

RAPPORTI TECNICI INGV

Telemetria a basso costo
per liquidi criogenici
(tappo attivo per dewars)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

426

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Mario CASTELLANO (mario.castellano@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Barbara ANGIONI
Tel. +39 06 51860068
redazionecen@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTI TECNICI INGV

Telemetria a basso costo per liquidi criogenici (tappo attivo per dewars)

Low cost telemetry for cryogenic liquids

Adriano Nardi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica

Accettato 15 giugno 2020 | Accepted 15 June 2020

Come citare | How to cite Nardi A., (2020). Telemetria a basso costo per liquidi criogenici (tappo attivo per dewars). Rapp. Tec. INGV, 426: 1-22, <https://doi.org/10.13127/rpt/426>

In copertina Perdita fisiologica nel dewar | Cover Physiological loss in the dewar

426

INDICE

Riassunto	7
Abstract	7
Introduzione	7
1. Il problema	8
2. Lo studio	11
3. La soluzione	12
4. La realizzazione	14
5. Caratteristiche innovative e vantaggi	16
6. Ulteriori sviluppi	17
Ringraziamenti	18
Sitografia	19

Riassunto

Le apparecchiature scientifiche e industriali che per funzionare richiedono un impianto di raffreddamento a bassissima temperatura hanno spesso bisogno di continua manutenzione e del controllo costante del livello del liquido criogenico. Per questo motivo alcuni impianti vengono dotati di sistemi di sorveglianza remota basati su tecnologie realizzate *ad hoc* per le bassissime temperature. Viene presentata una soluzione tecnica brevettata per poter impiegare in condizioni criogeniche un comune sensore a ultrasuoni del costo di 4 euro. Questo tappo per serbatoi dewar, grazie alla sua particolare forma, consente di ottenere questo risultato offrendo di conseguenza la prospettiva di poter impiegare altre tecnologie a basso costo, come i microcontrollori della serie Arduino. Ciò favorisce un'illimitata gamma di sviluppi che vanno dal monitoraggio remoto fino all'automazione totale della manutenzione ordinaria dell'impianto di raffreddamento. Grazie a questa idea è stato realizzato a bassissimo costo un tappo attivo per vasi di Dewar che sorveglia il livello dell'azoto liquido e invia al personale addetto le misure aggiornate in tempo reale, la previsione di intervento per il rabbocco ed eventuali messaggi di allarme. Un semplice upgrade può consentire il rabbocco automatico del liquido nel dewar. Per la sua economicità, questa soluzione può rappresentare anche un'alternativa ai sistemi di raffreddamento e riciclo a circuito chiuso.

Abstract

Those scientific and industrial equipment that require a very low temperature cooling system to operate often require continuous maintenance and constant control of the cryogenic liquid level. For this reason, some plants are equipped with remote surveillance systems based on "ad hoc" developed technologies for very low temperatures. We present a patented technical solution to be able to use, in cryogenic conditions, a common ultrasound sensor that costs 4 euros. This cap for dewar tanks, due to its particular shape, allows to obtain this result. Consequently, it also offers the possibility of being able to use other low-cost technologies, such as the microcontrollers of the Arduino series. This allows an unlimited range of developments ranging from remote monitoring to the total automation of the ordinary maintenance of the cooling system. With this idea an "active cap" for Dewar was created at very low cost. It monitors the level of liquid nitrogen and provides online measurements updated in real time, the forecast of intervention for topping up and any alarm messages. A simple upgrade can allow automatic refilling of the liquid in the dewar. This solution, for inexpensiveness, can also represent an alternative to closed-circuit cooling and recycling systems.

Keywords Soluzione; Telemetria; Criogenico | Low-cost; Telemetry; Criogenic

Introduzione

Viene presentata una soluzione tecnica brevettata per poter impiegare in condizioni criogeniche un comune sensore a ultrasuoni del costo di 4 euro. Grazie a questa idea è stato possibile realizzare a bassissimo costo un tappo attivo per vasi di Dewar che sorveglia il livello di un serbatoio di azoto liquido e invia al personale addetto le misure aggiornate in tempo reale, la previsione di intervento per il rabbocco ed eventuali messaggi di allarme.

L'ipotesi di un monitoraggio remoto per vasi di Dewar e la prospettiva di un rabbocco automatizzato è stata proposta nel 2016. La soluzione con gli ultrasuoni, grazie a questo

particolare tappo per dewars, è stata trovata nel 2017. Ciò è accaduto presso l'INGV dove l'ideatore di questo sistema lavorava come assegnista di ricerca e nasce dall'effettiva esigenza di controllare il livello del liquido criogenico di uno strumento installato in un laboratorio della sezione Roma 2. Il problema consisteva nel fatto che la costosa apparecchiatura scientifica alla quale era dedicato l'impianto criogenico veniva lasciata sempre accesa e correva il rischio di danneggiarsi qualora le fosse mancato il raffreddamento. Inoltre il tasso di evaporazione dal serbatoio dewar varia in funzione delle variazioni di pressione e temperatura esterne e prima di questa applicazione non potevano passare più di due giorni, in qualunque periodo dell'anno, senza che un operatore dovesse controllare il livello sul posto mediante un'asta graduata. Questa stessa azione tuttavia riduceva progressivamente l'autonomia del serbatoio. Tutto ciò finché l'ultimo operatore dell'asta graduata non ha trovato il modo di far sopravvivere in un'atmosfera extraterrestre un comune sensore di prossimità per temperatura ambiente e quindi, aggiungendo un po' di elettronica e di programmazione, ha realizzato un automatismo a bassissimo costo. Grazie a questa soluzione l'autonomia dello stesso impianto è aumentata fin quasi a una settimana, nell'arco della quale l'operatore può prevenire il suo intervento di rabbocco perché il tappo rilevatore misura continuamente il livello del liquido e prevede la data e l'ora in cui è necessaria la manutenzione. Segnala sul posto sia visivamente che acusticamente la necessità di effettuare il rabbocco e trasmette in rete telemetria, statistiche e previsioni. Un ulteriore sviluppo, che implementa soltanto un'elettrovalvola, può rendere possibile anche il rabbocco automatico del liquido nel dewar. La centralina di controllo contenuta nel tappo può effettuare automaticamente l'ordinazione periodica del liquido criogenico dal fornitore, eseguendo l'ordinaria procedura via e-mail. Con questo upgrade lo stesso impianto può estendere l'autonomia fino a un mese, rendendo obsoleta la figura di un addetto che non può allontanarsi dalla macchina. Spero che questo rapporto tecnico possa essere utile a risolvere analoghi problemi di gestione di personale qualificato negli impianti criogenici di altri laboratori.

Lo sfruttamento commerciale della soluzione tecnica che viene presentata è tutelato dal brevetto N.102018000003588, depositato il 15/03/2018 con il titolo: "Tappo per vasi di Dewar utilizzante sensori a ultrasuoni per il monitoraggio del livello di liquidi criogenici, e relativo sistema criogenico". Inventore: Adriano Nardi. Titolare: INGV. Stiamo sviluppando varianti per differenti strumentazioni con serbatoi dedicati (es.: spettrometro di massa, microscopio elettronico ad emissione di campo, microsonda elettronica). Per informazioni relative all'acquisto di un prodotto specifico o di supporto nella produzione di sistemi, concordando un contratto di licensing del brevetto, si può contattare l'Unità Trasferimento Tecnologico Brevetti e Spin-off dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: dr. Antonio Caramelli (antonio.caramelli@ingv.it).

1. Il problema

Un "vaso di Dewar" (o semplicemente dewar) è un vaso che mantiene il suo contenuto termicamente isolato dall'ambiente esterno grazie a un'intercapedine in cui è mantenuto il vuoto. Il vuoto è usato solo per l'isolamento termico. Il contenuto non è sotto vuoto (figura 1).

I dewar sono spesso usati per immagazzinare sostanze liquide che diventerebbero gassose alla temperatura ambiente, come azoto, elio, argon, anidride carbonica, ossigeno, ammoniaca o particolari miscele per impieghi specifici. Per questi liquidi il progressivo aumento di temperatura all'interno del contenitore dà luogo ad ebollizione, perciò solitamente il contenitore non è pressurizzato ma dotato di un tappo semplicemente appoggiato alla sua imboccatura. Il tappo, generalmente a forma di fungo e realizzato in materiale isolante, è inserito nel collo del vaso e si appoggia con la sola forza del suo stesso peso. Alla minima pressione interna lascia sfiatare il gas di evaporazione, che si disperde nell'ambiente circostante.



Figura 1 Vaso di Dewar visto in sezione e nel suo aspetto esteriore. In basso il suo tipico tappo a forma di fungo.

Figure 1 Section view and exterior view of a Dewar flask. Below you can see its typical mushroom-shaped cap.

Per questo motivo il contenuto del dewar, anche se lentamente, si riduce progressivamente di livello e questo rende necessario un sistematico controllo, specialmente quando si tratta del serbatoio di un liquido criogenico che deve garantire la funzionalità di qualche dispositivo. In questo caso il livello va mantenuto sempre entro un determinato intervallo per non scoprire i tubi di raffreddamento. La misura del livello si può effettuare manualmente inserendo un'asta graduata attraverso il collo del vaso. Il contatto dell'asta a temperatura ambiente con il liquido a bassissima temperatura causa un'improvvisa ebollizione segnalando l'avvenuto contatto con il livello del liquido. Questo metodo manuale fornisce misure poco precise e riduce la durata di conservazione del contenuto, sia a causa delle perdite immediate per ebollizione che a causa dello sbalzo di temperatura nel microclima interno, prodotto anche soltanto dall'apertura del tappo. Avviene infatti un risucchio di aria ambientale all'interno del dewar ogni qualvolta il lungo cilindro isolante del tappo viene sfilato dal collo del vaso e poi di nuovo parte dell'atmosfera interna sarà spinta fuori a mo' di pistone quando, alla chiusura del tappo, il cilindro verrà reinserito nel collo (figura 2).

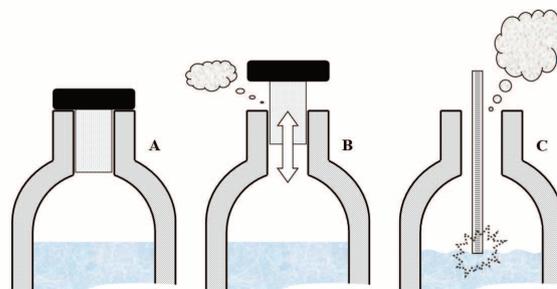


Figura 2 Perdita fisiologica nel dewar. Il tipico tappo del dewar è inserito nel collo della bottiglia e chiude il vaso sotto la forza del suo stesso peso (A). All'interno il liquido evapora lentamente in equilibrio con il gas. La pressione del vapore solleva lievemente il tappo consentendone la degassazione. Ogni apertura del tappo causa, per effetto pistone, prima l'ingresso di aria a temperatura ambiente e poi la fuoriuscita della fredda atmosfera interna, alterando la stabilità del microclima (B). La misura del livello del liquido, tramite un'asta graduata a temperatura ambiente, causa l'istantanea ebollizione del liquido con cui viene a contatto, disperdendo velocemente il contenuto del vaso nell'ambiente esterno (C).

Figure 2 Physiological loss in the dewar. The cap of the dewar closes the vessel under the force of its own weight (A). Inside, the liquid evaporates slowly. The steam pressure slightly raises the cap allowing it to degass. Each opening of the cap initially causes the entry of air at room temperature and subsequently the release of the internal atmosphere (B). This operation compromises the stability of the microclimate. The liquid level is measured using a graduated rod. This operation causes the instant boiling of the liquid with which the rod comes into contact (C). Consequently, the content of the vessel quickly disperses into the external environment.

Qui abbiamo il nocciolo della questione. Il tasso di evaporazione di un vaso di Dewar può variare secondo il modello e le dimensioni da 1 a 0,1 l/giorno. Un vaso di raffreddamento, essendo collegato all'apparecchiatura da raffreddare, avrà un tasso più alto. Inoltre il tasso non sarà mai costante ma varia nel tempo con la stagione (a causa della temperatura ambientale), con i mutamenti meteorologici (anche a causa della pressione atmosferica) e con la semplice variazione della quantità di sostanza conservata (a causa della capacità termica). Ciò rende indispensabile la verifica periodica con l'asta graduata ma la verifica stessa incide pesantemente sul tasso di evaporazione. L'alternativa all'asta graduata non è semplice. La sensoristica reperibile sul mercato è per la maggior parte inadeguata alle bassissime temperature oppure presenta costi molto elevati. Ecco una panoramica delle possibilità, suddivisa in tre tipologie di misura:

1. Misure dall'esterno. L'involucro esterno del dewar, tipicamente metallico, e la sua intercapedine a vuoto non consentono di effettuare sondaggi dall'esterno con misure di tipo capacitivo o a ultrasuoni. Inoltre i serbatoi di raffreddamento sono quasi sempre solidali allo strumento raffreddato e questo impedisce l'impiego di una semplice bilancia per valutare l'autonomia in termini di perdita di peso.
2. Misure interne senza contatto. Per definizione sono considerati liquidi criogenici quelli che hanno una temperatura di ebollizione inferiore a -73°C . A queste temperature sia il liquido che il gas di evaporazione che satura l'interno del dewar non consentono l'impiego delle comuni tecnologie elettroniche per la misura "contactless" delle distanze (tipo ultrasuoni o infrarossi) in cui sensori e/o elettronica devono necessariamente essere immersi almeno nel gas. Inoltre si incontrano altri svantaggi: i misuratori laser hanno un'alta precisione anche a grande distanza ma non consentono misure alla breve distanza richiesta ($< 50\text{ cm}$). I sensori radar, oltre al problema della distanza, possono trasmettere calore all'interno anche soltanto per conduzione termica attraverso l'antenna. Sono inoltre molto più costosi della soluzione qui proposta.
3. Misure interne a contatto diretto. L'alternativa che resta è la misura diretta con sonde ad immersione ma anche questo approccio richiede tecnologie *ad hoc*. Va considerato inoltre che un liquido di comune utilità come l'Azoto (usato nei test del prototipo in esame) essendo elettricamente isolante esclude perfino la possibilità d'impiego di resistenze ad immersione. Ciò che si trova attualmente sul mercato sono lunghi sensori ad immersione per bassissime temperature basati sulla variazione della capacità misurata tra due tubi immersi nel liquido (variazione nel dielettrico). Ciò è poco pratico in un tappo che deve essere aperto per effettuare il rabbocco. Altri tentativi basati sulla differenza di pressione hanno noti inconvenienti (es. perdita di liquido) dovuti alla minuscola sezione dei tubi. Altri sistemi si basano su galleggianti. Il tipo più semplice è quello usato per monitorare i vasi in pressione (non i dewar) dove è richiesta una minima escursione (tipo 1 cm) per segnalare semplicemente la perdita del livello standard. Alcuni dispositivi si basano sulla misura dell'escursione di un galleggiante con tecnologia realizzata *ad hoc* per bassissime temperature.

L'ultima alternativa all'asta graduata è un'alternativa all'intero sistema di raffreddamento "aperto". Si tratterebbe di sostituire il dewar con uno speciale tipo di serbatoio criogenico a circuito chiuso che è in grado di ricondensare al suo interno il gas evaporato. A questo punto non sarà più necessario il rabbocco del liquido per almeno un anno. Da qualche tempo questo sistema è commercializzato anche in Italia al costo di diverse decine di migliaia di euro ma ora non è più l'unica alternativa a una manutenzione continua dell'impianto.

2. Lo studio

La sperimentazione che ha dato origine alla configurazione di questo speciale tappo è stata eseguita su un dewar contenente 40 litri di azoto, il liquido criogenico più comune perché inerte. La temperatura massima del liquido (punto di ebollizione) è di $-195,82^{\circ}\text{C}$. La temperatura del gas nel dewar all'inizio del collo (sotto il tappo) è risultata mantenersi più o meno costantemente intorno ai -70°C .

I sensori a ultrasuoni comunemente reperibili sul mercato, come ad esempio il sonar HC-SR04 (figura 3), tipicamente impiegato sui microcontrollori Arduino, hanno range e precisione di misura perfettamente idonei ma lavorano solamente a temperatura ambiente. Talvolta gli stessi sensori vengono venduti dichiarando una temperatura minima di esercizio di -20°C .

I numerosi test eseguiti sul dewar, con sonar simili di diversa fabbricazione, hanno dimostrato che posizionando il sensore alla base del tappo, dopo 10 minuti circa la misura si blocca su un numero fisso. Posizionando il sensore in cima al tappo, fuori dal collo del dewar, praticando due canali nel tappo isolante, i sensori si bloccano dopo circa 30 minuti. Separando le capsule a ultrasuoni dall'elettronica (contiene tra l'altro il cristallo oscillatore), posizionando le capsule alla base del tappo e l'elettronica fuori dal tappo, il risultato non cambia molto: entro 20 minuti la misura si blocca, se pur su un valore diverso. Si è tentato infine di effettuare misure con i sensori all'esterno e riempiendo i canali di comunicazione con un materiale isolante al calore se pur trasmissivo per la radiazione acustica (es. lana di vetro). Tutti i tentativi sono falliti anche perché sono proprio le caratteristiche che in genere rendono un materiale termicamente isolante a renderlo se non proprio fonoisolante almeno fonoassorbente.

Bisogna considerare che l'elettronica si può proteggere mentre le capsule che emettono il segnale ultrasonico devono necessariamente essere immerse nel gas ma hanno una meccanica della quale va preservata la rigidità come se lavorassero a temperatura ambiente.

Il malfunzionamento è dovuto al gas in pressione che, dovendo fuoriuscire, attraversa i canali di comunicazione con i sensori e in ogni caso avvolge le loro membrane. Inoltre il tappo appesantito da elettronica e cavi non può più svolgere la sua funzione di degassazione lenta e il gas a bassa temperatura tende ad attraversare i sensori per fuoriuscire. La figura 4 illustra schematicamente i vari tentativi che non hanno avuto successo.

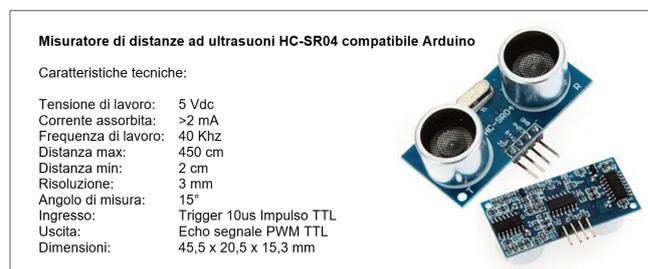


Figura 3 Il tipico sensore sonar a ultrasuoni compatibile con Arduino.

Figure 3 Typical Arduino compatible ultrasonic sonar sensor.

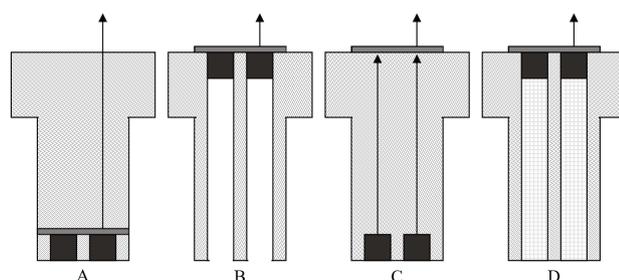


Figura 4 Diversi tentativi di impiegare il sensore HC-SR04 nel tappo del dewar non hanno avuto successo perché risentono della temperatura troppo bassa. La sagoma chiara è la sezione del tipico tappo isolante per vasi di Dewar. I quadrati neri rappresentano le capsule a ultrasuoni e la piastra scura rappresenta la scheda elettronica del sensore. Tentativi caratteristici: sensore alla base del tappo (A); sensore fuori dal tappo attraverso due canali aperti (B); sensore diviso con capsule alla base ed elettronica fuori dal tappo (C); sensore fuori dal tappo con canali riempiti di isolante termico acusticamente conduttore (D).

Figure 4 Attempts to use the HC-SR04 sensor in the cap of the dewar were unsuccessful. The sensor is affected by too low temperature. The clear shape is the section of the typical insulating cap for Dewar flask. The black squares represent the ultrasonic capsules and the dark plate represents the electronic board. The characteristic attempts are these: sensor at the base of the cap (A); sensor out of the cap, through two open channels (B); split sensor with capsules at the base and electronics outside the cap (C); sensor outside the cap and channels filled with a thermal insulator which is acoustically conductive (D).

3. La soluzione

È stata infine trovata una soluzione estremamente semplice e funzionale nel favorire il mantenimento di un microclima costante nei canali dei sensori, creando un condotto di sfogo per il gas freddo con uno sfiato che lo libera ad un livello più basso dei sensori.

I numerosi test hanno stabilito che questo livello deve mantenersi almeno 4 cm al di sotto dei sensori. Il gas di azoto è reso più pesante dell'aria dalla sua bassissima temperatura e in queste condizioni trabocca dallo sfiato per ricadere in basso e non penetra ulteriormente nei condotti riservati agli ultrasuoni (viene a mancare il flusso nei condotti). Il tappo è stato quindi reso aderente ed "avvolgente" rispetto al collo del dewar, in modo da avere la stabilità necessaria per fungere da supporto e contenitore di tutta la tecnologia accessoria, mentre la circolazione del gas è necessariamente forzata nell'apposito condotto.

Il diametro del condotto di sfogo deve essere paragonabile all'area interstiziale di un tappo originario. In sostituzione di un tappo originario dal diametro di 6 cm, è stato verificato sperimentalmente che un condotto di sfogo di 3 mm di diametro mantiene immutato il tasso di evaporazione dell'azoto liquido (circa 4 cm al giorno) senza accumulare pressione. Anche in caso di applicazione al limite delle specifiche di un dewar (es. pressione di esercizio di 1,5 atm), l'importante sarà assicurare il fissaggio del tappo e mantenere il tasso di evaporazione originale attraverso il condotto forzato.

Con questa semplice soluzione (figura 5) si rende possibile effettuare misure impiegando un comune sensore dal costo irrisorio e compatibile con i più diffusi microcontrollori e microprocessori (es. Arduino o Raspberry) e questo favorisce una vasta gamma di *performances* a basso costo che il tappo attivo può offrire:

- monitoraggio remoto del livello;
- statistiche e previsione della necessità di rabbocco;
- allarme di superamento soglia;
- rabbocco automatico.

La configurazione con tappo avvolgente è anche particolarmente adatta a supportare, attraverso un apposito foro passante, un tubo di rame proveniente da un impianto per rabbocco automatico dotato di un'elettrovalvola. In questo caso il tappo non avrà più bisogno di essere aperto (figura 6).

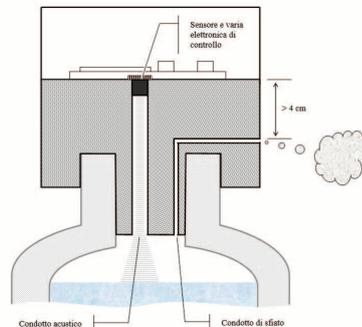


Figura 5 Il tappo è costruito in materiale termicamente isolante (nel prototipo polistirene estruso). Si appoggia al collo del dewar in modo aderente e avvolgente fungendo anche da base e scatola per l'elettronica di controllo. Il condotto di sfiato deve restare almeno 4 cm al di sotto della base dei sensori (nel prototipo 6 cm) e il diametro deve essere equivalente all'area di gioco del tappo originale (nel prototipo 3 mm).

Figure 5 The cap is made of thermally insulating material (eg polystyrene). The cap rests on the dewar in a snug and enveloping way, also acting as a base and box for the control electronics. The vent duct must remain at least 4 cm below the sensor base. The section of the duct must be equivalent to the play area of the original cap.

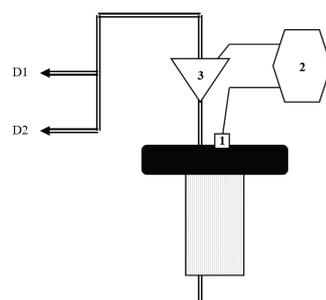


Figura 6 Automazione con elettrovalvola: una o più bombole a pressione (D1, D2) rabboccano il liquido nel serbatoio dewar attraverso il tappo chiuso quando una elettrovalvola (3) viene aperta dalla centralina (2) che controlla il livello del liquido attraverso il sensore (1) montato nel tappo.

Figure 6 Automation with solenoid valve. One or more pressure cylinders (D1, D2) can top up the liquid in the dewar flask through the cap. A solenoid valve (3) is opened by the control unit (2) which controls the liquid level through the sensor (1) mounted in the cap.

4. La realizzazione

Il prototipo è stato realizzato in polistirene estruso. Questo materiale ha un isolamento termico equivalente al polistirolo espanso del tappo originale del dewar ma si presta meglio ad essere lavorato e levigato con strumenti da taglio (tornio, taglierino, carta vetrata, mole per multiutensili elettrici). Il corpo isolante con le sue varie scanalature e i vari incassi per contenere l'elettronica (figura 7) è stato inserito all'interno di una struttura di plastica, dotata di maniglie, che funge da contenitore. Questa struttura è stata progettata per essere assemblata in pochi semplici pezzi realizzati con stampante 3D (figura 8).

Questo oggetto contiene all'interno tutta l'elettronica necessaria per svolgere ciascuna delle funzioni richieste alloggiando una unità di controllo Arduino Yùn opportunamente programmata e corredata anche di una termocoppia e un altoparlante. Naturalmente qualunque microcontrollore della serie Arduino è adatto a gestire la misura, la previsione e l'allarme. Per massimizzare le prestazioni del prototipo è stato scelto però il modello Yùn che è dotato anche di un microprocessore su cui gira una versione semplificata di Linux che è già provvista di un webserver. Inoltre il microcontrollore può essere programmato direttamente da Wi-Fi. Questo semplifica molte operazioni, tra cui la possibilità di diffondere i dati in WEB. Il prototipo (figura 8) è dimensionato per un sensore a ultrasuoni modello HC-SR04 su un vaso di dewar da 30 litri della ORTEC con diametro interno al collo di circa 6 cm (per la precisione trattasi del serbatoio di liquido criogenico di uno spettrometro di massa).

Il tappo costruito in questo modo consente il perfetto funzionamento del sensore a ultrasuoni e risulta in grado di misurare nel range richiesto (19-40 cm) il livello del liquido con una stabilità di misura di +/- 1 mm. La misura è continua e la centralina di controllo fornisce una serie di allarmi acustici per suggerire la necessità del rabbocco al raggiungimento del livello di attenzione, intimare l'urgenza di rabbocco in prossimità del livello limite o dare l'allarme qualora non fosse stato effettuato il rabbocco entro il limite di sicurezza. Inoltre tutti i dati telemetrici e la previsione dell'autonomia residua prima della necessità di un intervento di rabbocco vengono trasmessi continuamente in rete. Queste informazioni sono accessibili da un PC remoto attraverso la consolle IDE di Arduino (figura 9) o anche semplicemente su smartphone, attraverso una pagina WEB.



Figura 7 Corpo isolante. In primo piano si vede il vecchio tappo originale appoggiato (capovolto) sulla maniglia del dewar. Dietro c'è il corpo isolante del nuovo tappo avvolgente già inserito sull'imboccatura del dewar. Sopra si vede l'elettronica di controllo (Arduino Yùn) con il piccolo altoparlante per l'allarme in sito.

Figure 7 Insulating body. In the foreground you can see (upside down) the old original cap resting on the handle of the dewar. Behind it you can see the insulating body of the new cap already inserted on the dewar. Above you can see the control electronics (Arduino Yùn) with the small loudspeaker for the on-site alarm.



Figura 8 Prototipo in funzione. Durante il normale stato di conservazione del liquido il tappo emettere un “click” a intervalli regolari che indica l'avvio di un ciclo di 20 misure. Al termine di ogni ciclo viene calcolata la previsione del tempo mancante alla necessità di un rabbocco del liquido. Naturalmente era possibile impiegare qualsiasi tipo di display, ma per rendere il prodotto semplice e minimalista lo stato di allerta è stato espresso con un “semaforo” a tre led luminosi (visibili nella foto sulla superficie superiore). La luce verde lampeggia ciclicamente indicando il numero di giorni di autonomia rimanenti. La luce gialla si accende permanentemente in sostituzione della verde da quando mancano 24 ore alla necessità di effettuare il rabbocco. La luce rossa si accende quando l'azoto liquido raggiunge il livello di attenzione e si rende necessario eseguire il rabbocco del liquido. Da questo momento suona un allarme bitonale e resteranno ancora 24 ore per intervenire. Trascorso questo tempo, il liquido avrà raggiunto il livello critico, segnalato da un suono costante di tono basso e dal lampeggio simultaneo di tutti e tre i LED. Questa circostanza indica lo stato di allarme irreversibile. La telemetria completa e la previsione di data e ora limite per l'intervento di rabbocco del liquido vengono continuamente trasmesse in rete.

Figure 8 Prototype in operation. At the end of each cycle of 20 measurements, the control unit calculates the time left to top up the liquid. The complete telemetry and the forecast of the date and time limit for the liquid topping up are continuously transmitted on the network. In the realization shown in the figure, the alert state was also expressed with a “traffic light” with three luminous LEDs. The green light flashes cyclically indicating the number of days of autonomy remaining. When there are 24 hours before the need to top up, the yellow light turns on permanently to replace the green one. The red light turns on when the liquid nitrogen reaches the warning level and it is necessary to top up the liquid. From this moment on, a two-tone alarm sounds and there are still 24 hours left to intervene. After this time has also elapsed, a constant low tone sound and the simultaneous flashing of all three LEDs indicate that the liquid has reached the critical level. This signal indicates the irreversible alarm status.

```
* RILEVAMENTO:
Lunedì 4/9/2017 alle 16:29:29
Temperatura ambientale: 23.9 °C
Livello dell'Azoto Liquido: 12.0 cm
Misura dall'orlo: 30.0 cm
Restano quasi 12 litri su circa 23.

* PREVISIONE:
il rabbocco va fatto entro 3.1 giorni,
cioè giovedì 7 settembre entro le ore 19 (circa).
```

Figura 9 Il rapporto di telemetria ricevuto da un PC remoto collegato su interfaccia IDE. In alto gli ultimi dati telemetrici rilevati. Notare che la temperatura interna al tappo, rilevata vicino alla basetta del sensore ultrasonico, è compatibile con qualsiasi elettronica. In basso la previsione riguardo la necessità del rabbocco. Si aggiorna continuamente in base alla serie temporale acquisita.

Figure 9 Telemetry report received from a remote PC connected via IDE interface. At the top you can see the last telemetry data detected. Note that the internal temperature, detected near the ultrasonic sensor base, is compatible with any electronics. Below you can read the forecast regarding the need for topping up. This report is continuously updated with each cycle of acquired measurements.

5. Caratteristiche innovative e vantaggi

Questo “tappo attivo” per vasi di Dewar consente di misurare il livello di un liquido criogenico con alta precisione e affidabilità, impiegando tecnologia a basso costo perché ha reso utilizzabile un comune sensore a ultrasuoni per temperatura ambiente che è compatibile con i più comuni microcontrollori. Permette però anche l'impiego di altri sensori “contactless” (il tipo “2” tra quelli elencati al capitolo 1) come ad esempio infrarossi e laser, con un costo già per questo ridottissimo rispetto alle soluzioni già presenti sul mercato che impiegano sonde ad immersione (tipo “3”). Inoltre tutta la tipologia “2” offre una maggiore semplicità e praticità d'impiego, non occupando spazio all'interno del dewar.

Confronto con il comune tappo da vaso di Dewar:

- l'isolamento termico e la tenuta del gas, quindi il tasso di evaporazione del liquido, non cambiano rispetto a un tipico tappo da dewar;
- il costo medio del corpo isolante non cambia rispetto al tipico tappo da dewar;
- preserva il funzionamento di comuni sensori di misura a distanza (es. a ultrasuoni) consentendone l'impiego nell'ambiente del dewar;
- consente di effettuare misure del livello del liquido criogenico con tecnologie a basso costo per applicazioni che vanno dal monitoraggio/allarme al rabbocco automatizzato.

Operatività del prototipo attuale:

4. rileva il livello del liquido criogenico con precisione millimetrica;
5. misura la temperatura all'interno del dewar;
6. prevede la data e l'ora limite per effettuare il rabbocco;
7. avvisa acusticamente il raggiungimento dei livelli critici;
8. segnala visivamente i giorni mancanti al rabbocco;
9. trasmette online telemetria e previsioni su interfaccia IDE o pagina WEB.

Possibilità di ulteriore sviluppo:

1. avviso via SMS della necessità di manutenzione (rabbocco del liquido o verifica anomalie);
2. inoltro automatico via e-mail dell'ordine di rifornimento del liquido criogenico;
3. rabbocco automatico senza operatore (con l'aggiunta di elettrovalvole e dewar di supporto).

Vantaggi rispetto agli altri sistemi di misura:

1. basso costo di base e vaste prospettive di ampliamento *low cost* grazie alla compatibilità con i microcontrollori della serie Arduino;
2. rispetto all'asta graduata, la misura a ultrasuoni avviene senza contatto e senza l'apertura del tappo, quindi in modalità massimamente conservativa nei confronti del contenuto del dewar;
3. rispetto alle sonde ad immersione, l'uso del tappo a ultrasuoni ha il vantaggio di poter fornire misure medie più stabili anche durante il rabbocco del liquido (cosa difficilmente ottenibile con galleggianti o condensatori) aprendo la strada ad ulteriori prospettive di automazione grazie alle quali non sarà più richiesta l'assistenza umana se non per il rifornimento saltuario della scorta di liquido criogenico.

Qualche esempio dei più comuni sensori impiegabili con la stessa configurazione:

- HC-SR04 (ultrasuoni);
- JSN-SR04T (ultrasuoni impermeabile);
- GP2Y0A21YK0F (infrarossi);

- KY-032 (infrarossi);
- LIDAR-Lite (laser).

6. Ulteriori sviluppi

Il prototipo realizzato è già predisposto per l'upgrade che rende possibile l'automazione totale della manutenzione ordinaria dell'impianto di raffreddamento, ovvero il "rabbocco automatico" del liquido nel dewar. Questa performance richiede però l'aggiunta di un piccolo impianto di rifornimento a monte del dewar, costituito da una o più bombole a pressione e da una elettrovalvola comandata dalla centralina di controllo del tappo.

Comunemente il rabbocco si esegue da una bombola a pressione, attraverso un'appendice curva e semi flessibile applicata alla "testa spillatrice" con un giunto a vite. Tale appendice è realizzata con comune tubo di rame coibentato (tipicamente da 3/8 di pollice) e modellata secondo la forma e la lunghezza necessari all'utente per raggiungere l'imboccatura del dewar (figura 10).



Figura 10 Configurazione ordinaria a monte del dewar. Per rabboccare il liquido nel dewar si utilizza una bombola con azoto liquido in pressione. La "testa spillatrice" consente di estrarre il liquido grazie alla pressione del suo stesso vapore. Un tubo coibentato è usato per versare il liquido nel vaso di Dewar (tolto il tappo) quando è necessario il rabbocco. Nell'impianto in oggetto una bombola può fornire liquido per poco più di due rabbocchi nell'arco di 10 o 15 giorni. In un mese dovranno alternarsi almeno due bombole.

Figure 10 Ordinary configuration upstream of the dewar. A cylinder with liquid nitrogen under pressure is used to top up the liquid in the dewar. The "tapping head" allows the liquid to be extracted under the pressure of its own vapor. Topping up the dewar is done with the insulated tube, once the cap has been removed. In a large plant, a cylinder can provide liquid for a few top-ups over a period of 10 or 15 days. At least two cylinders must alternate in a month.

Per poter effettuare il rabbocco automatico è necessario che il becco della bombola venga collegato, attraverso una giunzione (preferibilmente a rapido cablaggio) ad un analogo spezzone di tubo collegato permanentemente al vaso di Dewar attraverso un foro passante nel tappo (figura 11). La valvola manuale della testa spillatrice verrà lasciata aperta in favore di una elettrovalvola posta a valle, verso il vaso. La centralina di controllo del livello del liquido (es. Arduino) eseguirà il rabbocco comandando l'apertura e la chiusura dell'elettrovalvola in base alla misura del livello del liquido nel vaso di Dewar rilevata in tempo reale dal sensore che lavora nel tappo. È da notare che i sensori a galleggiamento libero, spesso usati in ambito criogenico, a causa dell'agitazione della superficie del liquido difficilmente potrebbero misurare il livello nel corso del rabbocco.

L'unica variante alla struttura del tappo necessaria per consentire il rabbocco automatico è un foro passante in modo tale che un tubo inserito all'interno possa riversare il liquido nel vaso. Per un corretto funzionamento, il tubo non deve essere immerso nel liquido del contenitore (figura 11). Il tappo stesso fornisce l'isolamento alla sezione di tubo che lo attraversa. Secondo il diametro del collo del dewar, la presenza del foro passante può rendere necessario variare la posizione dei condotti acustici o sostituire il sensore doppio (TX + RX) con un'unica capsula ricetrasmittente.

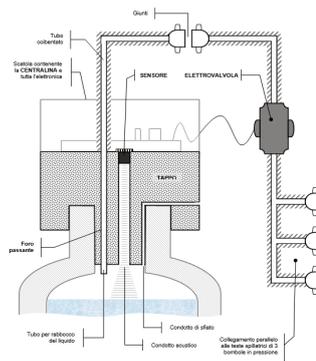


Figura 11 Variante di configurazione a monte del dewar. Le teste spillatrici di uno o più contenitori in pressione (nell'esempio sono 3) vengono collegate in parallelo ad un raccordo che sostituisce il becco e che è mantenuto chiuso da una elettrovalvola. Le valvole manuali delle teste spillatrici vengono mantenute aperte. Le 3 bombole risultano collegate in parallelo come un unico contenitore. Quando il sensore rileva il livello critico inferiore del liquido, la centralina di controllo (es. Arduino) apre l'elettrovalvola lasciando versare il liquido nel Dewar. Quando il sensore rileva il livello critico superiore del liquido, la centralina chiude l'elettrovalvola terminando il rifornimento del vaso. I contenitori in pressione possono essere scollegati per essere riempiti mensilmente. Per questa automazione l'unica variante necessaria alla forma del tappo è un foro passante.

Figure 11 Configuration variant upstream of the dewar. The "tapping heads" of one or more pressurized containers are connected in parallel and pour into a manifold which is kept closed by a solenoid valve. The manual valves of the "tapping heads" are kept open. The 3 cylinders connected in parallel work as a single container. When the sensor detects the minimum liquid level, the control unit (eg Arduino) opens the solenoid valve, letting more liquid pour into the Dewar. When the sensor detects the maximum liquid level, the control unit closes the solenoid valve, ending the supply of the vessel. The pressure vessels can be individually disconnected to be filled monthly.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare Giuseppe Tutone, tecnico dell'INGV oggi in pensione, per l'aiuto che mi ha dato nella lavorazione direi proprio "artigianale" delle diverse versioni del corpo isolante impiegate nelle numerose prove sperimentali necessarie ad arrivare alla configurazione finale. Lavoro eseguito con la maestria e la precisione che lo contraddistinguono sempre. Ringrazio inoltre il dr. Antonio Caramelli dell'INGV per avermi incoraggiato e costantemente seguito nel conseguimento del brevetto di questa soluzione tecnica. Guardando indietro mi rendo conto che senza il suo aiuto non avrei potuto raggiungere anche questo obiettivo.

Ringrazio infine l'amministrazione dell'INGV per aver supportato l'idea associandosi al conseguimento di un brevetto commerciale per questa soluzione tecnica che è nata nei nostri laboratori per risolvere un problema reale e non banale di sorveglianza critica degli impianti. Problema anche di personale e di sicurezza che potrebbe riproporsi in altri enti e laboratori e che speriamo ormai di aver risolto con successo.

Sitografia

Riferimenti al brevetto IT201800003588 (A1) - 2019-09-15

Brevetti dell'INGV: <http://istituto.ingv.it/it/attivita-di-ricerca/brevetti.html>

INGV, Piano Triennale di Attività 2018\2020 (pag. 99): http://13.69.54.214/images/Triennali/PTA_2018-2020_Volume1.pdf

Espacenet patent search (informazioni sulle invenzioni e sugli sviluppi tecnici dal 1782 ad oggi): https://it.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20190915&DB=it.espacenet.com&locale=it_IT&CC=IT&NR=201800003588A1&KC=A1&ND=4

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2020

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

