STUDIO DI FATTIBILITÀ E PROGETTO PRELIMINARE DI UN SISTEMA DI DISTRIBUZIONE AZOTO LIQUIDO PER LE TRAPPOLE CRIOGENICHE DELL'INTERFEROMETRO INSTALLATO PRESSO IL LABORATORIO EGO / VIRGO DI CASCINA (PI)

Rev	Descrizione revisione	Data	Preparato	Verificato	Approvato
01	Revisione interfaccia trappola e gas prodotto	30/03/10	D. Milani	M. Roveta	G. Roveta
00	Prima emissione	01/02/10	D. Milani	M. Roveta	G. Roveta

SOMMARIO

1.	INTRODUZIONE	3
2.	DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI TRAPPOLE CRIOGENICHE	3
3.	REQUISITI DEL SISTEMA DI DISTRIBUZIONE	4
4.	DATI RELATIVI AL SITO	4
4.1	CARICHI RELATIVI AL VENTO	4
4.2	CARICHI RELATIVI AL SISMA	4
5.	SOLUZIONI IMPIANTISTICHE	5
5.1	SERBATOI DI STOCCAGGIO	5
5.1.1	Serbatoi zona centrale	5
5.1.2	Serbatoi zona torri *W* e *N*	7
5.1.3	Tipologia di serbatoi	9
5.1.4	Caratteristiche tecniche	10
5.1.5	Allestimento piazzola	11
5.1.6	Strategia dei rifornimenti	11
5.2	LINEE DI TRASFERIMENTO AZOTO LIQUIDO	12
5.2.1	Percorso delle linee ed installazione	12
5.2.2	Schema tipico linea di alimentazione	13
5.2.3	Diametro delle linee di alimentazione	14
5.2.4	Condizioni di progetto delle linee di trasferimento	16
5.3	VALVOLA DI REGOLAZIONE AZOTO LIQUIDO	17
5.3.1	Flash di azoto liquido nella valvola di regolazione	17
5.4	SISTEMA DI PRODUZUIONE GN2 CALDO PER RIGENERAZIONE TRAPPOLE	18
5.4.1	Sistema di vaporizzazione in continuo	19
5.4.2	Sistema di surriscaldamento	21
5.5	LINEA DI SCARICO GN2 EVAPORATO	21
6.	CONSUMI ED INVENTARIO DI LN2	22
7.	INTERFACCIA CON IL SISTEMA DI CONTROLLO	23
7.1	Segnali di controllo	23
7.2	Segnali di notifica	23
7.3	Segnali di allarme	23
8.	ASPETTI NORMATIVI	24
9.	SICUREZZA	24
9.1	Generalità	25
9.2	Precauzioni generali	25
9.3	Primo soccorso	25
9.4	Scheda tecnica dell’azoto	26
10.	IMPATTO ECONOMICO	28
10.1	Linee di distribuzione liquido	28
10.2	Consumo di azoto liquido	28
10.3	Serbatoi di stoccaggio	28
10.4	Alternative	30
11.	CONCLUSIONI	30
12.	ALLEGATI	31

1. INTRODUZIONE

Al fine di garantire lo sfruttamento scientifico a lungo termine dell'antenna interferometrica VIRGO per la rilevazione di onde gravitazionali, nonché per promuovere la collaborazione europea in questo campo in evoluzione, le organizzazioni fondatrici di VIRGO (CNRS per la Francia e l'INFN per l'Italia) hanno creato un consorzio chiamato EGO (European Gravitational Observatory).
EGO – (European Gravitational Observatory) - si trova nella campagna vicino a Pisa nel Comune di Cascina.
VIRGO è un interferometro lungo 3 km, costruito nel quadro di una collaborazione franco-italiana.
Ad oggi, questa collaborazione coinvolge 17 laboratori con oltre 190 scienziati in Francia, Italia, Paesi Bassi e Polonia.

Nell'ambito di un programma di sviluppo delle infrastrutture e delle apparecchiature dell'interferometro, si sta lavorando al progetto di un sistema di trappole criogeniche da installare alle 4 estremità dei tubi a vuoto della macchina, al fine di creare una barriera ai vapori d'acqua ed all'umidità presente nelle aree a più frequente accesso e garantire un elevato grado di vuoto nei tubi dell'interferometro.
Questo sistema di trappole criogeniche è, al momento, in fase di progettazione. Per il suo corretto funzionamento, richiederà la disponibilità di notevoli quantità di azoto liquido per raffreddare le superfici dedicate alla cattura degli inquinanti nell'interfaccia fra le zone delle ottiche e quelle del tubo.
Scopo di questo documento è quello di valutare la fattibilità e di realizzare lo studio preliminare di un sistema di stoccaggio e distribuzione di azoto liquido ad alta efficienza e basso impatto per le attività sperimentali della macchina.

2. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI TRAPPOLE CRIOGENICHE

All'estremità di ciascun ramo dell'interferometro verrà installata una trappola criogenica, studiata sullo stesso principio del prototipo attualmente esistente ed in uso presso il laboratorio di Cascina.
La trappola sarà costituita da un involucro a tenuta di vuoto da inserire fra la zona delle torri ed il tubo dell'interferometro. All'interno del contenitore in vuoto verrà realizzato un serbatoio criogenico, di geometria opportuna, con un'elevata superficie a bassa temperatura esposta lato "vuoto" dell'interferometro. Lo scopo della trappola è quello di catturare per crio-pompaggio le molecole di umidità presenti nelle torri ed impedire che migrino verso il tubo dell'interferometro inquinandone il vuoto.
A fronte degli ingressi di calore dovuti all'irraggiamento delle pareti calde del tubo, parte dell'azoto liquido contenuto all'interno dei serbatoi evaporerà.
Si rende, quindi, necessario il reintegro della quantità di azoto evaporata al fine di mantenere il livello della fase liquida, all'interno della trappola, costante e di conseguenza di ottimizzare l'efficienza della trappola stessa.

Il gas prodotto dall'evaporazione del bagno di azoto, dovrà essere convogliato all'esterno e rilasciato in atmosfera.

Il carico termico di ciascuna trappola sul serbatoio di azoto liquido interno è stimata essere attorno ai 300 W. Il numero totale di trappole installate sarà di 4 unità.
L'azoto liquido deve essere erogato alla trappola ad una pressione prossima a quella atmosferica ed alla temperatura di equilibrio del liquido alla pressione di erogazione.

Caratteristiche di progetto delle trappole:

Fluido	Azoto liquido
Pressione di erogazione	1,5 bar g
Volume geometrico trappola	200 l
Potenza termica entrante	300 W
Numero totale di trappole	4
Vita stimata	10 anni

3. REQUISITI DEL SISTEMA DI DISTRIBUZIONE

Il sistema di stoccaggio ed alimentazione dell'azoto liquido, per le 4 trappole criogeniche deve avere le seguenti caratteristiche principali:

- essere sicuro ed affidabile;
- garantire un limitato consumo di prodotto;
- garantire una riserva di liquido sufficiente ad un funzionamento senza rischio di interruzioni;
- avere un impatto sull'operabilità dell'interferometro (per es. vibrazioni) ridotto al minimo;
- prevedere un sistema di convogliamento del gas esausto proveniente dalla trappola;
- prevedere un sistema di vaporizzazione e surriscaldamento del gas, per le operazioni di bonifica delle trappole.

4. DATI RELATIVI AL SITO

Le apparecchiature (serbatoi, vaporizzatori, ecc…) che andranno installate a servizio delle trappole criogeniche devono essere calcolate, per quanto riguarda le azioni risultanti da carichi di vento e sisma, in accordo al DM 14-01-2008.

4.1 CARICHI RELATIVI AL VENTO

I parametri relativi alla regione per quanto riguarda le azioni del vento sono i seguenti:

a_0	500 m	altitudine s.l.m.
v_b	27 m/s	valore caratteristico velocità del vento della regione in esame
k_a	0.02 1/s	
a_s	5 m	altitudine s.l.m. del sito di installazione

I parametri relativi alla morfologia del sito:

Classe rugosità suolo	D
Categoria di esposizione	II

k_r	0.19
z_0	0.05 m
z_{min}	4 m
c_t	1

4.2 CARICHI RELATIVI AL SISMA

I parametri relativi alla regione per quanto riguarda le azioni del sisma sono i seguenti:

Categoria del sottosuolo	D
Categoria topografica	T1
Tipo di analisi	SLD Analisi allo Stato Limite di Danno

C_U	II	classe d'uso
V_N	50 anni	
V_R	50 anni	
T_R	50 anni	periodo di ritorno
a_g	0.050 g	accelerazione orizzontale massima attesa
F_0	2.538	valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
T_C	0.249 s	periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

5. SOLUZIONI IMPIANTISTICHE

L'impianto di stoccaggio e distribuzione consta dei seguenti apparati:

- Serbatoio di stoccaggio di LN2;
- Linee di trasferimento LN2 dal serbatoio alla trappola;
- Valvola di regolazione della portata di liquido in ingresso alla trappola;
- Linea di recupero GN2 evaporato dalla trappola e linea di scarico all'atmosfera;
- Sistema di vaporizzazione e riscaldo azoto per bonifica trappole criogeniche.

Alla luce dei requisiti essenziali del sistema di distribuzione e stoccaggio di azoto liquido, vengono analizzati i singoli componenti, sopra citati, al fine di stabilire la configurazione ottimale e le prestazioni minime che tali equipaggiamenti devono garantire.

5.1 SERBATOI DI STOCCAGGIO

Data la geografia del sito, la soluzione per il collocamento dello stoccaggio è diversa per l'edificio centrale e quelli terminali.
La scelta è dettata prevalentemente da:

- Una motivazione economica: il costo dell'infrastruttura è decisamente inferiore al caso di 3 soli serbatoi di stoccaggio;
- Una motivazione logistica: attorno all'edificio centrale conviene ridurre al minimo le installazioni, dal momento che lo spazio disponibile per tali attività è piuttosto ridotto, nell'immediata vicinanza dell'edificio;
- Una motivazione di ottimizzazione dei consumi: un serbatoio unico ha un autoconsumo inferiore rispetto a due di capacità totale identica. La riduzione di consumo dovuto ad un minor percorso delle linee in questa seconda ipotesi non è tale da sostenere la scelta.

5.1.1 Serbatoi zona centrale

Per l'edificio centrale sono state valutate 2 ipotesi di stoccaggio:

1. Stoccaggio con n.1 serbatoio per trappola, al fine di minimizzare la lunghezza della linea criogenica di collegamento del serbatoio alla trappola;
2. Stoccaggio con un serbatoio unico per le due trappole, equidistante da queste, al fine di ottimizzare le perdite di prodotto per auto-consumo del serbatoio ed il costo di investimento.

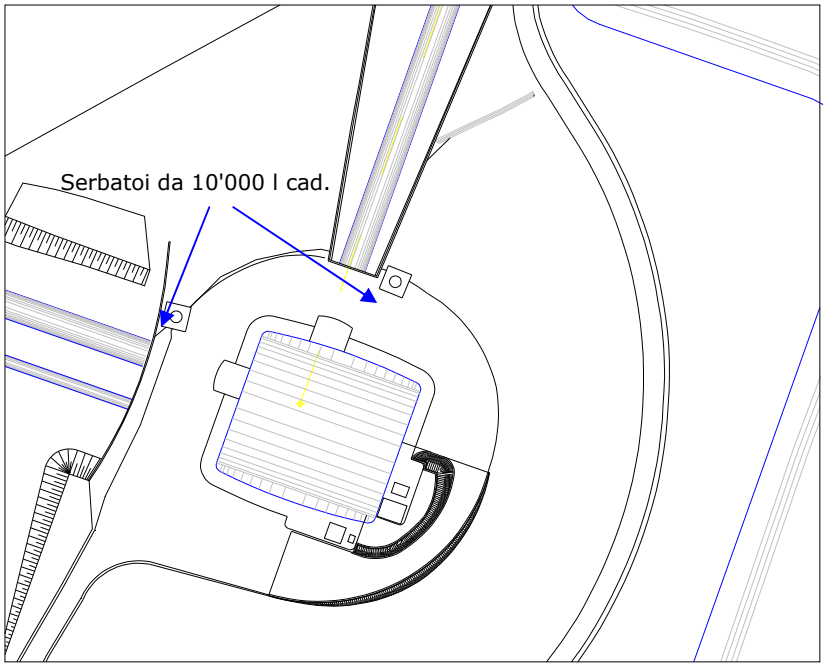

Figura 1. Layout posizionamento serbatoi "Soluzione 1". Un serbatoio per trappola da circa 10'000 l di capienza utile. La lunghezza delle linee di adduzione liquido alle trappole risultano rispettivamente 28.5m per la trappola ramo W e 24.5m per la trappola ramo N.

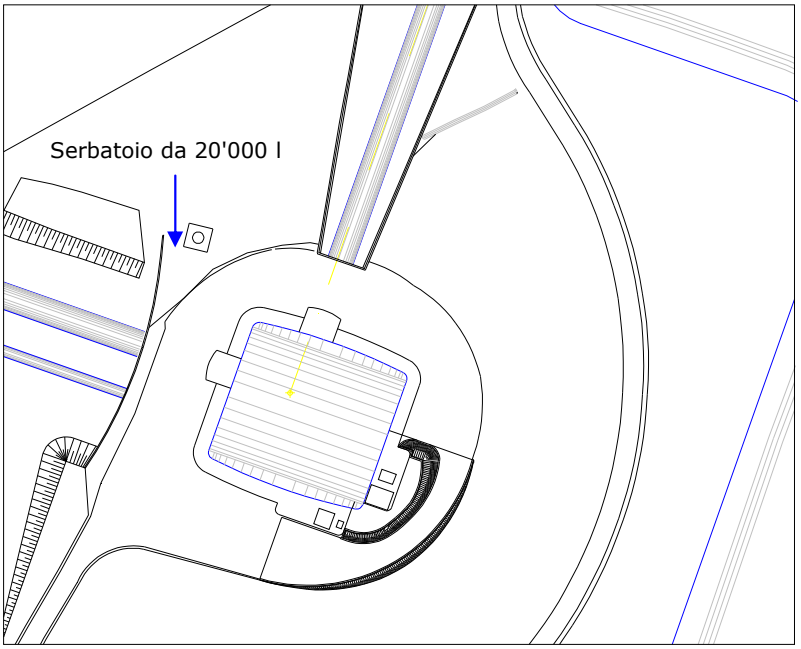

Figura 2. Layout posizionamento serbatoio "Soluzione 2". Un unico serbatoio da circa 20'000 l di capienza utile. Quota +3.0m rispetto al piano del tubo dell'interferometro. La lunghezza delle linee di adduzione liquido alle trappole risultano rispettivamente 52m per la trappola ramo W e 54m per la trappola ramo N.

Come anticipato la soluzione ottimale consiste nell'installazione di un unico serbatoio da 20'000l, comune alle due trappole, da cui staccare le due linee di adduzione del liquido.
Il vantaggio derivante dal risparmio di metri di linea (e del relativo auto consumo della linea), nel caso della prima soluzione, è di gran lunga inferiore al risparmio messo in atto dalla riduzione dell'autoconsumo dovuto all'impiego del serbatoio da 20'000 l rispetto a quello dei due serbatoi da 10'000 l.

All'uscita de serbatoio è necessario installare un collettore criogenico da cui far partire le due linee indipendenti. Le linee che alimenteranno le due trappole dovranno essere indipendenti e sezionabili individualmente.

Figura 3. Area per il posizionamento del serbatoio di alimentazione conume per le due trappole criogeniche dell'edificio centrale. In foto si vedono il ramo Nord (sulla destra) ed il ramo Ovest (sulla sinistra) del tunnel dell'interferometro.

Per maggiori dettagli sulle linee di trasferimento di faccia riferimento al paragrafo 5.2.1.

5.1.2 Serbatoi zona torri *W* e *N*

Per la zona delle due torri di estremità la soluzione obbligata è quella di un serbatoio di stoccaggio dedicato a ciascuna trappola e posizionato esternamente all'edificio.
Dal serbatoio partirà la linea di alimentazione azoto liquido che entrerà nel tunnel dalla volta e correrà parallela al tubo da vuoto fino alla trappola.

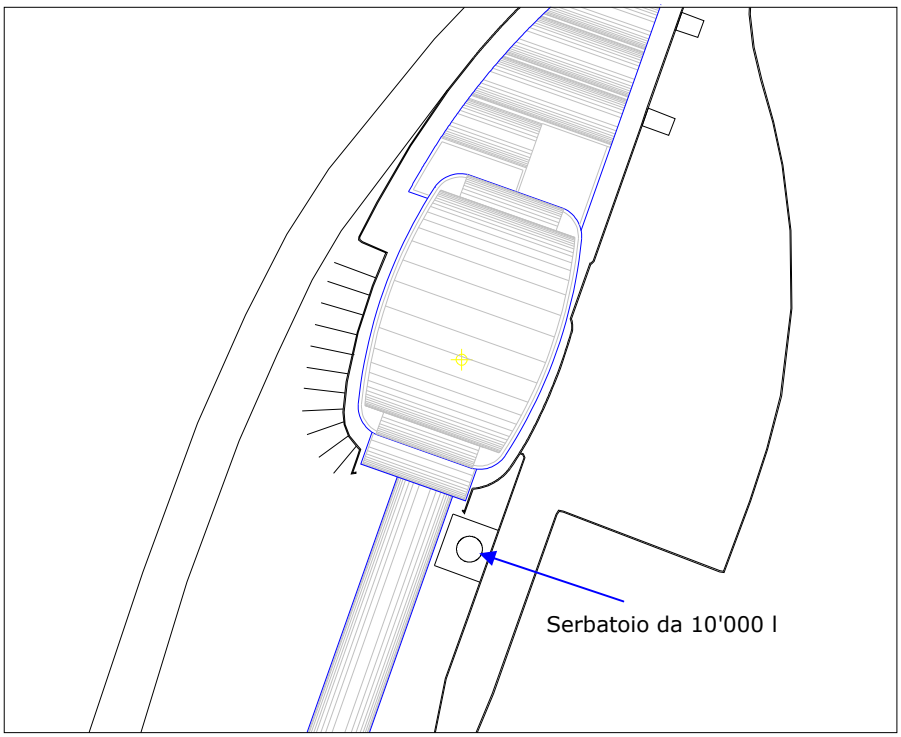

Figura 4. Layout posizionamento serbatoio nella "zona Torri" ad Ovest e Nord dell'edificio centrale. Un unico serbatoio da circa 10'000 l di capienza utile. La lunghezza delle linee di adduzione liquido alle trappole, essendo la geografia delle torri assolutamente simile, risultano essere 22 m ciascuna.

Figura 5. Area per il posizionamento del serbatoio di stoccaggio, accanto all'edificio torre Nord.

5.1.3 Tipologia di serbatoi

Per quanto riguarda i serbatoi criogenici di grandi taglie, ne esistono due tipologie: serbatoi coibentati con perlite e con intercapedine in vuoto; serbatoi super isolati con intercapedine sotto vuoto spinto.
La scelta di una tipologia piuttosto che l'altra dipende, essenzialmente, dal volume di liquido "auto consumato" e quindi dal volume complessivamente stoccato, integrato sulla vita totale dell'impianto, in quanto la differenza di costo delle due tipologie è giustificata da una notevole differenza dei valori di autoconsumo.

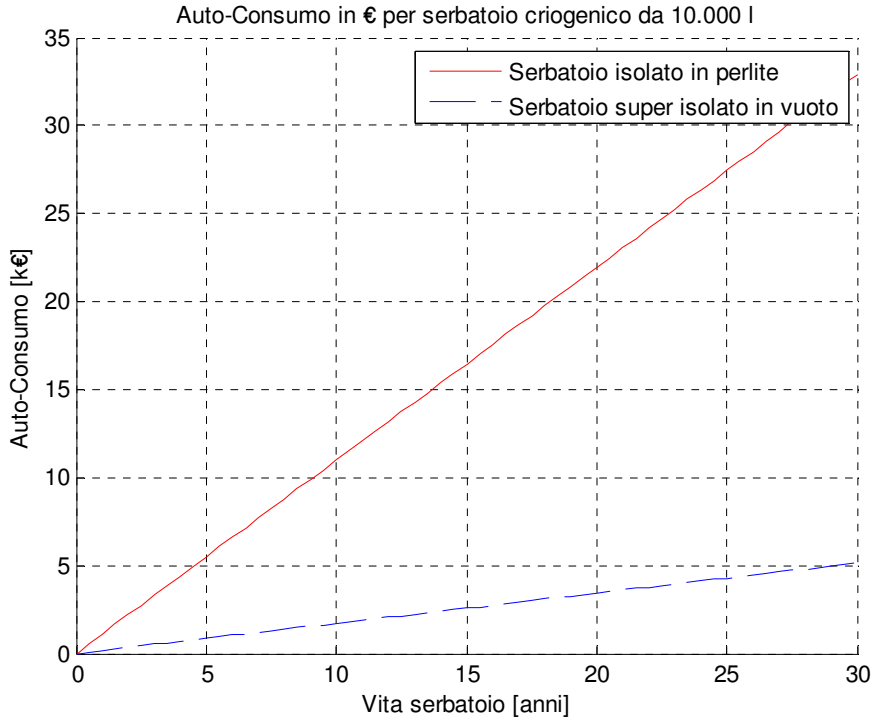

Figura 6. Stima dei costi di LN2 per auto-consumo, per serbatoi da 10'000 l di tipo super isolato ed isolato in perlite, in funzione della vita dell'impianto. Il costo unitario di LN2 è stimato pari a 0.094 €/l.

Serbatoi standard

Taglia	**Autoconsumo**		***10 anni***	
[l]	*[%/giorno]*	*[l/giorno]*	*[l]*	*[€]*
10000	0.32%	32	116800	10979
20000	0.28%	56	204400	19214

Serbatoi Super Isolati Sotto Vuoto

Taglia	**Autoconsumo**		***10 anni***	
[l]	*[%/giorno]*	*[l/giorno]*	*[l]*	*[€]*
10000	0.05%	5	18250	1716
20000	0.04%	8	29200	2745

Tabella 1. Tabella comparativa degli autoconsumi dei serbatoi di stoccaggio, per tipologia. Costo stimato dell'azoto liquido è 0.094 €/l.

Con l'inventario di azoto liquido previsto per questo progetto e la sua durata temporale stimata, non risulta essere economicamente conveniente l'adozione di una soluzione con serbatoio super isolato sotto vuoto, non essendo il risparmio di prodotto che ne consegue confrontabile con la differenza di investimento da affrontare. Infatti, ai valori dei prezzi di mercato per tali apparecchiature, tale differenza è, per serbatoi di taglia 10'000l, dell'ordine di 16'000 €; per un serbatoio di taglia 20'000l è dell'ordine di 32'000 €.

L'opzione inizia ad essere interessante nel caso si preveda un impiego su una scala di tempo più estesa rispetto a quanto previsto in questa fase.

5.1.4 Caratteristiche tecniche

I serbatoi di stoccaggio azoto liquido dovranno, quindi, essere di tipo coibentati in vuoto con perlite.
Le principali caratteristiche di progetto dovranno essere le seguenti:

Fluido	Azoto liquido
Pressione progetto	14 bar g
Temperatura di progetto	-196 °C
Capacità utile	≥ 9'500 l per alimentazione edifici torri nord e ovest ≥ 20'000 l per alimentazione edificio centrale
Norme applicate	Marcatura "CE" in accordo a direttiva 97/23 CE
Materiali	
recipiente interno	acciaio inossidabile X2CrNi 18-9 EN10028-7 o equivalente
recipiente esterno	acciaio al carbonio S235J2 EN10025-2004 o equivalente
tubi e valvole	acciaio inossidabile X2CrNi 18-9 EN10028-7 o equivalente
Consumo giornaliero	≤ 0,38%

I serbatoi, inoltre, dovranno essere calcolati per essere installati sul sito in accordo ai dati forniti relativamente alle azioni di vento e sisma (si veda il paragrafo 4), secondo la normativa vigente DN 18/01/2008.

Il corredo minimo di strumentazione e valvole che il serbatoio dovrà avere è il seguente:

- Linea di carico dall'alto e dal basso, con valvole di isolamento;
- Linea di utilizzo, con valvola di isolamento ed economizzatore gas;
- Linea di spillamento liquido, con valvola di isolamento;
- Linea di sfogo gas, con valvola di isolamento;
- Regolatore meccanico di pressione a monte, per il mantenimento della pressione nel serbatoio a valori costanti, regolabili.
- Circuito di messa in pressione;
- Indicatore locale di livello;
- Predisposizione alla *remotizzazione* del segnale di livello, per trasmissione in sala controllo;
- Dispositivi di protezione sovra-pressione per involucro esterno ed interno e relative tubazioni.

Lo schema tipico di processo e strumenti, è riportato in Figura 7.

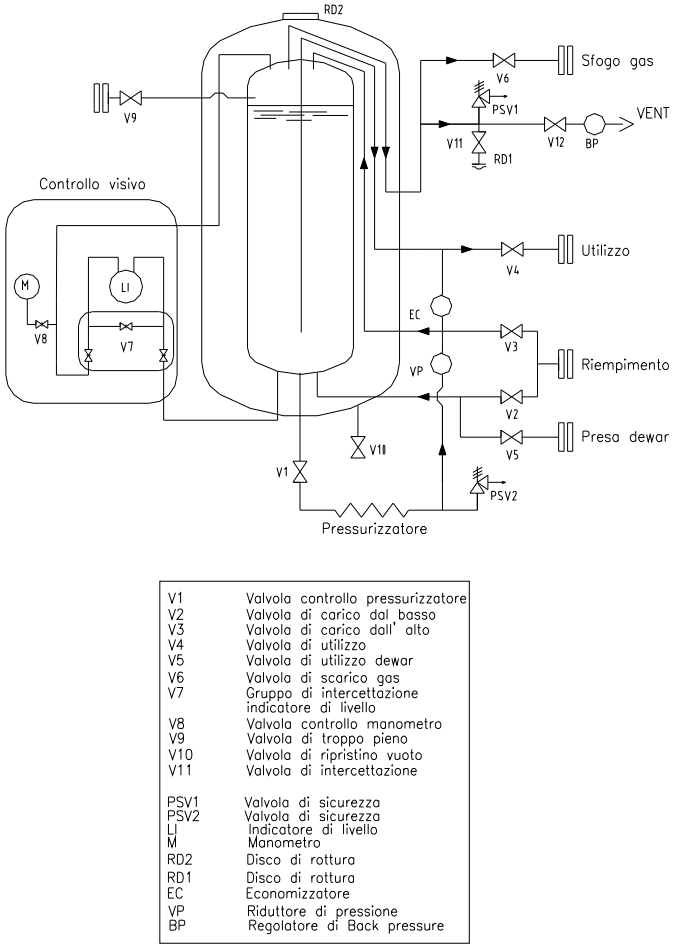

Figura 7. P&ID tipico serbatoio di stoccaggio LN2.

5.1.5 Allestimento piazzola

La piazzola destinata ad alloggiare i serbatoi di stoccaggio, nonché gli scambiatori di calore atmosferici per la produzione di gas, deve essere approntata per sopportare i carichi sviluppati dal recipiente, derivanti dalle azioni di vento e sisma, come descritto in precedenza.

La piazzola dovrà essere, inoltre, equipaggiata con un'alimentazione elettrica con presa 380 V, 100 A, per l'alimentazione della pompa di travaso dell'autocisterna.

5.1.6 Strategia dei rifornimenti

Per ridurre al minimo l'impatto sulle attività sperimentali dell'interferometro, è necessario che le operazioni di riempimento dei serbatoi siano il più rade possibile.
Un intervallo temporale ragionevole, fra una ricarica e l'altra, è di circa 1 mese. Questo consente di contenere la taglia dei serbatoi di stoccaggio, da un lato, mentre dall'altro consente di sfruttare i fermi impianto per la manutenzione settimanale operando, così, nei "tempi morti" dell'esperimento.
Per maggior sicurezza, la taglia dei serbatoi è stata stimata su un periodo di 35 giorni (ossia 5 settimane), al fine di garantire una ulteriore autonomia di almeno una settimana, in caso di ritardi del rifornimento che impediscano il corretto rabbocco di uno o più serbatoi nei tempi previsti.

Altro aspetto importante da tenere in considerazione sono i tempi necessari al rifornimento.
Attualmente, la manutenzione programmata dell'impianto è di 4-5 ore la settimana.
Le operazioni di rabbocco vanno condotte all'interno di questa finestra oraria.

5.1.6.1 Serbatoi siti Nord e Ovest

Litri da riempire	10'000 l
Lunghezza max cisterna	18 m
Peso massimo cisterna	45 t
Tempo di percorrenza A/R	15' x 2
Tempo rifornimento	30' *(a serbatoio freddo)*

5.1.6.2 Serbatoio edificio centrale

Litri da riempire	20'000 l
Lunghezza max cisterna	18 m
Peso massimo cisterna	45 t
Tempo di percorrenza A/R	5' x 2
Tempo rifornimento	45' *(a serbatoio freddo)*

5.2 LINEE DI TRASFERIMENTO AZOTO LIQUIDO

Al fine di ridurre la formazione di azoto gassoso per evaporazione del liquido lungo la linea di trasferimento dal serbatoio di stoccaggio alla trappola criogenica, la tipologia di linea di trasferimento dovrà essere super isolata con intercapedine sotto vuoto.
Il vuoto dell'intercapedine dovrà essere, a caldo, dell'ordine di 10^{-4} mbar.
Il valore di tenuta del vuoto, misurato mediante spettrometro di massa ad elio con la tecnica del vuoto + sacco di elio, deve essere migliore di 1 10^{-9} mbar l/s.
La portata di ciascuna linea a servizio di una trappola è, come verrà dettagliatamente descritto al paragrafo 6, di circa 8 *l/h*.

5.2.1 Percorso delle linee ed installazione

Per tutte e 4 le trappole le linee verranno portate dal relativo serbatoio fino alla sommità della volta del tunnel e da qui entreranno nel tunnel stesso attraversando la copertura.
Il passante per l'attraversamento della copertura dovrà essere adeguatamente ricavato nella struttura, senza danneggiare il supporto.
Altresì dovrà essere accuratamente impermeabilizzato onde evitare l'ingresso di acqua dall'esterno. A tal fine si dovranno utilizzare sistemi passa parete adatti alla dimensione dei condotti utilizzati e tali da garantire una corretta impermeabilizzazione. A titolo informativo si faccia riferimento al documento in allegato per maggiori informazioni sul tipo di dispositivo da utilizzare.

Una volta dentro il tunnel la linea dovrà correre parallelamente al tubo da vuoto. Andrà staffata al soffitto o al pavimento, ove possibile, e dovrà avere una pendenza minima dello 0,2% in salita verso il serbatoio, nel tratto a monte della valvola di regolazione; una pendenza minima del 2% in salita verso la trappola, nel tratto a valle della valvola di regolazione. Questo al fine di agevolare il deflusso di gas prodotto all'interno del condotto, lontano dalla valvola di regolazione.

Per maggiori dettagli si faccia riferimento allo schema a blocchi riportato in CT0893-GD-R00.

5.2.2 Schema tipico linea di alimentazione

Lo schema tipico della linea di alimentazione di ciascuna trappola criogenica è riportato in CT0893-PI-R00.

5.2.2.1 Sistema di controllo linee alimentazione

Ciascuna trappola criogenica sarà dotata di un sistema di controllo dell'alimentazione di azoto liquido.
I segnali di controllo dei dispositivi automatici installati sulle linee di alimentazione dovranno interfacciarsi a tale sistema di controllo. In particolare, il sistema di controllo delle trappole controllerà i seguenti dispositivi:

- Valvola di regolazione portata di LN2;
- Valvola automatica di isolamento linea;

I dettagli sul tipo di segnali che questi dispositivi dovranno rendere disponibili saranno definiti successivamente, nella fase di progettazione del sistema di controllo della trappola criogenica.

5.2.2.2 Gruppo di by-pass serbatoio

L'allacciamento delle linee al serbatoio dovrà essere fatto alla linea di prelievo di liquido, prevista sul serbatoio e dotata di una valvola di radice manuale.
A valle di questa valvola andrà previsto un gruppo di by-pass formato da:

- N.1 valvola di isolamento automatica, on/off a comando pneumatico, super isolata sotto vuoto. Posizione normalmente chiusa;
- N.3 valvole criogeniche manuali, super isolate sotto vuoto;
- N.4 valvole di sicurezza per sovrapressione.

Tutto il gruppo by-pass dovrà essere super isolato sotto vuoto, al fine di ridurre i consumi di azoto liquido.
In caso di avaria dell'impianto o di arresto di emergenza, il sistema di controllo interromperà l'alimentazione dell'elettrovalvola di eccitazione provocando la chiusura della valvola di isolamento ed interrompendo il flusso di azoto liquido alla trappola.

5.2.2.3 Linee edificio centrale

Le linee a servizio dell'edificio centrale saranno installate ad una quota suolo inferiore a quella del serbatoio. Il gas generato dall'ebollizione naturale dell'azoto liquido verrà fatto defluire per gravità verso il serbatoio, a monte della valvola di regolazione; verso la trappola, a valle della valvola di regolazione.
Per facilitare l'efflusso le linee dovranno avere un'inclinazione come riportato sullo schema di massima CT0893-GD-R00 foglio 1.

5.2.2.4 Linee edificio torri: ovest e nord

Le linee a servizio degli edifici delle torri, all'estremità nord ed ovest dell'impianto, saranno installate alla stessa quota pavimento del serbatoio. La via di accesso più diretta alla trappola, come già scritto, risulta essere passando per il culmine della volta della zona tunnel.
In questa configurazione la linea dovrà essere munita di un dispositivo di sfogo del gas di ebollizione. In pratica, nel punto più alto della linea, dovrà essere previsto un separatore di fase criogenico il quale, dovrà avere le seguenti caratteristiche principali:

- Materiale X2CrNi 18-9 (1.4307)
- T di progetto -196 °C
- p di progetto 5 bar

- Pressione di esercizio inferiore a 0,5 bar g
- Capienza geometrica minima circa 10 l
- Altezza totale inferiore a 1500 mm
- Attacchi IN/OUT a baionetta di tipo Johnston M/F

Il dispositivo dovrà avere, integrato, un sistema di monitoraggio e controllo del livello di liquido per il mantenimento di un valore costante. Il controllo del dispositivo dovrà essere locale e monitorabile da remoto. Dovrà essere costituito, almeno, da:

- Sensore di livello (mediante misura di delta p o analoga);
- Convertitore elettronico di segnale;
- Uscita On/Off su morsettiera, utilizzabile per il comando di elettrovalvole;
- Un sensore di sicurezza di troppo pieno a riarmo manuale.

Il segnale dello stato del separatore di fase ed il livello di liquido dovranno essere *remotizzati* ed integrati al sistema di controllo delle trappole criogeniche.
Al sistema di controllo della trappola dovranno pervenire i seguenti segnali:

- Valvola di riempimento separatore di fase;
- Livello LN2 nel separatore di fase;

5.2.3 Diametro delle linee di alimentazione

Il flusso di LN2 lungo le linee deve essere il più possibile stratificato al fine di consentire una buona separazione fra la fase liquida e quella gassosa.
A tal fine sono stati condotti dei calcoli per verificare, in funzione della portata di liquido stimata (si veda il paragrafo 6) ed in funzione delle caratteristiche delle linee super isolate sotto vuoto, il regime di efflusso risultante al variare del diametro dei tubi.
In Tabella 2 sono riportati i risultati di questa analisi.

	K	X	Flusso
DN20	1.50E-07	15.1	Stratificato
DN15	2.80E-07	17.13	Stratificato
D18	4.40E-07	14.5	Stratificato
D12	2.80E-07	18	Stratificato

Tabella 2. Analisi del regime di deflusso secondo il modello Taitler-Dukler. Rif. Boiling, condensation and Gas-Liquid Flow, P.B. Whalley.

Dal punto di vista delle perdite di carico delle condotte, l'interesse è quello di mantenerle ad un valore ragionevolmente basso.
Come risulta dai grafici in Figura 8 e Figura 9 le perdite di carico, a fronte delle lunghezze stimate e per le portate in gioco, sono fra loro comparabili al variare del diametro della linea.

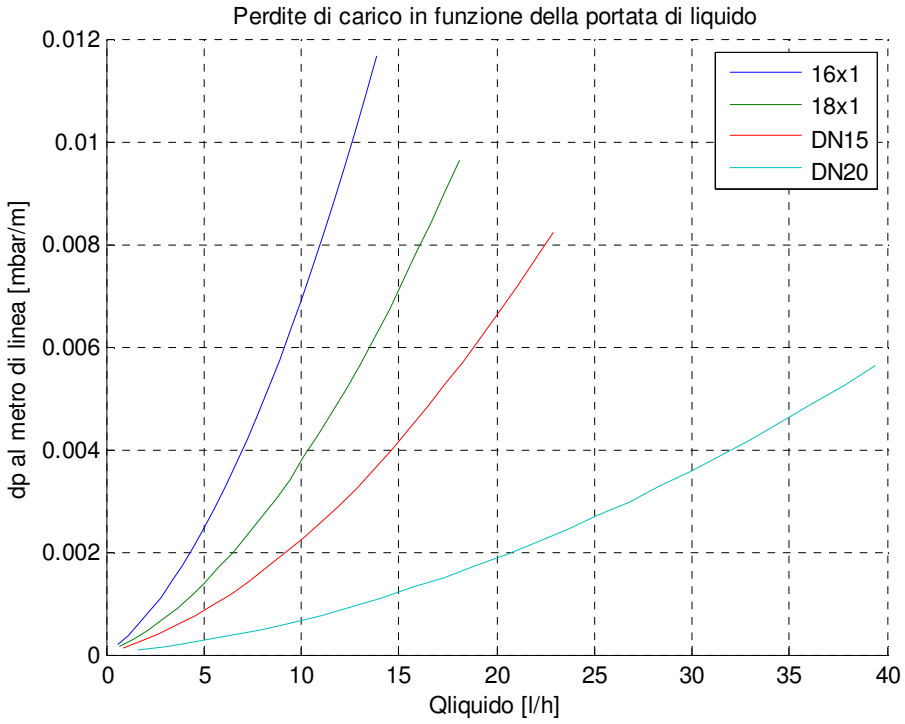

Figura 8. Grafico delle perdite di carico teoriche al metro lineare, in funzione della portata di liquido trasportata ed al variare della taglia della linea, per linee super isolate sotto vuoto standard.

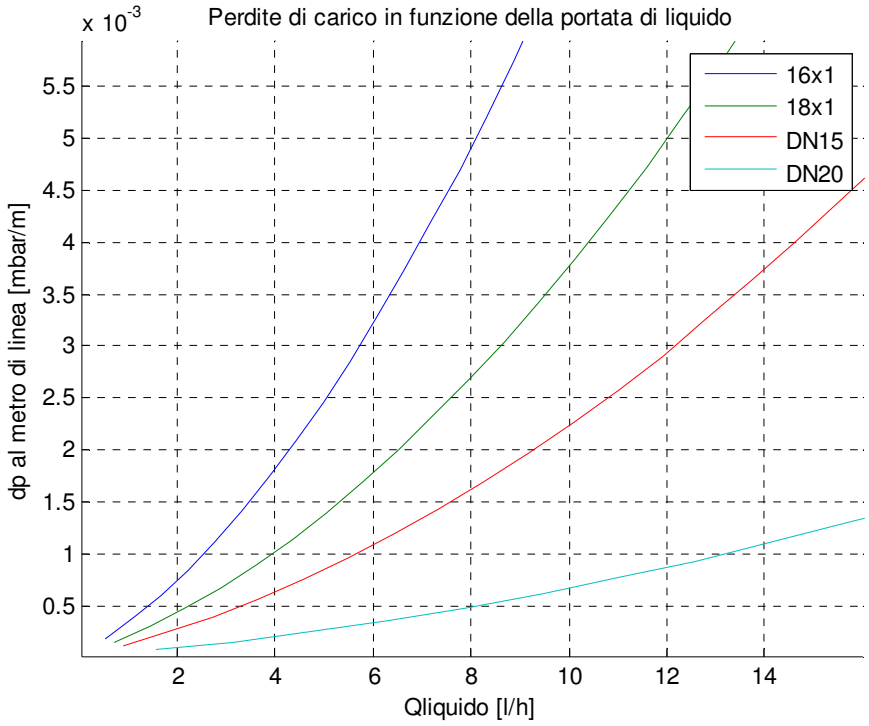

Figura 9. Dettaglio del grafico precedente nella zona a basse portate.

Un confronto fra le possibili soluzioni di una linea DN20, DN15 o D18 è riportata nelle tabelle seguenti.

Linea DN20

dp/m = 5.00E-04 *mbar/m*

						Auto-consumo azoto liquido	
Linea	**L [m]**	**Qtot [W/m]**	**Qgiunto [W/g]**	**Q [W]**	**dp tot [mbar]**	**l/h**	**Ltot 10 anni**
T1_N	54	0.45	2.1	43.20	0.03	1.01	88772
T2_N	22	0.45	2.1	17.60	0.01	0.41	36166
T1_W	52	0.45	2.1	41.60	0.03	0.98	85484
T2_W	22	0.45	2.1	17.60	0.01	0.41	36166
					Totale =	246589	/

Linea DN15

dp/m = 1.60E-03 *mbar/m*

						Auto-consumo azoto liquido	
Linea	**L [m]**	**Qtot [W/m]**	**Qgiunto [W/g]**	**Q [W]**	**dp tot [mbar]**	**l/h**	**Ltot 10 anni**
T1_N	54	0.36	1.7	34.7	0.09	0.81	71388
T2_N	22	0.36	1.7	14.2	0.04	0.33	29084
T1_W	52	0.36	1.7	33.5	0.08	0.78	68744
T2_W	22	0.36	1.7	14.2	0.04	0.33	29084
					Totale =	198299	/

Linea Φ18

dp/m = 2.60E-03 *mbar/m*

						Auto-consumo azoto liquido	
Linea	**L [m]**	**Qtot [W/m]**	**Qgiunto [W/g]**	**Q [W]**	**dp tot [mbar]**	**l/h**	**Ltot 10 anni**
T1_N	54	0.3	1.65	31.1	0.14	0.73	63805
T2_N	22	0.3	1.65	12.7	0.06	0.30	25995
T1_W	52	0.3	1.65	29.9	0.14	0.70	61442
T2_W	22	0.3	1.65	12.7	0.06	0.30	25995
					Totale =	177236	/

Tabella 3. Prospetto dei consumi di azoto liquido e delle perdite di carico per linee super isolate sotto vuoto al variare del diametro della linea. Il consumo di azoto liquido stimato è riferito ad un periodo di funzionamento dell'impianto stimato in 10 anni.

Il compromesso ottimale fra riduzione del consumo e basse perdite di carico si ottiene con la linea DN15.
Infatti, a fronte di un auto-consumo di azoto liquido basso, presenta delle perdite di carico a regime trascurabili a tutto vantaggio dei transitori di raffreddamento dell'impianto.

5.2.4 Condizioni di progetto delle linee di trasferimento

Le condizioni di progetto delle linee DN15 (1/2") dovranno essere almeno pari a quanto riportato con riferimento a linee super isolate sotto vuoto standard:

- Tubo interno Φ 21.3x1.65 mm: ASTM A312 Tp 304
- Tubo esterno Φ 60.3x1.5 mm: AISI 304
- Pressione progetto: 16 bar
- Temperatura di progetto: -196°C
- Pressione di esercizio: 1.5 bar a
- Dispersione termica lineare 0.4 W/m
- Peso lineare 3.7 kg/m

5.3 VALVOLA DI REGOLAZIONE AZOTO LIQUIDO

La valvola di regolazione dovrà essere installata in prossimità della trappola criogenica, come indicato negli schemi tipici CT0893-GD foglio 1 e 2.
Dovrà essere installata nel punto più basso della linea, in modo da permettere il deflusso del gas generato dall'ebollizione dell'azoto verso il serbatoio, da un lato, e verso la trappola, dall'altro.
Dovrà avere le seguenti caratteristiche principali:

Tipo	Valvola di regolazione, super isolata sotto vuoto
Otturatore	lineare
Taglia	DN15
Portata max	15 l/h LN2
Cv	0.15
Pressione di lavoro	0.5 bar g
T progetto	-196 °C
Pressione progetto	16 bar g
Attuatore	pneumatico, doppio effetto
Elettrovalvola	24 V dc

5.3.1 Flash di azoto liquido nella valvola di regolazione

A valle delle valvole di regolazione la trappola opera a pressione atmosferica, maggiorata delle sola contropressione delle linee di scarico e della valvola di non ritorno.
A monte, al contrario, la pressione dell'azoto liquido sarà quella del serbatoio maggiorata del battente idraulico dovuto al dislivello, al netto delle perdite di carico della linea.
Il caso più gravoso, ossia quello per il quale vanno dimensionate le linee di scarico, è quello dell'edificio centrale.
Qui, fra la valvola di regolazione ed il pelo libero del liquido nel serbatoio ci sono, nel caso peggiore, circa 3.3 m + 9 m per un totale di 12 m circa.

Il serbatoio di stoccaggio dovrà lavorare ad una pressione interna massima di 0.5 bar g.
In questa configurazione la pressione dell'azoto liquido a monte della valvola di regolazione, risulta essere:

$$p = p_{battente\ idraulico} + p_{serbatoio} - dp_{linea\ di\ trasferimento} = 12 g \rho_{liq} + 0.5\,10^5 - 0.1\,10^5 = 1.3\ bar\ g$$

L'espansione all'interno della valvola di regolazione può, con buona approssimazione, essere considerato al pari di una laminazione isoentalpica.
Per le velocità del liquido in gioco, che sono dell'ordine del 0.01 m/s, il contributo della velocità nel computo dell'entalpia può essere trascurato.
L'effetto della riduzione della pressione da 1.3 bar g a 0.1 bar g all'interno della trappola comporta la formazione di una miscela con un titolo pari a 0.07 ossia il 7% della massa di gas generata.

La portata nominale è di circa 1.6 g/s che comporta la formazione di 0.12 g/s di gas, pari a 0.080 m³/h di gas.
Tale portata è decisamente inferiore ai 4.5 m³/h di gas generati per evaporazione dal bagno di azoto liquido all'interno della trappola, di conseguenza si può ritenere che l'impatto di questo fenomeno sia trascurabile.
I condotti di scarico del gas, all'interno della trappola criogenica, dovranno essere dimensionati per queste condizioni operative:

Funzionamento nominale	4.5 m³/h di gas a -196°C
Raffreddamento	500 Nm³/h di gas caldo
Riscaldamento e bonifica	415 Nm³/h di gas caldo

Particolare attenzione deve essere rivolta alla fase di raffreddamento della trappola.
In questa fase, con la massa fredda della trappola che si trova a temperatura ambiente, tutto il liquido introdotto all'interno della trappola evapora generando gas caldo. Questa portata deve poter essere smaltita, pena il mancato raffreddamento della trappola a causa della eccessiva riduzione della portata di azoto liquido di raffreddamento.
La portata stimata in questo paragrafo è quella risultate dalla completa evaporazione della portata nominale di LN2 in ingresso alla trappola ed è una stima conservativa, in quanto non tiene conto dei ridotti transitori di raffreddamento cui sarà soggetta la trappola e che potrebbero ridurre questa portata.

5.4 SISTEMA DI PRODUZUIONE GN2 CALDO PER RIGENERAZIONE TRAPPOLE

Per provvedere al riscaldamento delle trappole criogeniche ed alla loro "bonifica" dall'umidità intrappolata, occorre prevedere un dispositivo di erogazione di azoto gassoso caldo.
Si verificano, principalmente, due scenari :

- Riscaldo trappola per 4 giorni a T = 50 °C
- Baking trappola per 4 giorni a T = 150 °C.

Il gas necessario al riscaldo dovrà essere prodotto mediante l'evaporazione di LN2 dal serbatoio di stoccaggio, a mezzo di scambiatori di calore.
Ipotizzando un intervento di *riscaldo* ogni 2 mesi ed un intervento di *baking* all'anno, emerge come sia conveniente dimensionare un sistema con l'ottimo di funzionamento più orientato alla fase di riscaldo.

Riassumendo, i dati della massa fredda della trappola criogenica sono i seguenti:

Materiale	Alluminio
Massa	~ 495 kg
Cp	896 J/kg/°C
Temperatura N2 gas	~10°C

Riscaldo	
Tin gas [°C]	60.0
T trappola [°C]	50.0
Transitorio di riscaldo [h]	6
m [Nm³/h]	415
Pel riscaldatore [kW]	10

Supponendo di scaldare la trappola ad una temperatura "soft" di 50°C, utilizzando un gas alla temperatura più bassa possibile è possibile dimensionare il sistema di riscaldo.
Dimensionando l'impianto per una durata del transitorio di riscaldamento di circa 6 ore, data la temperatura di trattamento della trappola e la temperatura del gas caldo in ingresso, risulta una portata di gas da vaporizzare e surriscaldare di circa 415 Nm³/h ed una potenza del riscaldatore elettrico di circa 10 kW.

Mantenendo la stessa taglia di riscaldatore elettrico e considerando le condizioni operative di *baking* risultano i seguenti dati di dimensionamento:

Baking

Tin gas [°C]	170.0
T trappola [°C]	150.0
Transitorio di riscaldo [h]	22
m [Nm³/h]	170
Pel riscaldatore [kW]	10

Imposta la potenza del riscaldatore elettrico ed il salto termico che deve compiere l'azoto gassoso, risulta fissata la portata erogabile a queste condizioni. Da questa è stato stimato il tempo di messa in temperatura della trappola in circa 22 ore.

Il sistema di vaporizzazione del gas dovrà essere posizionato quanto più vicino possibile al serbatoio di stoccaggio del liquido.
Nel caso delle trappole installate nell'edificio centrale, si potrà sfruttare, per ridurre l'investimento, un unico sistema di vaporizzazione del gas.
Le due trappole verranno riscaldate una dopo l'altra, sfruttando il fatto che, le portate e le potenze necessarie al mantenimento per 4 giorni della temperatura della trappola a 50°C sono notevolmente inferiori a quelle necessarie al transitorio.
Stimando le dissipazioni di calore della trappola a 50°C al valore di circa 1 kW, risulta sufficiente una portata di 50 Nm³/h di azoto gassoso a 60°C, per il mantenimento della temperatura.
I sistemi di surriscaldamento, al contrario, andranno installati il più vicino possibile alle trappole, onde limitare al minimo le dispersioni di calore lungo le tubazioni e limitare l'esigenza di coibentazione.

I consumi di azoto liquido stimati, per il completamento delle operazioni di bonifica sono di seguito riassunti:

Consumo LN2 per riscaldamento a 50°C	3'800 l di liquido
Consumo LN2 per mantenimento a 50°C	1'870 l/giorno
Consumo LN2 per riscaldamento a 150 °C	5'800 l
Consumo LN2 per mantenimento a 150 °C	1'870 l/giorno

5.4.1 Sistema di vaporizzazione in continuo

Il sistema di vaporizzazione ottimale, dato l'uso sporadico che è previsto per il sistema, è quello atmosferico. Questo sistema non richiede alcun apporto di energia primaria per fornire calore al gas da vaporizzare, in quanto sfrutta la convezione naturale con l'aria ambiente.
Purtroppo, però, i vaporizzatori atmosferici non sono in grado di garantire un funzionamento continuo in quanto necessitano, ogni 8-10 ore di funzionamento, di un arresto per lo sbrinamento dei tubi alettati.
Vista l'esigenza della trappola si deve, quindi, ricorrere ad un sistema formato da n.2 scambiatori di calore atmosferici in parallelo, muniti di un sistema automatico di controllo in grado di commutare da una unità all'altra in funzione dello stato di brinatura dei tubi.

Il sistema dovrà essere formato da:

- N.2 vaporizzatori atmosferici da 415 Nm³/h di portata di azoto vaporizzato;
- N.1 valvola criogenica di commutazione a tre vie, a comando pneumatico, da montare all'ingresso del sistema;

- N.1 sistema automatico di controllo che operi la commutazione da un'unità all'altra, sulla base di una temporizzazione e/o di un segnale di temperatura del gas in uscita.

Per maggiori dettagli sullo schema dell'impianto si faccia riferimento al documento allegato CT0893-PI-2.

5.4.1.1 Vaporizzatori atmosferici

I vaporizzatori dovranno essere realizzati secondo le vigenti normative PED con materiali certificati.

I tubi estrusi, i collettori e le curve dovranno essere in anticorodal 6060 T6 UNI EN 537/1 certificati.

La pressione di progetto deve essere almeno pari a 16 bar g.

Le canne estruse dovranno essere lisce internamente per assicurare una buona pulizia interna e diminuire le perdite di carico.

Inoltre i vaporizzatori dovranno essere forniti puliti, sgrassati e tappati per il trasporto, onde evitare la contaminazione delle superfici interne.

Dovranno essere forniti con attacchi completi di flangia, controflangia girevole e bocchello adattabile per la saldatura di tubi commerciali.

Le portate richieste per ciascuno scambiatore dovranno essere garantite per almeno 8 ore di lavoro giornaliere ed 8 di sbrinamento, con una temperatura di uscita del gas non inferiore di 10 °C rispetto alla temperatura ambiente.

Vaporizzatore edificio centrale:

Portata di vaporizzazione	930 Nm³/h
Dimensioni indicative singola unità	1300 x 2200 mm 6000 mm di altezza
Attacchi flangiati IN	DN40
Attacchi flangiati OUT	DN65

Vaporizzatori edifici torri:

Portata di vaporizzazione	415 Nm³/h
Dimensioni indicative singola unità	1300 x 1300 mm 5000 mm di altezza
Attacchi flangiati IN	DN40
Attacchi flangiati OUT	DN40

5.4.1.2 Sistema automatico di commutazione

Il sistema dovrà essere progettato per funzionare in continuo 24/24. La commutazione di unità dovrà essere regolata da un temporizzatore che agisce sulla valvola a tre vie in ingresso azoto liquido. In uscita impianto, sulla linea del gas, dovrà essere montato un sensore di temperatura di sicurezza. Al di sotto di una certa soglia, opportunamente impostata, il sistema dovrà comunque commutare vaporizzatore, forzando il sistema di temporizzazione, al fine di garantire il funzionamento in continuo necessario.

In un secondo tempo, per realizzare un *upgrade* dell'impianto di vaporizzazione, si potrebbero dotare gli scambiatori atmosferici di ventilatori ad aria forzata, montati sulla testa degli scambiatori, per migliorare ulteriormente il coefficiente di scambio termico con l'ambiente.

Si consiglia, per facilità di impiego, di concentrare il quadro elettrico di alimentazione e controllo delle unità di vaporizzazione atmosferiche e quello di alimentazione dei surriscaldatori

in un unico quadro di controllo che consenta di avere tutti i parametri principali di funzionamento a disposizione dell'operatore.

5.4.2 Sistema di surriscaldamento

Il sistema, data la sporadicità di intervento e l'intensità di potenza necessaria, dovrà essere di tipo elettrico a resistenze corazzate in AISI 316 Ti.

Il riscaldatore dovrà essere calcolato per surriscaldare il gas dalla temperatura di 10°C a circa + 60 °C, nel caso di *riscaldo*, e 170°C nel caso di *baking* della trappola criogenica.

Il surriscaldatore dovrà avere le seguenti caratteristiche principali:

Materiali	X2CrNi 18-9 (1.4307) secondo EN10217.
Pressione di progetto	16 bar g
Pressione di esercizio	1.5 bar g
Perdita di carico	< 0.1 bar
Potenza installata	≥ 10 kW
Portata massima	415 Nm³/h
Portata minima	50 Nm³/h
Regolazione	continua in automatico
Sicurezze	* termostato di controllo resistenze per surriscaldamento * flussostato di controllo del flusso

Il sistema dovrà essere dotato di attacchi flangiati e dotato di contro flange, guarnizioni e relativa bulloneria.
Le tubazioni dovranno essere pulite, sgrassate e sigillate per il trasporto, onde evitare danni e sporcamenti accidentali dovuti alla movimentazione.

5.5 LINEA DI SCARICO GN2 EVAPORATO

Il gas prodotto dall'evaporazione dell'azoto liquido all'interno delle trappole criogeniche, dovrà essere convogliato verso l'esterno degli edifici, mediante opportune condotte coibentate.
Si stima una portata di gas di evaporazione di circa 4.5 Nm³*/h*. Attraverso questa linea dovrà essere scaricato all'atmosfera anche il gas utilizzato per il riscaldamento e bonifica delle trappole. La portata necessaria a questo scopo è stimata in 415 Nm³/h.
La linea di scarico andrà, quindi, dimensionata per quest'ultima condizione operativa.

Fluido	Azoto gassoso
Portata massima	415 Nm³/h
Pressione progetto	0.5 bar g
T progetto	-196 / +150 °C
Diametro nominale	DN80
Materiale	X2CrNi 18-9 secondo EN10217
Coibentazione	Lana di roccia o simile, densità 65 kg/m³
Spessore min. coibentazione	80 mm
Perdita di carico massima	20 mbar

A valle della linea di scarico dell'azoto dovrà essere installato uno scambiatore di calore atmosferico, per esempio formato da tubi alettati in alluminio o rame ed avente una superficie di scambio di almeno 4 m². La funzione di questo scambiatore sarà di riscaldare o almeno in parte raffreddare, a seconda della fase operativa in corso, il flusso di gas in uscita fino a temperature prossime alla temperatura ambiente, per motivi di sicurezza.

Lo scarico dello scambiatore atmosferico dovrà, infine, essere munito di una valvola di non ritorno, onde evitare l'ingresso di umidità nel condotto, che pregiudicherebbe il corretto funzionamento a basse temperature.

Nel funzionamento delle trappole in modalità baking, data l'elevata portata di gas in uscita, le superfici dello scambiatore potrebbero raggiungere temperature elevate. Anche la temperatura del gas in uscita sarà comunque superiore ai 50°C. Risulta, quindi, opportuno confinare la zona di scarico all'atmosfera dell'azoto, per motivi di sicurezza.

Infine, sulla linea di scarico dell'evaporato dovrà essere installato un dispositivo di scurezza per il rilevamento di liquido. Tale dispositivo dovrà segnalare l'eventuale fuoriuscita di liquido dalla trappola criogenica, attraverso la linea di scarico gas, indice di un malfunzionamento del sistema. A tale segnale, il sistema di gestione e controllo delle trappole criogeniche dovrà interrompere l'erogazione di azoto chiudendo la valvola di radice del serbatoio di stoccaggio.

6. CONSUMI ED INVENTARIO DI LN2

Al fine di ridurre l'impatto dei rifornimenti di LN2 sull'attività sperimentale dell'interferometro lo stoccaggio di azoto liquido deve essere tale da garantire un'autonomia la più lunga possibile per ciascuna trappola e comunque non inferiore ai 30 gg.
I consumi di ciascuna trappola sono dati da:

- il consumo della trappola stessa a causa degli ingressi di calore dall'esterno della trappola (irraggiamento dalle pareti calde del tubo da vuoto, conduzione attraverso i supporti e conduzione attraverso le interfacce con l'esterno della trappola);
- l'inventario di azoto liquido necessario alla messa a freddo ed al riempimento della trappola;
- il consumo proprio (autoconsumo) delle linee di trasferimento dal serbatoio alla trappola;
- il consumo proprio (autoconsumo) del serbatoio di stoccaggio.

In condizioni di funzionamento nominale i consumi operativi di ciascuna trappola sono stimati come segue:

Pressione di erogazione LN2	1,5 *bar g*
Calore latente LN2	194,2 *kJ/kg*
Densità liquido saturo	790,25 *kg/m³*
Densità vapore saturo	6.64 *kg/m³*
Potenza termica entrante	300 *W*
Massa fredda trappola	495 kg
Portata di reintegro	1,55 *g/s*
Portata LN2 ingresso	7,10 *l/h*
Portata GN2 uscita	4520 *l/h*
Consumo LN2 per messa a freddo	~640 l
Ore di funzionamento in continuo	24 *h/g* x 35 *g/m* = 840 *h*
Inventario stoccaggio	5964 *l/ciclo* di consumo netto
	640 *l* eventuale messa a freddo trappola
	200 *l* inventario liquido trappola

Sulla base dei dati di consumo dei singoli componenti, come descritto nei precedenti paragrafi, l'inventario di azoto necessario al funzionamento delle trappole è il seguente.

	Ed. Centrale	*Torre Nord*	*Torre Ovest*
L linea [m]	106	22	22
Autoconsumo linea [l/g]	38.39	7.97	7.97
Consumo trappola [l/g]	340.8	170.4	170.4
Taglia serbatoio	20000	10000	10000
Autoconsumo serbatoio [l/g]	56	32	32
Periodo rifornimento [gg]	35	35	35
Consumo totale sul periodo [l]	15232	7363	7363
Consumo per messa a freddo [l]	1680	840	840
Totale inventario [l]	18592	9043	9043

Tabella 4. Inventario consumi azoto liquido.

7. INTERFACCIA CON IL SISTEMA DI CONTROLLO

Il sistema di controllo delle trappole criogeniche dovrà gestire le linee di distribuzione dell'azoto liquido ed interfacciarsi con i segnali da queste generati.
In particolare, i segnali generati dai componenti del sistema di distribuzione di azoto si dividono in segnali di controllo e segnali di notifica.

7.1 Segnali di controllo

Sono i segnali di comando che devono essere lanciati dal sistema di controllo per operare i rispettivi componenti del sistema di distribuzione.

Azione	Cond. operativa	Componente
Comando di apertura valvola automatica di radice del serbatoio	Funz. nominale	YY101,YY201,YY301,YY401
Comando di chiusura valvola automatica di radice del serbatoio	Funz. nominale Allarme	YY101,YY201,YY301,YY401
Segnale azionamento valvola di controllo	Funz. nominale	YV102,YV202,YV302,YV402

7.2 Segnali di notifica

Sono i segnali che notificano lo stato di un componente del sistema di distribuzione azoto e sono acquisiti dal sistema di controllo a titolo informativo, al fine di mantenere sotto controllo lo stato del sistema nel corso di ogni fase.

Azione	Cond. operativa	Componente
Indicazione livello separatore di fase	Funz. nominale	LT101,LT201, LT 301, LT 401
Posizione valvola di radice separatore di fase	Funz. nominale	ZSL103, ZSL 203, ZSL 303, ZSL 403
Livello serbatoi di azoto liquido	Funz. nominale	Serbatoi

7.3 Segnali di allarme

Si tratta dei segnali, generati dal sistema di distribuzione di azoto liquido, che derivano da una condizione di funzionamento fuori dai parametri operativi nominali e richiedono l'intervento del sistema di controllo.

Descrizione	Segnale	Azione
Uscita liquido linea di scarico trappole criogeniche	TT101, TT201, TT301 e TT401	Chiusura valvole di radice serbatoi di stoccaggio
Uscita liquido linea di scarico separatori di fase	TT202 e TT402	Chiusura valvole di radice serbatoi di stoccaggio

8. ASPETTI NORMATIVI

I sistemi e le apparecchiature descritte nei precedenti paragrafi dovranno essere progettate, costruite e collaudate in accordo alla Direttiva Europea 97/23/CE relativa ai recipienti a pressione (meglio conosciuta come PED).
Fra le altre direttive e leggi applicabili, si citano:

- Direttiva Europea 97/23/CE (PED) e relativo D.L. n° 93 del 25/02/00
- D.M. 14/01/2008 norme tecniche per le costruzioni
- Direttiva macchine 2006/42/CE

Di seguito un elenco indicativo delle norme tecniche e dei codici applicabili:

- EN13445-3 per la progettazione di recipienti in pressione secondo la PED
- EN12300:2000: pulizia per il servizio criogenico
- EN13458-2:2004: recipienti criogenici
- EN13480-6:2006: tubazioni industriali metalliche
- EN 1251/1 – January 2000 (Cryogenic vessels-Transportable vacuum insulated vessels of not more than 1000 litres volume: Part 1 Fundamental requirements)
- EN 1251/2 – January 2000 (Cryogenic vessels-Transportable vacuum insulated vessels of not more than 1000 litres volume: Part 2 Design, fabrication, inspection and testing)
- EN 1251/3 – January 2000 (Cryogenic vessels-Transportable vacuum insulated vessels of not more than 1000 litres volume: Part 3 Operational requirements)
- UNI EN 1252/1del 31/05/00 (Recipienti criogenici: materiali)
- UNI EN 287 del 30/11/93 (qualifica saldatori)
- UNI EN 288 del 30/11/93 (qualifica procedimenti di saldatura)
- UNI EN 473 del 31/07/93 (personale per prove non distruttive)
- Eurocodici
- Welding Research Council Bullettin 107 Marzo 1979 (carico sui bocchelli – fondi)
- Welding Research Council Bullettin 297 Settembre 1987 (carico sui bocchelli – fasciame)

9. SICUREZZA

Le presenti indicazioni hanno esclusivamente carattere informativo e non sostituiscono le norme e le disposizioni emanate dagli organi istituzionali alle quali occorre in ogni caso fare riferimento per la loro validità di carattere generale.

La sicurezza nell'uso di gas criogenici liquefatti dipende in larga misura dalla conoscenza delle loro proprietà e dal rispetto di semplici precauzioni suggerite dal comune buon senso.
Il personale che dovrà operare ed esercire le apparecchiature descritte nel presente documento dovrà essere adeguatamente formato ed istruito circa i rischi derivanti dall'impiego di sostanze criogeniche.

A tal fine si consiglia l'organizzazione di un corso di addestramento per il personale coinvolto, dal punto di vista della sicurezza e delle norme da seguire nell'uso di tali apparecchiature e dispositivi.

Nel presente capitolo sono riassunte le principali nozioni di sicurezza nell'uso e manipolazione di fluidi criogenici.

9.1 Generalità

Le precauzioni di carattere generale sono legate alle caratteristiche comuni a tutti i gas criogenici liquefatti:

- Temperature estremamente basse
- Sviluppo, per evaporazione, di grandi volumi di gas a partire da piccole quantità di liquido;
- Tendenza all'accumulo dei vapori freddi negli strati più bassi dell'ambiente.

I pericoli più comuni sono:

- L'esposizione della pelle a temperature molto basse può provocare danni simili ad ustioni;
- Un'esposizione prolungata provoca congelamenti;
- L'inalazione dei vapori a bassa temperatura può danneggiare i polmoni;
- Liquidi e vapori criogenici possono produrre lesioni oculari;
- A contatto con superfici molto fredde la cute può aderirvi saldamente per effetto del congelamento delle tracce d'umidità e lacerarsi quando si tenta di staccarla;
- Concentrazioni eccessive riducono la percentuale d'ossigeno nell'ambiente creando pericolo d'asfissia;
- Concentrazioni eccessive d'ossigeno aumentano il pericolo d'incendio anche di sostanze che in aria bruciano con relativa difficoltà.

9.2 Precauzioni generali

- Indossare indumenti protettivi adatti alle basse temperature
- Proteggere gli occhi con una visiera o con occhiali aventi ripari laterali
- Portare sempre i guanti di materiale non assorbente per maneggiare oggetti che siano o che siano stati a contatto con il liquido. I guanti devono essere comodi per poter essere tolti e gettati rapidamente nel caso in cui il liquido vi penetri accidentalmente
- I pantaloni devono essere portati all'esterno delle calzature ed essere privi di "risvolte"
- Se si inserisce un oggetto caldo nel liquido, può verificarsi un'ebollizione tumultuosa con proiezione di schizzi. Tenersi a debita distanza di sicurezza e operare lentamente
- Usare pinze o tenaglie per immergere o estrarre oggetti dal liquido
- Tenere presente che molti materiali resistenti e plastici a temperatura ambiente diventano duri e fragili a bassa temperatura
- Assicurarsi che l'ambiente in cui si opera sia ben ventilato
- Evitare versamenti o dispersioni del liquido
- Non scaricare mai i liquidi in luoghi o ambienti ristretti
- Tenere sempre presente la possibilità di accumulo dei vapori freddi in cunicoli o fosse.

9.3 Primo soccorso

In caso d'infortunio per esposizione al freddo:

- Lavare le parti colpite con abbondante acqua tiepida
- Non esporre a calore diretto

- Se vi sono sintomi di congelamento, lesioni o si temono danni agli occhi, conducete al più presto l'infortunato da un medico. Nel frattempo proteggete le parti colpite con un indumento soffice, asciutto e pulito; evitare di provocare ristagni nella circolazione e mantenere il paziente al caldo e in riposo. Non somministrare bevande alcoliche.

In caso di asfissia:

- Il personale che interviene in un ambiente con scarsità di ossigeno, deve essere munito di autorespiratori o manichette d'aria.
- L'infortunato deve essere trasportato al più presto in un ambiente ad atmosfera normale.
- Se vi è arresto respiratorio occorre praticare la respirazione artificiale e chiamare immediatamente un medico.

9.4 Scheda tecnica dell'azoto

IDENTIFICAZIONE DEL PRODOTTO E DELLA SOCIETA' FORNITRICE
Prodotto: azoto liquido (refrigerato)
Formula chimica: N2

COMPOSIZIONE/INFORMAZIONE SUGLI INGREDIENTI
Sostanza/preparato: Sostanza
Componente/Impurezze: Non contiene altri prodotti e/o impurezze che influenzano la classificazione del prodotto
n. CAS:07727-37-9
n. CEE: 231-783-9

IDENTIFICAZIONE DEI PERICOLI
In alta concentrazione può provocare asfissia.
Gas liquefatto refrigerato. Il contatto con il prodotto può provocare lesioni causate dalla bassa temperatura.

MISURE DI PRIMO SOCCORSO
Inalazione: in alta concentrazione può causare asfissi. I sintomi possono includere perdita di mobilità e/o conoscenza. Le vittime possono non rendersi conto dell'asfissia. Spostare la vittima in zona non contaminata indossando l'autorespiratore. Mantenere il paziente disteso e al caldo. Chiamare un medico.
Procedere alla respirazione artificiale in caso di arresto della respirazione.
Contatto con la pelle e con gli occhi: lavare immediatamente gli occhi con acqua per almeno 15 minuti. In caso di lesioni da bassa temperatura spruzzare con acqua per almeno 15 minuti. Applicare una garza sterile. Procurarsi assistenza medica.
Ingestione: via di esposizione poco probabile.

MISURE ANTINCENDIO
Pericoli specifici: l'esposizione alle fiamme può causare la rottura o l'esplosione del recipiente. Non infiammabile.
Prodotti di combustione pericolosi: Nessuno.
Mezzi di estinzione utilizzabili: si possono usare tutti i mezzi estinguenti conosciuti
Metodi specifici: se possibile arrestare la fuoriuscita di prodotto. Rimuovere il recipiente o raffreddarlo con acqua da posizione protetta. Mezzi di protezione speciali. Usare l'aspiratore in spazi ristretti.

MISURE IN CASO DI FUORIUSCTE ACCIDENTALI DI PRODOTTO
Prodotti individuali: evacuare l'area. Usare indumenti protettivi. Usare l'autorespiratore per entrare nella zona interessata se non è provato che l'atmosfera sia respirabile.

Assicurare una adeguata ventilazione.
Protezioni per l'ambiente: tentare di arrestare la fuoriuscita . Evitarne l'ingresso in fognature, scantinati, scavi e zone dove l'accumulo può essere pericoloso.
Metodi di rimozione del prodotto: ventilare la zona.

MANIPOLAZIONE E STOCCAGGIO
Evitare il rischio di acqua nel contenitore. Non permettere il riflusso del gas nel contenitore. Utilizzare solo apparecchiature specifiche adatte per il prodotto, la pressione e la temperatura di impiego. In caso di dubbi contattare il fornitore del gas. Far riferimento alle istruzioni del fornitore per la manipolazione del contenitore. Mantenere il contenitore sotto i 502° C in zona ben ventilata.

CONTROLLO DELL'ESPOSIZIONE/PROTEZIONE INDIVIDUALE
Protezione personale: assicurare una adeguata ventilazione. Proteggere gli occhi, il viso e la pelle da spruzzi di liquido.

PROPRIETA' FISICHE E CHIMICHE
Peso molecolare: 28
Punto di fusione: -210° C
Punto di ebollizione: -196° C
Temperatura critica: -147° C
Densità relativa gas (aria=1): 0,8
Tensione di vapore a 20° C: non applicabile
Solubilità in CQUA (MG/L): 20
Aspetto: liquido incolore
Odore: non avvertibile dall'odore

Altri dati
Gas/vapore più pesante dell'aria. Può accumularsi in spazi chiusi particolarmente a livello del suolo o al di sotto di esso.

STABILITA' E REATTIVITA'
Stabile in condizioni normali. Fughe di liquido possono causare l'infragilimento delle strutture.

INFORMAZIONI TOSSICOLOGICHE
Generali: Nessun effetto tossicologico conosciuto.

INFORMAZIONI ECOLOGICHE
Generali: può provocare danni alla vegetazione a causa della bassa temperatura.

CONSIDERAZIONI SULLO SMALTIMENTO
Generali: non scaricare dove l'accumulo può essere pericoloso. Contattare il fornitore se si ritengono necessarie istruzioni per l'uso.

INFORMAZIONI SUL TRASPORTO
UN n°: 1977

10. IMPATTO ECONOMICO

Dal punto di vista dell'impatto economico sono state valutate tutte le opzioni più significative, al fine di individuare quella economicamente più vantaggiosa.

10.1 Linee di distribuzione liquido

La tecnologia da impiegare è indubbiamente quella delle linee super isolate sotto vuoto.
Al paragrafo 5.2 sono state descritte le problematiche relative a questo componente.
Dal punto di vista della contabilizzazione economica, la taglia delle linee (fra 18 mm, DN15 e DN 20) e la loro lunghezza (fra 30 o 50 metri a seconda del posizionamento del serbatoio) hanno un'influenza minima sul costo totale dell'investimento e pertanto il criterio di scelta resta solamente quello tecnico, precedentemente illustrato.

Il costo di massima stimato, per la costruzione ed installazione delle linee di adduzione del liquido dai serbatoi alle trappole criogeniche e delle linee di recupero del gas evaporato è riassunto in Tabella 5.

	Edificio centrale	Edificio Nord	Edificio Ovest
Costo simato [€]	€ 78,826	€ 42,119	€ 42,119

Tabella 5. Prospetto costi linee di distribuzione azoto.

10.2 Consumo di azoto liquido

Sulla base delle stime di consumo calcolate nei paragrafi precedenti è possibile fase una stima di massima del costo complessivo di approvvigionamento di azoto liquido per la durata del progetto di 10 anni.
Il costo dell'azoto liquido stimato è pari a 0.094 €/l e rappresenta un prezzo di mercato attuale.
Per la stima dei costi è stato ipotizzato un margine di sicurezza del 10% sul consumo.
I risultati sono riportati in Tabella 6.

	Edificio centrale	Edificio Nord	Edificio Ovest
Costo stimato mensile [€]	€ 1,638	€ 783	€ 783
Costo stimato annuale [€]	€ 19,653	€ 9,394	€ 9,394

Tabella 6. Prospetto stima dei costi di approvvigionamento dell'azoto liquido.

10.3 Serbatoi di stoccaggio

Per i serbatoi di stoccaggio si presentano essenzialmente tre scenari differenti. Un primo scenario prevede l'acquisto di serbatoi super isolati sotto vuoto per lo stoccaggio dell'azoto liquido.
Come illustrato al paragrafo 5.1.3 il risparmio, in termini di prodotto, in virtù del ridotto auto consumo di questa tipologia di serbatoi, non è tale da garantire il ritorno economico nell'arco dei 10 anni dell'investimento fatto. Questa opzione è, comunque, da tenere in considerazione qualora la scala temporale del progetto dovesse mutare.

Il secondo scenario prevede la stipula di un contratto di noleggio dei serbatoi, presso il fornitore dell'azoto liquido. Si tratta di un contratto abituale in uso nell'industria. Comprende, oltre al noleggio dei serbatoi, il contratto di manutenzione e monitoraggio remoto dei serbatoi da parte del fornitore.
Stando ai prezzi che risultano da una prima indagine di mercato, condotta contattando un fornitore di azoto liquido, risulta un costo mensile pari a circa 10'500 €, per questo tipo di contratto.

Il terzo scenario preso in esame contempla l'acquisto da parte del consorzio, di serbatoi di stoccaggio criogenici realizzati con tecnologia standard di isolamento. La differenza di auto-consumo di LN2 è illustrata al paragrafo 5.1.3.

	Standard	Super Isolato
10'000 l	€ 32,450	€ 46,000
20'000 l	€ 46,200	€ 75,000

Tabella 7. Prospetto stima dei costi di serbatoi criogenici, per tipologia.

Nell'ipotesi di acquisto del serbatoio da parte dell'esperimento occorre, inoltre, considerare i costi di manutenzione degli stessi ad opera di personale qualificato. Tale figura può essere inserita dall'esterno o ricavata dalle figure esistenti sul sito e specializzata mediante formazione. Il carico di lavoro per manutenzione dei serbatoi e delle linee di distribuzione è stimato in una settimana al mese di lavoro, per tutta la vita prevista per l'impianto.

Fatte queste premesse, e considerando d'ora in poi solo *l'opzione noleggio* e *l'opzione acquisto serbatoio standard*, si possono fare delle stime di costo complessive per il progetto.

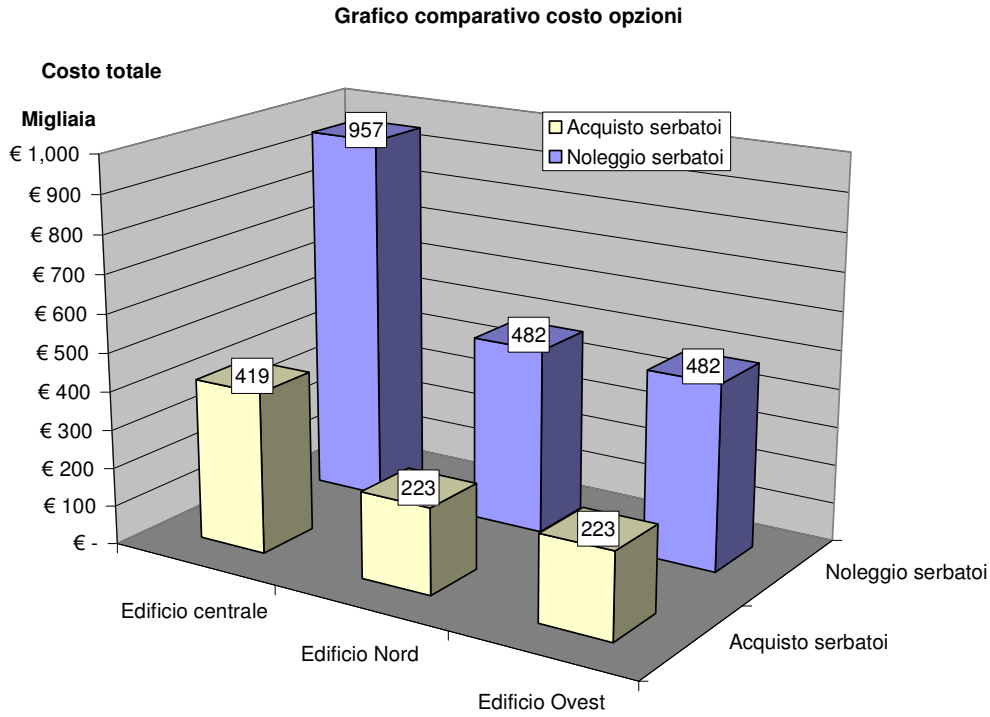

Figura 10. Grafico comparativo dei costi stimati per le due opzioni esaminate: noleggio delle attrezzature vs. acquisto di serbatoi standard, su una scala temporale di 10 anni.

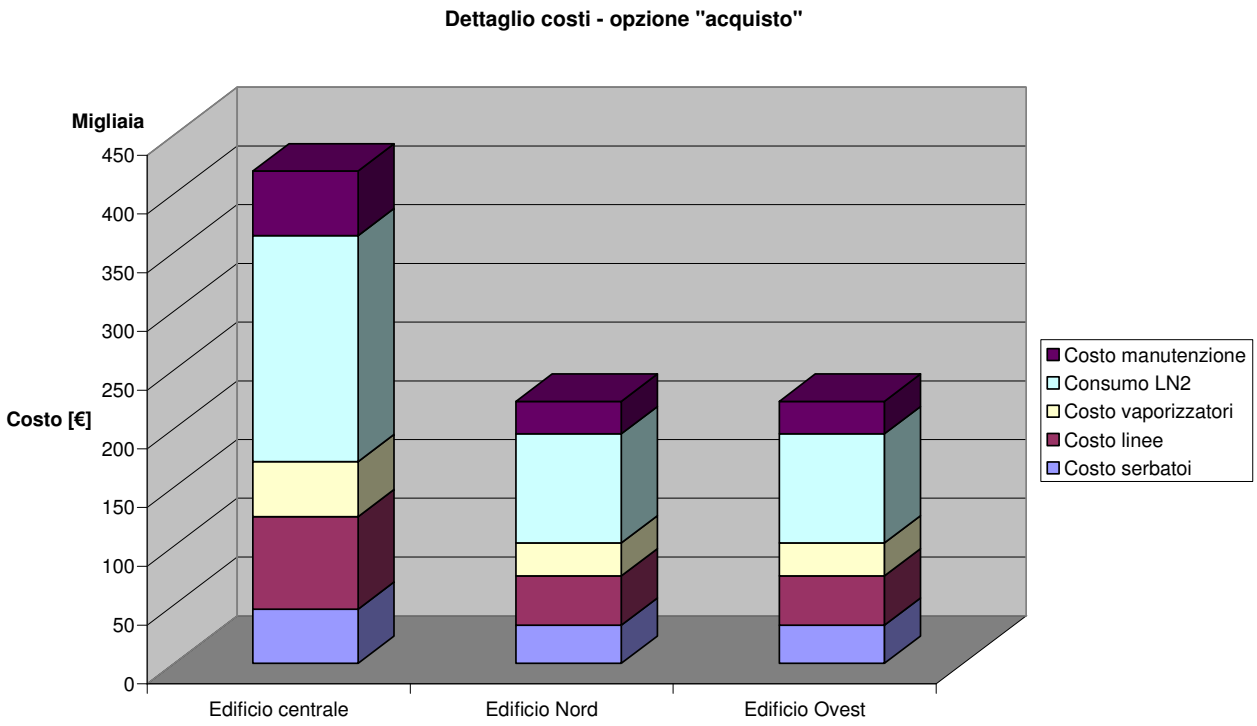

Figura 11. Grafico della ripartizione dei costi, divisi per area, delle infrastrutture e dei servizi necessari all'esperimento, su una scala temporale di 10 anni.

10.4 Alternative

È stato valutato anche l'impiego di soluzioni impiantistiche alternative per lo stoccaggio ed approvvigionamento dell'azoto liquido alle trappole criogeniche. In particolare è stata valutata l'opzione di un refrigeratore, da installare in prossimità di ciascuna trappola, ed in grado di ricondensare l'azoto liquido evaporato.
Questa soluzione permetterebbe di ridurre la taglia, e quindi il costo, dei serbatoi di stoccaggio e consentirebbe la drastica riduzione dei costi di approvvigionamento.

Il costo delle unità di ricondensazione si aggira, come ordine di grandezza, attorno ai 100'000€ l'una. Il costo delle apparecchiature è, quindi, paragonabile al costo stimato per i serbatoi.
La resa di produzione è attorno agli 0.9 kW/l di liquido prodotto. Considerando il rateo di produzione orario ed stimando il costo del kWh elettrico attorno a 0.15 €, risulta che il costo della produzione di azoto liquido è leggermente superiore al suo prezzo di mercato.

Fatte tutte queste considerazioni e considerando che le apparecchiature di ricondensazione sono macchine alternative con un livello di rumorosità attorno ai 60 – 70 dB (A), risulta poco conveniente percorrere questa strada per quanto riguarda l'approvvigionamento dell'azoto.

11. CONCLUSIONI

Il presente documento illustra i risultati della progettazione preliminare di un sistema di distribuzione di azoto liquido per l'alimentazione delle trappole criogeniche del progetto VIRGO. Lo studio ha vagliato le diverse soluzioni tecniche dal punto di vista dell'ottimizzazione dei consumi e delle prestazioni delle linee.

Sono state, inoltre, condotte delle analisi economiche comparative sulle diverse soluzioni tecniche adottabili al fine di individuare quella migliore, alla luce di un impiego del sistema su un arco temporale di 10 anni.

Le linee guida per la realizzazione del sistema di distribuzione e stoccaggio di LN2, che emergono dal presente studio, sono le seguenti:

1. Filosofia di stoccaggio LN2 su 3 serbatoi: uno ciascuno per gli edifici delle torri nord ed ovest ed uno in comune per le trappole dell'edificio centrale;
2. La tipologia del serbatoio più conveniente, su una scala temporale di 10 anni, è quella di un serbatoio coibentato in vuoto standard. L'adozione di serbatoi super isoalti sotto vuoto è da valutarsi, come investimento economico, prevedendo una vita dell'impianto più lunga;
3. L'acquisto dei serbatoi di stoccaggio, dal punto di vista economico, è più conveniente allo stato attuale delle cose, rispetto ad un contratto di locazione e manutenzione stipulato con un fornitore dell'azoto liquido.
4. Le linee di trasferimento dell'azoto liquido dovranno essere super isolate sotto vuoto. Dovranno altresì essere super isolati sotto vuoto: il gruppo di by-pass in allacciamento al serbatoio, la valvola di regolazione del flusso di LN2 nella trappola e l'eventuale separatore di fase (previsto per le zone degli edifici torre nord ed ovest);
5. La linea di scarico del gas evaporato dalla trappola dovrà essere coibentata nel tratto all'interno del tunnel e dovrà terminare con un riscaldatore atmosferico prima dello scarico in aria del gas prodotto;
6. Per la rigenerazione delle trappole è necessario predisporre un sistema di vaporizzazione dell'azoto liquido, seguito da un surriscaldatore elettrico da installare in prossimità della trappola.
7. Il sistema di gestione e controllo delle trappole criogeniche dovrà interfacciarsi alla strumentazione fornita a corredo del sistema di distribuzione e dovrà controllarne il funzionamento, onde evitare la duplicazione di sistemi di controllo che risulterebbero anti economici e complicati da gestire.

12. ALLEGATI

- CT0893-GD-R00: schema tipico alimentazione trappole criogeniche;
- CT0893-PI-R00: P&ID impianto distribuzione LN2;
- CT0893-C01_R00: schema tipico piazzola serbatoio di stoccaggio LN2;
- CT0893-PI-1-R00: P&ID serbatoio stoccaggio azoto liquido;
- CT0893-PI-2-R00: P&ID sistema di vaporizzazione e riscaldo azoto gassoso;
- CT0893-A01-R00: lay-out linea di distribuzione azoto liquido zona torri Nord ed Ovest;
- CT0893-A02-R00: lay-out linea di distribuzione azoto liquido zona edificio centrale;
- Scheda tecnica sistemi passa parete a tenuta stagna, per tubazioni commerciali: rif. doc. "*fpfi*";
- Schema tipico valvola di regolazione criogenica super isolata sotto vuoto: rif. doc. "*2Z3042 SNCG*";
- Pieghevole illustrativo serbatoi criogenici isolati in vuoto con perlite: rif. doc. "*CELINEC3*";