteristici dei serbatoi di accumulo.

I processi di carica e scarica dei serbatoi dovranno avvenire in modalità completamente automatica senza la necessità di alcuna supervisione da parte del personale, sia in condizioni di normale esercizio sia in condizioni emergenza. In particolare, il sistema di iniezione dell'azoto deve operare lo sfiato e/o il reintegro nei serbatoi in maniera automatica. I serbatoi dovranno essere dotati di un sistema di acquisizione dati e di visualizzazione dei principali parametri operativi interfacciabile con il sistema di acquisizione dati delle altre sezioni dell'impianto solare termodinamico. In particolare, dovranno essere misurate, visualizzate e registrate le pressioni, le temperature e le portate dell'olio diatermico all'ingresso e all'uscita di ciascun serbatoio. Inoltre, dovranno essere misurati, visualizzati e registrati i livelli e le temperature dell'olio diatermico all'interno dei serbatoi.

Le dimensioni, la tipologia, i materiali e le modalità di collegamento e montaggio dei serbatoi che scaturiranno dalla progettazione esecutiva potranno differire rispetto a quanto sopra riportato, fermo restando la necessità di assicurare un funzionamento efficiente e in condizioni di sicurezza dell'impianto solare termodinamico in accordo alle finalità operative previste (produzione di energia elettrica secondo profili programmati avvalendosi della presenza di una sezione di accumulo termico) ed ai valori di potenza nominale e producibilità media annua attesi.

2.4.4 Consistenza della fornitura

I limiti di batteria della sezione di accumulo termico con il resto dell'impianto solare termodinamico sono rappresentati dalle flange di ingresso e di uscita dell'olio diatermico nei collettori principali e dai cavi dei quadri del sistema di controllo.

Lo scopo della fornitura di cui alla presente specifica tecnica è pertanto costituito dalla fornitura, l'installazione e la messa in opera di due serbatoi di stoccaggio per olio diatermico integrati in un impianto solare termodinamico e include i serbatoi, le flange, la carpenteria di servizio, le scale, le passerelle, la coibentazione, il sistema di iniezione dell'azoto, il pacco bombole dell'azoto, il sistema antincendio, la strumentazione e il software per il controllo, la regolazione e il monitoraggio e comunque tutto quanto necessario a garantire il corretto funzionamento in condizioni di sicurezza del sistema di accumulo termico.

La fornitura include la documentazione completa relativa alla progettazione dei serbatoi, con particolare riferimento a quella relativa a: dimensionamento meccanico, disegni di dettaglio e di insieme, schemi di montaggio, elenco delle parti di ricambio raccomandate con prezzi e tempi di consegna, elenco delle parti soggette ad usura, lista della strumentazione, manuali di uso e manutenzione, dichiarazioni di conformità CE per le apparecchiature e gli strumenti installati, certificazioni su prove e controlli. La fornitura include altresì tutta la documentazione eventualmente necessaria per l'espletamento delle pratiche nei confronti degli Enti competenti relative alla realizzazione ed all'esercizio dell'impianto.

La fornitura include il trasporto delle apparecchiature e dei materiali in sito, l'assemblaggio dei serbatoi per dare l'opera finita ai limiti di batteria, la verniciatura e la finitura di tutte le parti che compongono la fornitura, i collaudi e le prove idrauliche in sito.

2.5 Specifiche tecniche sistema di distribuzione dell'olio

Nel seguito sono riportate le specifiche tecniche applicabili alla fornitura e al montaggio in opera presso il sito di Ottana (NU) del sistema di distribuzione dell'olio diatermico integrato nell'impianto solare termodinamico da 600 kWe con accumulo termico da 14,6 MWh del Parco Sperimentale Solare di ENAS. Il sistema di distribuzione (piping e pompe) ha la funzione di far circolare l'olio diatermico fra il campo solare, la sezione di potenza e i serbatoi di accumulo termico.

2.5.1 Descrizione dell'apparecchiatura

Il sistema di distribuzione è costituito dall'insieme delle tubazioni, delle pompe, delle valvole, della raccorderia, della carpenteria, dei supporti e di tutti gli altri componenti necessari a garantire la corretta circolazione dell'olio diatermico fra il campo solare, la sezione di generazione elettrica e i serbatoi di accumulo termico.

Le tubazioni sono dimensionate per operare a bassa pressione e sono isolate termicamente per ridurre le perdite di calore verso l'esterno. Il circuito deve essere realizzato in maniera tale da evitare fenomeni di ossidazione e di degrado dell'olio diatermico a causa della presenza di punti caldi. Le pompe di circolazione dell'olio sono ridondanti al fine di garantire una maggiore sicurezza di funzionamento. Inoltre è prevista la presenza di tutti i necessari sistemi di misura e di sicurezza.

2.5.2 Condizioni di progetto

La Tabella 12 sintetizza le condizioni di progetto del sistema di distribuzione dell'olio diatermico.

Portata massima olio	17,3 kg/s
Massima diminuzione di temperatura dell'olio	1 °C
Temperatura ambiente	17 °C
Velocità media del vento (a 10 m)	4,4 m/s

Tabella 12 – Condizioni di progetto del sistema di distribuzione dell'olio diatermico.

Come si evince dall'esame di tale Tabella, le tubazioni dell'olio sono dimensionate per la portata nominale prodotta dal campo solare e per una perdita termica massima corrispondente ad una diminuzione massima della temperatura dell'olio di circa 1 °C fra il campo solare e il modulo ORC.

2.5.3 Specifiche tecniche delle apparecchiature

In relazione alla portata dell'olio di progetto, il diametro delle tubazioni di collegamento, dimensionate per una velocità dell'olio di circa 1,0-2,0 m/s, fra il campo solare e il modulo ORC è un DN150, cui corrisponde un diametro esterno di circa 168 mm. Il diametro delle tubazioni di collegamento fra il modulo ORC e i serbatoi di accumulo è un DN125, cui corrisponde un diametro esterno di circa 141 mm. I collegamenti con i 6 loop del campo solare è realizzato mediante 6 raccordi a croce e con tubazioni principali di diametro decrescente. I diametri delle tubazioni fra la prima e la seconda fila di collettori è un DN125 mentre i diametri fra la seconda e la terza fila è un DN100.

Tutti i tubi sono in acciaio senza saldature, adatti all'impiego di fluidi ad alta temperatura (riferimento ASTM A 106 Gr.B), con scheda standard e PN16. L'isolamento termico è costituito da coppelle in lana minerale (conduttività circa 0,04 J/m°C) con spessore di 80 mm e rivestimento in lamierino di alluminio.

Il circuito deve essere provvisto di opportuni giunti di dilatazione e dotato di pendenze idonee a consentire lo svuotamento completo delle tubazioni. Il circuito include inoltre i necessari giunti, raccordi, collettori, supporti, valvole di ritegno, valvole di regolazione di portata, valvole di intercettazione a monte e a valle delle pompe, del modulo ORC, dei serbatoi e di ciascuna linea di collettori. Nei punti più alti del circuito è presente un sistema di degasaggio dell'olio.

Le valvole di intercettazione sono a saracinesca, ad azionamento manuale, con corpo e coperchio in acciaio e tenuta in grafite, attacchi flangiati o a saldare di testa, diametro nominale in accordo alla tubazione, adatte all'impiego di olio diatermico, pressione massima di esercizio 12 bar a 260 °C, verniciatura monocomponente, spessore 45 µm.

Le valvole di ritegno sono a clapet, con corpo e coperchio in acciaio fuso, guarnizioni in acciaio e grafite, attacchi flangiati o a saldare di testa, diametro nominale in accordo alla tubazione, adatte all'impiego di olio diatermico, pressione massima di esercizio 12 bar a 260 °C, verniciatura monocomponente, spessore 45 µm.

Le valvole di regolazione sono del tipo a flusso avviato, con attacchi in linea, con corpo in acciaio, classe di tenuta VI standard in grafite pura, attacchi flangiati, attuatore elettrico,

diametro nominale DN125 e DN150, classe di pressione PN16, adatte all'impiego di olio diatermico, verniciatura epossidica, spessore 45 µm.

Nelle condizioni di progetto (portata d'olio pari a circa 17,3 kg/s), le perdite di carico complessive sono state valutate pari a circa 2,5 bar, per una corrispondente prevalenza richiesta alla pompa di circolazione di circa 35 metri e una potenza di circa 9,5 kW (assunto un rendimento del 65%). All'avvio, ovvero con olio a bassa temperatura, le perdite di carico sono maggiori (circa 3,0 bar), ma la maggiore densità e la minore portata rendono la pompa pienamente adeguata anche in tali condizioni. Sono previste due pompe uguali, una di riserva all'altra. E' inoltre prevista la presenza di una pompa a servizio di ciascun serbatoio, avente portata pari a 11,1 kg/s e prevalenza pari circa 30 metri, per una corrispondente potenza di circa 5,2 kW. Anche per tali pompe è prevista la presenza di una unità di riserva.

Le pompe sono elettropompe centrifughe monoblocco, con rendimento nominale del 65%. Il corpo pompa, la girante, il supporto dei cuscinetti e l'anello di tenuta sono in ghisa, l'albero è in acciaio al cromo e la bussola di protezione dell'albero è in acciaio inox. La pompa è montata orizzontalmente su un basamento in profilato in acciaio e accoppiata al motore elettrico mediante giunto elastico. Il corpo pompa, il motore e il basamento sono verniciati a polvere. Il motore elettrico è asincrono trifase a 400 V, ventilato esternamente, IP 55, classe di isolamento F, con velocità di rotazione nominale di 1450 giri/min e controllabile mediante inverter. La pressione massima alla mandata è di 16 bar mentre il campo di temperatura operativo è compreso fra -30 °C e +350 °C.

Ciascuna pompa deve essere dotata di valvola di intercettazione, valvola di ritegno, valvola di scarico e filtro.

2.5.4 Consistenza della fornitura

I limiti di batteria del sistema di distribuzione dell'olio diatermico con il resto dell'impianto solare termodinamico sono rappresentati dalle flange di ingresso e di uscita dell'olio diatermico dal campo solare, dal modulo ORC e dai serbatoi di accumulo termico e dai cavi dei quadri del sistema di controllo delle pompe.

Lo scopo della fornitura di cui alla presente specifica tecnica è pertanto costituito dalla fornitura, l'installazione e la messa in opera delle tubazioni di collegamento fra il campo solare, il modulo ORC e i serbatoi di accumulo termico e include le tubazioni, i pezzi speciali (curve, T, riduzioni, flange, etc.), le pompe, le valvole di intercettazione, le valvole di regolazione, gli elementi di supporto e di fissaggio (staffe, collari, selle di appoggio, etc.), la strumentazione per la misura della portata, della pressione e della

temperatura, il software per il controllo, la regolazione e il monitoraggio e comunque tutto quanto necessario a garantire il corretto funzionamento in condizioni di sicurezza del sistema.

La fornitura include la documentazione completa relativa alla progettazione del sistema, con particolare riferimento a quella relativa a: dimensionamento meccanico, disegni di dettaglio e di insieme, schemi di montaggio, elenco delle parti di ricambio raccomandate con prezzi e tempi di consegna, elenco delle parti soggette ad usura, lista della strumentazione, manuali di uso e manutenzione, dichiarazioni di conformità CE per le apparecchiature e gli strumenti installati, certificazioni su prove e controlli. La fornitura include altresì tutta la documentazione eventualmente necessaria per l'espletamento delle pratiche nei confronti degli Enti competenti relative alla realizzazione ed all'esercizio dell'impianto.

La fornitura include il trasporto delle apparecchiature e dei materiali in sito, l'assemblaggio per dare l'opera finita ai limiti di batteria, la verniciatura e la finitura di tutte le parti che compongono la fornitura, i collaudi e le prove idrauliche in sito.

2.6 Specifiche tecniche olio diatermico

Nel seguito sono riportate le specifiche tecniche applicabili alla fornitura presso il sito di Ottana (NU) dell'olio diatermico per l'impianto solare termodinamico da 600 kWe con accumulo termico da 14,6 MWh del Parco Sperimentale Solare di ENAS.

2.6.1 Descrizione della fornitura

L'olio diatermico rappresenta il fluido termovettore attraverso il quale l'energia termica prodotta dal campo solare viene trasferita al modulo ORC. Inoltre l'olio diatermico costituisce anche il mezzo attraverso il quale viene realizzato l'accumulo termico. Le caratteristiche chimico-fisiche dell'olio diatermico devono essere tali da consentire il funzionamento dell'impianto in condizioni di efficienza e di sicurezza.

In condizioni di progetto l'olio diatermico deve operare ad una temperatura di 260 °C. La quantità complessiva richiesta di olio è pari a 195 t.

2.6.2 Specifiche tecniche della fornitura

L'oggetto della presente specifica tecnica è costituito dalla fornitura presso il sito di Ottana (NU) di 195 t di olio diatermico. L'olio diatermico è a base minerale con elevata resistenza all'ossidazione e al cracking termico ed è caratterizzato da una temperatura operativa nominale di 260 °C. La Tabella 13 riporta le principali specifiche tecniche.

Temperatura massima nel tubo (bulk)	305 °C
Temperatura massima di parete (film)	340 °C
Punto di scorrimento	-12 °C
Viscosità a 40 °C	30 mm ² /s
Viscosità a 100 °C	5 mm ² /s
Punto di infiammabilità	215 °C
Coefficiente di dilatazione cubica	0,00066 m ³ /°C
Massa volumica a 15 °C	870 kg/m ³
Calore specifico a 200 °C	2,45 kJ/kgK

Tabella 12 – Specifiche tecniche dell'olio diatermico.

3. NORME PER LE PROVE DI ACCETTAZIONE E COLLAUDO

L'accettazione della fornitura è subordinata al buon esito delle prove di collaudo tese ad accertare la corrispondenza della fornitura stessa alle specifiche contenute nel presente disciplinare tecnico. Le prove di accettazione finale verranno effettuate al termine del primo avviamento dell'impianto, eseguito in accordo alle procedure previste dal fornitore. Al termine del periodo di avviamento l'impianto dovrà essere in grado di operare secondo le finalità per le quali è stato progettato (produzione di energia elettrica da fonte solare secondo profili programmati di produzione ed immissione dell'energia elettrica in rete) e di fornire le prestazioni richieste in termini di potenza elettrica netta e di rendimento di conversione.

Le prove di accettazione e collaudo finale dell'impianto riguarderanno tutti i componenti e le sezioni, con particolare riferimento al campo solare e al modulo ORC. Fanno parte delle prove di accettazione anche le eventuali prove su specifici componenti eseguite in officina dal fornitore. Di tali prove il fornitore consegnerà la relativa documentazione di esecuzione e di rispondenza alle specifiche richieste dal disciplinare tecnico.

Il collaudo finale sul campo sarà volto ad accertare il corretto assemblaggio e funzionamento dei principali componenti e dell'intero impianto solare termodinamico. In particolare, il collaudo finale dell'impianto verrà effettuato dapprima attraverso le prove a freddo volte a valutare il corretto funzionamento degli strumenti di misura, del sistema di acquisizione dati, dei sistemi ausiliari (lubrificazione, aria compressa, etc.) e di sicurezza, nonché la tenuta idraulica del circuito dell'acqua di raffreddamento del condensatore e dell'olio diatermico.

Dopo il primo avviamento effettuato con esito positivo dal fornitore, verranno verificate le funzionalità dell'impianto in relazione alle procedure di avviamento ed arresto in automatico, alle procedure di arresto in condizioni di emergenza ed al funzionamento in automatico in relazione alla variazione delle condizioni di irraggiamento solare per quanto concerne il campo solare e di alimentazione termica per quanto concerne il modulo ORC.

Successivamente alle verifiche preliminari di funzionalità precedentemente citate, verrà verificata la capacità dell'impianto di operare in condizioni di funzionamento continuo ed affidabile per periodi di tempo prolungati. Il ciclo di prova in continuo avrà una durata di 10 giorni consecutivi, nel corso dei quali l'impianto dovrà operare in maniera continuativa, compatibilmente con la disponibilità di olio diatermico alle previste condizioni termodinamiche di ingresso.

Al termine del ciclo di prove in continuo verranno svolte le prove di accettazione finale, volte a verificare i livelli prestazionali stabiliti dalle specifiche del disciplinare tecnico. In particolare, verranno verificate le prestazioni del campo solare in termini di temperatura dell'olio diatermico, potenza termica utile prodotta e rendimento termico. In relazione alla variabilità e imprevedibilità delle condizioni ambientali nelle quali verranno svolte le prove di accettazione finale, i livelli di prestazione del campo solare verranno rapportati alle effettive condizioni di irraggiamento solare mediante le procedure di correzione riportate di seguito. Analogamente, verranno verificate le prestazioni del modulo ORC in termini di potenza elettrica netta prodotta e di rendimento netto di conversione, in condizioni sia di carico nominale sia di carico parziale. Anche in questo caso, in relazione alla variabilità delle condizioni ambientali nelle quali verranno svolte le prove di accettazione finale, i livelli di prestazione del modulo ORC verranno rapportati ai valori della effettiva temperatura dell'acqua di raffreddamento in ingresso al condensatore mediante le procedure di correzione riportate di seguito.

3.1 Verifica delle prestazioni del campo solare

La verifica delle prestazioni del campo solare verrà effettuata misurando la portata massica $\dot{m}_{O,CS}$ e le temperature dell'olio diatermico in ingresso $T_{CS,I}$ e in uscita $T_{CS,E}$ dal campo solare, nonché la radiazione solare diretta disponibile DNI . Tali misure verranno effettuate utilizzando la strumentazione disponibile nell'impianto. La potenza termica utile \dot{Q}_T prodotta dal campo solare verrà valutata attraverso la seguente relazione:

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_{O,CS} \cdot C_P \cdot (T_{CS,E} - T_{CS,I})$$

essendo C_P il calore specifico medio dell'olio diatermico in tale campo di temperatura.

Il rendimento termico η_T del campo solare è rappresentato dal rapporto fra la potenza termica utile prodotta e la potenza solare disponibile:

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_T}{A_C \cdot DNI}$$

dove A_C rappresenta la superficie netta degli specchi del campo solare.

Le prove di accettazione finale verificheranno che il campo solare produca l'olio diatermico ad una temperatura di almeno 260 °C, con una potenza termica utile almeno pari a 4690 kW e con un rendimento termico almeno pari al 62%.

Tali prestazioni sono riferite alle condizioni di funzionamento nominali, ovvero ad una radiazione diretta di 900 W/m² e con un angolo di incidenza della radiazione solare pari a zero. Poiché le condizioni di irraggiamento solare riscontrabili nel corso delle prove di accettazione tecnica finale saranno, in generale, diverse da quelle nominali di riferimento, la potenza termica misurata \dot{Q}_T verrà corretta per tener conto del minore valore di radiazione solare disponibile per il campo solare a causa di una DNI misurata diversa da 900 W/m² e di un angolo di incidenza diverso da zero. Nella fattispecie, la potenza termica misurata \dot{Q}_T verrà riportata ad un valore corretto $\dot{Q}_{T,c}$ direttamente confrontabile con la potenza termica nominale di verifica $\dot{Q}_{T,v}$ (pari a 4690 kW) attraverso la seguente correlazione:

$$\dot{Q}_{T,c} = \dot{Q}_T \cdot \frac{900}{DNI} \cdot \frac{1}{IAM_T} \cdot \frac{1}{IAM_L} \cdot \frac{1}{F_E}$$

dove:

- DNI è la radiazione diretta effettivamente misurata, espressa in W/m²
- IAM_T è il fattore di correzione del rendimento per la componente trasversale dell'angolo di incidenza della radiazione solare rispetto al piano degli specchi
- IAM_L è il fattore di correzione del rendimento per la componente longitudinale dell'angolo di incidenza della radiazione solare rispetto al piano degli specchi
- F_E è il fattore di correzione del rendimento per le perdite di estremità

I diversi fattori di correzione verranno calcolati in funzione delle componenti trasversali θ_T e longitudinali θ_L dell'angolo di incidenza utilizzando le seguenti correlazioni (valide per angoli di incidenza compresi fra 0 e 90 °):

$$IAM_T = 1 + 2,391 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_T - 4,481 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_T^2 + 1,947 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_T^3 - 3,295 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_T^4 + 1,671 \cdot 10^{-9} \cdot \theta_T^5$$

$$IAM_L = 1 - 6,239 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_L + 5,281 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_L^2 - 4,001 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_L^3 + 2,078 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_L^4 + 1,167 \cdot 10^{-10} \cdot \theta_L^5$$

$$F_E = 1 - 0,045 \cdot \tan(\theta_L)$$

Le componenti trasversali θ_T e longitudinali θ_L dell'angolo di incidenza verranno valutate a partire dalla posizione del sole tramite i valori dell'altezza solare α e dell'angolo di azimuth γ , utilizzando le seguenti correlazioni:

$$[\sin(\theta)]_L = \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma)$$

$$\tan(\theta)_T = \frac{\sin(\gamma)}{\tan(\alpha)}$$

Analogamente, il rendimento termico η_T del campo solare verrà riportato ad un valore corretto $\eta_{T,C}$ direttamente confrontabile con rendimento termico nominale di verifica $\eta_{T,V}$ (pari al 62%) attraverso la seguente correlazione:

$$\eta_{T,C} = \frac{\dot{Q}_{T,C}}{A_C \cdot DNI}$$

Il periodo di misura per la verifica delle prestazioni deve essere di almeno 2 ore e all'interno di tale periodo di tempo le variazioni di portata e temperatura dell'olio diatermico devono essere limitate entro un range massimo del $\pm 5\%$. I valori delle diverse grandezze misurate e calcolate sono rappresentati dai rispettivi valori medi determinati mediante integrazione delle grandezze misurate nell'intervallo di tempo considerato. Sulle misure di potenza termica misurata verrà applicata una tolleranza del 5%.

3.2 Verifica delle prestazioni del modulo ORC

La verifica delle prestazioni del modulo ORC verrà effettuata misurando la potenza elettrica netta P_E prodotta e la potenza termica \dot{Q}_{IN} fornita in ingresso sotto forma di olio diatermico. Tali misure verranno effettuate utilizzando la strumentazione disponibile nell'impianto. La potenza termica \dot{Q}_{IN} fornita al modulo ORC verrà valutata misurando la portata \dot{m}_{ORC} e le temperature dell'olio diatermico in ingresso $T_{ORC,I}$ e in uscita $T_{ORC,E}$ attraverso la seguente relazione:

$$\dot{Q}_{IN} = \dot{m}_{O,ORC} \cdot C_P \cdot (T_{ORC,I} - T_{ORC,E})$$

essendo C_P il calore specifico medio dell'olio diatermico in tale campo di temperatura.

Il rendimento elettrico netto η_E del modulo ORC è rappresentato dal rapporto fra la potenza elettrica netta (rappresentata dalla potenza elettrica lorda prodotta dal generatore elettrico diminuita degli assorbimenti elettrici interni del modulo ORC) e la potenza termica fornita in ingresso:

$$\eta_E = \frac{P_E}{\dot{Q}_{IN}}$$

Le prove di accettazione finale sono volte a verificare le prestazioni del modulo ORC in corrispondenza di condizioni di alimentazione pari al 100%, al 70% e al 40% del carico termico nominale. In particolare, le prove di accettazione finale verificheranno che la potenza elettrica netta e il rendimento netto del modulo ORC risultino almeno pari ai valori riportati nel seguente prospetto.

Carico	100% (3000 kW)	70% (2100 kW)	40% (1200 kW)
Potenza elettrica netta	575 kW	374 kW	166 kW
Rendimento elettrico netto	19,2%	17,8%	13,8%

I valori sopra riportati si riferiscono a condizioni di funzionamento con temperature dell'acqua di raffreddamento del condensatore pari a 25 °C in ingresso e a 35 °C in uscita. Nel caso in cui le temperature ambientali in corrispondenza delle quali verranno effettuate le prove di accettazione finali non consentano il rispetto di tali condizioni di temperatura dell'acqua, la potenza elettrica misurata P_E in corrispondenza di ciascun valore del carico termico in ingresso verrà riportata ad un valore corretto $P_{E,C}$ direttamente confrontabile con il rispettivo valore della potenza elettrica netta di verifica $P_{E,V}$ (ovvero riferita ad una temperatura dell'acqua di raffreddamento in ingresso di 25 °C) attraverso la seguente correlazione:

$$P_{E,C} = \frac{P_E}{\left(1 - \frac{(0,085 \cdot \Delta T^2 + 3,3 \cdot \Delta T)}{575}\right)}$$

Dove ΔT è la differenza fra la temperatura effettiva dell'acqua di raffreddamento in ingresso al condensatore e il valore di riferimento (25 °C).

Analogamente, il rendimento elettrico netto η_E del modulo ORC valutato in corrispondenza di ciascun valore del carico termico in ingresso verrà riportato ad un valore corretto $\eta_{E,C}$ direttamente confrontabile con rispettivo valore del rendimento elettrico netto di verifica $\eta_{E,V}$ (pari al 19,2% al 100% del carico termico, al 17,8% al 70% del carico e al 13,8% al 40% del carico) attraverso la seguente relazione:

$$\eta_{E,C} = \frac{P_{E,C}}{\dot{Q}_{IN}}$$

Il periodo di misura per la verifica delle prestazioni deve essere di almeno 2 ore e all'interno di tale periodo di tempo le variazioni di potenza elettrica netta prodotta devono essere limitate entro un range massimo del $\pm 5\%$. I valori delle diverse

INDICE

Introduzione	pag. 3
1. Descrizione generale dell'impianto	pag. 3
2. Specifiche tecniche della fornitura	pag. 6
2.1 Specifiche tecniche campo solare	pag. 7
2.1.1 Descrizione dell'apparecchiatura	pag. 7
2.1.2 Condizioni di progetto	pag. 8
2.1.3 Specifiche tecniche dell'apparecchiatura	pag. 8
2.1.4 Consistenza della fornitura	pag. 12
2.2 Specifiche tecniche modulo ORC	pag. 13
2.2.1 Descrizione dell'apparecchiatura	pag. 13
2.2.2 Condizioni di progetto	pag. 13
2.2.3 Specifiche tecniche dell'apparecchiatura	pag. 14
2.2.4 Consistenza della fornitura	pag. 17
2.3 Specifiche tecniche sezione di refrigerazione dell'acqua	pag. 19
2.3.1 Descrizione dell'apparecchiatura	pag. 19
2.3.2 Condizioni di progetto	pag. 19
2.3.3 Specifiche tecniche dell'apparecchiatura	pag. 20
2.3.4 Consistenza della fornitura	pag. 23
2.4 Specifiche tecniche sezione di accumulo termico	pag. 24
2.4.1 Descrizione dell'apparecchiatura	pag. 24
2.4.2 Condizioni di progetto	pag. 24
2.4.3 Specifiche tecniche dell'apparecchiatura	pag. 25
2.4.4 Consistenza della fornitura	pag. 28
2.5 Specifiche tecniche sistema di distribuzione dell'olio	pag. 29
2.5.1 Descrizione dell'apparecchiatura	pag. 29
2.5.2 Condizioni di progetto	pag. 29
2.5.3 Specifiche tecniche dell'apparecchiatura	pag. 30
2.6.4 Consistenza della fornitura	pag. 31
2.6 Specifiche tecniche olio diatermico	pag. 33
2.6.1 Specifiche tecniche dell'apparecchiatura	pag. 33
2.6.2 Consistenza della fornitura	pag. 33
3. Norme per le prove di accettazione e collaudo	pag. 34

Potenza elettrica netta	550 kW
-------------------------	--------

Tabella 1 – Principali dati caratteristici e prestazioni dell’impianto solare termodinamico in condizioni di progetto.

L’olio diatermico viene alimentato al campo solare ad una temperatura di circa 150 °C, proveniente dalla sezione di generazione elettrica ed eventualmente anche dal serbatoio di accumulo “freddo” S2. L’olio viene quindi ripartito fra i 6 loop di collettori solari a concentrazione operanti in parallelo, dove la sua temperatura aumenta fino a circa 260 °C. L’olio ad alta temperatura viene quindi alimentato all’impianto ORC e, nel caso in cui la portata sia superiore a quella richiesta dalla sezione di potenza, una parte viene accumulata nel serbatoio “caldo” S1. Viceversa, nel caso in cui la portata d’olio proveniente dal campo solare sia insufficiente a soddisfare la richiesta del modulo ORC, essa viene integrata con un prelievo dal serbatoio caldo, mentre una uguale portata di olio viene accumulata nel serbatoio freddo. L’olio diatermico viene quindi nuovamente inviato, tramite la pompa principale, al campo solare.

Nel modulo ORC, l’energia termica ceduta dall’olio diatermico consente di preriscaldare e vaporizzare il fluido organico (un olio siliconico) che costituisce il fluido operativo del ciclo termodinamico Rankine. Il fluido organico espande in una apposita turbina, viene riportato alla fase liquida mediante un condensatore raffreddato ad acqua e compresso. La potenza termica asportata dall’acqua di raffreddamento del condensatore viene dissipata in atmosfera attraverso una batteria di refrigeratori ad aria a secco (aerotermini).

Il modulo ORC e le pompe di circolazione dell’olio e dell’acqua (unitamente a quelle di riserva) sono ospitati all’interno di un edificio insonorizzato e ventilato. I refrigeratori dell’acqua e i serbatoi sono installati all’aperto, mentre i quadri di supervisione e controllo sono ospitati in un apposito edificio, denominato OMC, che comprende anche gli uffici.

2. SPECIFICHE TECNICHE DELLA FORNITURA

Il presente paragrafo contiene le principali specifiche tecniche applicabili alla fornitura e al montaggio in opera presso il sito di Ottana (NU) delle diverse sezioni dell’impianto solare termodinamico integrato nel Parco Sperimentale Solare di Ottana (NU). Nella fattispecie, le prescrizioni tecniche relative all’intero impianto solare termodinamico sono state disaggregate nelle 6 specifiche tecniche principali, relative a campo solare, modulo ORC, serbatoi di accumulo, sezione di raffreddamento dell’acqua, sistema di distribuzione dell’olio diatermico (piping) e olio diatermico.

I moduli Fresnel sono dotati di un sistema di movimentazione che consente la rotazione delle file di specchi lungo il loro asse longitudinale al fine di seguire la traiettoria solare e indirizzare con precisione la radiazione solare sul ricevitore. Il sistema di movimentazione ha anche l'ulteriore compito di portare gli specchi in posizione di sicurezza in presenza di condizioni ambientali di pericolo per l'integrità della struttura, nonché di movimentare opportunamente gli stessi in relazione ad eventuali condizioni di funzionamento a carico parziale, operazioni di manutenzione, pulizia, etc.. Il campo solare è dotato di un sistema di pulizia degli specchi ad acqua, con un consumo annuo di acqua pari a circa 20 m³.

Lunghezza del modulo	4 m
Larghezza del modulo	9,0 m
Numero di specchi	14
Larghezza specchi	50 cm
Riflettanza specchi	95%
Superficie netta a specchi	28 m ²
Superficie lorda modulo	36 m ²
Altezza da terra degli specchi	0,5 m
Altezza da terra del ricevitore	5,4 m

Tabella 4 – Principali specifiche tecniche dei moduli Fresnel.

Il fluido operativo circolante nei tubi ricevitori è un olio diatermico con temperatura di ingresso di 150 °C, temperatura di uscita di 260 °C e pressione massima (assoluta) di 4 bar. Il calore specifico medio in tale intervallo di temperatura considerato in sede di progettazione definitiva è di 2,45 kJ/(kgK). I tubi ricevitori hanno una lunghezza di 4,0 m e un diametro esterno di 70 mm, sono realizzati in acciaio con spessore di 4 mm, e hanno un rivestimento selettivo caratterizzato da una assorbanza minima del 95% e una emittanza massima del 9%. Il tubo in vetro, con diametro esterno di 125 mm, è provvisto di un rivestimento antiriflesso e ha una trasmittanza minima del 96%. Il ricevitore secondario è realizzato in alluminio e provvisto di coibentazione per ridurre le dispersioni termiche. La tabella 5 riporta le principali specifiche tecniche del ricevitore solare.

I tratti di tubazione di collegamento fra i ricevitori solari e le flange dei collettori principali di arrivo e di mandata dell'olio diatermico sono realizzati in acciaio senza saldature adatto all'impiego di fluidi ad alta temperatura (riferimento ASTM A 106 Gr.B), con diametro DN65, schedula standard e PN16. Le tubazioni di collegamento sono coibentate con cospelli di lana di roccia e rivestimento in lamierino di alluminio.

grandezze misurate e calcolate sono rappresentati dai rispettivi valori medi determinati mediante integrazione delle grandezze misurate nell'intervallo di tempo considerato. Sulle misure di potenza termica misurata verrà applicata una tolleranza del 5%.