Rapporto Finale  
  
Campione ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
Colorado State University: Daniel Zimmerle  
Timothy Vaughn  
Kristine Bennett  
Cody Ross  
  
SLR International: Matthew Harrison  
Aaron Wilson  
Chris Johnson  
  
Preparato per  
California Air Resources Board  
Contratto: 19ISD010  
  
Data: 14/04/2022,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
2  
Avvertenza  
Le dichiarazioni e le conclusioni in questo rapporto sono quelle dell'appaltatore e non necessariamente  
quelle della California Air Resources Board. La menzione di prodotti commerciali, la loro fonte  
o il loro utilizzo in relazione ai materiali riportati qui non devono essere interpretati come un effettivo o implicito  
approvazione di tali prodotti.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
3  
Sommario esecutivo  
Il campionamento ad alto flusso rimane il metodo predominante per misurare i singoli punti di emissione. Un campionatore ad alto flusso (HFS) trascina le emissioni in un flusso d'aria e indirizza il flusso combinato attraverso uno strumento in cui vengono utilizzate misurazioni di flusso e concentrazione per calcolare il tasso di emissione. Sviluppato negli anni '90, il metodo è ampiamente adottato, ma lo strumento commerciale più diffuso per le misurazioni HFS (Bacharach® HI FLOW® Sampler o "BHFS") non viene più prodotto. La California Air Resources Board (CARB) ha commissionato la Colorado State University (CSU) e la CSU ha collaborato con la SLR International (SLR) per sviluppare un'architettura open-source per futuri strumenti e, se possibile, per incoraggiare lo sviluppo di nuovi prodotti commerciali.  
  
Architettura open-source: durante il progetto è stata sviluppata un'architettura per un campionatore ad alto flusso open-source (OS-HFS). Sono state dimostrate importanti innovazioni, tra cui:  
• Selezione e dimostrazione di sensori di gas di prossima generazione, soffiatore e sensori di misurazione del flusso. Sono state identificate anche problematiche chiave con questi sottosistemi, con consigli per i futuri utenti del design. (Figura 1).  
Non sono state trovate sostituzioni o miglioramenti facilmente accettabili per gli accessori esistenti BHFS, come il tubo, la borsa e altri attrezzi per la raccolta delle emissioni. Il prototipo continua con l'attrezzatura fornita da BHFS.  
• L'OS-HFS dimostra il concetto di una piattaforma ad alto flusso flessibile ai sensori che potrebbe adattarsi a nuovi utilizzi e sfide man mano che si presentano. Questa architettura viene realizzata isolando gli elementi di calcolo e visualizzazione dagli elementi di rilevamento e soffiatore. Un computer a scheda singola (SBC) commerciale, disponibile in commercio, è stato utilizzato per il calcolo e la visualizzazione. L'SBC comunica con tutti i sensori tramite protocolli seriali standard del settore. Questa architettura isola il computer, l'interfacciamento dei dati, l'interfaccia umana, la gestione della batteria e sistemi di supervisione simili dai sistemi di sensori.  
Adottare questo approccio renderà gli strumenti ad alto flusso più adattabili al cambiamento delle esigenze e all'evoluzione delle aspettative per la gestione dei dati e la comunicazione.  
• Nella misura del possibile, l'OS-HFS utilizza componenti open-source o facilmente reperibili, rendendo il sistema accessibile a chiunque sia interessato a costruire una copia o utilizzarlo.  
Figura 1: Vista sezionata del design dello strumento OS-HFS.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione aperto di campionatore ad alto flusso per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
4  
progettato come base per uno strumento prodotto. Ciò include l'uso di codifica Python indipendente dalla piattaforma per tutto il software, componenti sensoriali facilmente accessibili e l'uso di un soffiatore ad alto volume commerciale utilizzato in un'altra applicazione (computer).  
  
• Illustrazione di un nuovo design del pacchetto che si adatta meglio all'esperienza sul campo rispetto all'imballaggio dello zaino del BHFS. Miglioramenti includono un'interfaccia utente grafica migliorata, una migliore posizione dell'interfaccia utente, dimensioni dello strumento più piccole e durata della batteria più lunga e stabile. (Figura 2)  
Il prototipo dimostra il concetto di una piattaforma ad alto flusso flessibile ai sensori che potrebbe adattarsi a nuovi utilizzi e sfide man mano che si presentano. La sezione 5.1 fornisce ulteriori dettagli riassumendo la nuova architettura aperta.  
Test degli strumenti HFS pre-produzione: il progetto ha anche testato tre ulteriori strumenti HFS pre-produzione in fase di sviluppo da tre diverse aziende. I test indicano che queste unità dovrebbero essere in grado di sostituire il BHFS attuale una volta completate.  
Alcune caratteristiche del prototipo CSU sono state rappresentate in alcuni degli strumenti pre-produzione, come:  
1) Interfaccia utente modernizzata e raccolta dati. Ad esempio, diverse unità pre-produzione hanno aggiunto display remoti non collegati all'unità e tutte hanno fornito una certa quantità di registrazione dei dati.  
2) Due delle unità pre-produzione hanno utilizzato pacchetti più piccoli che erano più facilmente posizionati da un operatore durante la misurazione, mentre una ha riprodotto da vicino la configurazione dello zaino BHFS.  
3) Nonostante i progressi nell'usabilità, l'uso sul campo e l'ergonomia associata rimangono sfidanti: tutti gli strumenti - incluso il prototipo CSU - sono ancora ingombranti e pesanti per l'uso sul campo, soprattutto perché nessuna unità ha identificato tubi e contenitori più compatti o leggeri per catturare la perdita.  
Tuttavia, nessuno degli strumenti includeva diversi elementi chiave identificati durante questo lavoro (vedi sezione 5), soprattutto il supporto per sensori complementari multipli. Esperienza sul campo  
Figura 2: Strumento OS-HFS integrato durante i test iniziali.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
5 indica che è una sfida operativa correggere le diverse miscele di gas in condizioni di campo. Il prototipo CSU includeva un sensore come sensore di misurazione primario e un secondo sensore per rilevare le variazioni nella miscela di gas, anche se una correzione dipendente dalla composizione non era possibile senza ulteriori informazioni. Le unità pre-produzione erano specifiche per il metano o utilizzavano sensori di gas combustibili, come il BHFS.  
Inoltre, le unità pre-produzione dovrebbero essere sottoposte a test simili a quelli condotti qui prima dell'uso sul campo. Tutte le unità hanno presentato problemi di qualche tipo - tutti probabilmente risolvibili - ma ulteriori test aumenterebbero la fiducia in questi strumenti per un uso futuro.  
Metodo di flusso elevato e test degli strumenti: incidentalmente agli obiettivi principali del progetto, il progetto ha effettuato test approfonditi del metodo di flusso elevato in una serie di condizioni.  
I test di rilascio controllato su attrezzature realistiche presso il Methane Emissions Technology Evaluation Center (METEC) della CSU indicano che le incertezze per le misurazioni ad alto flusso indipendenti da qualsiasi strumento sono probabilmente sottostimate nella letteratura attuale, nell'analisi e nella segnalazione. I test con il prototipo CSU, un singolo strumento commerciale e tre strumenti pre-produzione hanno indicato una variabilità e un errore sostanzialmente maggiori nei risultati delle misurazioni su attrezzature realistiche rispetto a quando le emissioni venivano introdotte direttamente nello strumento. Questi risultati indicano che le pratiche dell'utente e le condizioni ambientali possono contribuire a un'incertezza sostanziale nelle misurazioni a livello di componente. Si consiglia di caratterizzare queste incertezze e sviluppare le migliori pratiche di misurazione.  
Note aggiuntive: il metodo di flusso elevato rimane uno dei pochi metodi adatti per isolare i singoli punti di emissione per una misurazione diretta. Gli strumenti di qualità che svolgeranno un ruolo chiave nella caratterizzazione dei tassi di perdita per molti anni sono quasi completi.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
6  
Contenuti  
1. Introduzione .........................................................................................................................9  
1.1 Contesto e Obiettivi del Progetto .....................................................................................9  
1.1.1 Campionamento ad Alto Flusso nel Contesto di Altri Metodi ...........................................9  
1.1.2 Situazione Attuale del Mercato per gli Strumenti HFS ..................................................... 10  
1.1.3 Obiettivi del Progetto ................................................................................................ 11  
1.2 Organizzazione di Questo Rapporto ........................................................................................ 12  
1.3 Il Pannello di Consulenza Tecnica ..................................................................................... 12  
2. Panoramica del Metodo ad Alto Flusso ................................................................................... 13  
2.1 Descrizione del Metodo ..................................................................................................... 13  
2.2 Fonti di Errore degli Strumenti ........................................................................................ 14  
2.3 Potenziali Errori del Metodo .............................................................................................. 15  
3. Progettazione Open-Source di un Campionatore ad Alto Flusso ................................................ 16  
3.1 Architettura e Componenti Chiave .............................................................................. 16  
3.1.1 Architettura Meccanica ...................................................................................... 16  
3.1.2 Architettura Elettronica ....................................................................................... 19  
3.1.3 Architettura del Software .......................................................................................... 23  
3.2 Selezione dei Componenti Chiave ..................................................................................... 26  
3.2.1 Ventilatore ................................................................................................................. 26  
3.2.2 Misurazione del Flusso ............................................................................................... 29  
3.2.3 Misurazione della Concentrazione ................................................................................. 31  
3.2.4 Misurazione della Concentrazione di Sfondo ............................................................. 36  
3.3 Analisi dell'Accuratezza ...................................................................................................... 37  
3.3.1 Limite Inferiore di Rilevamento ......................................................................................... 38  
3.3.2 Precisione della Quantificazione ...................................................................................... 39  
3.3.3 Test sulla Composizione del Gas ..................................................................................... 42  
3.3.4 Test di Utilizzo Pratico ........................................................................................... 44  
4. Test delle Unità HFS Prototipo Pre-Produzione ......................................................................... 46  
4.1 Limite Inferiore di Rilevamento ................................................................................................ 48  
4.2 Precisione della Quantificazione ............................................................................................. 50  
4.3 Test sulla Composizione del Gas ............................................................................................ 55  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
7  
4.4 Test di utilizzo pratico .................................................................................................. 57  
4.5 Riassunto dei test ........................................................................................................ 61  
5. Conclusioni e raccomandazioni ................................................................................... 63  
5.1 Conclusioni chiave: Prototipo CSU OS-HFS ................................................................. 63  
5.2 Conclusioni chiave: Strumenti prototipo pre-produzione ............................................. 64  
5.3 Conclusioni chiave: Metodo ad alto flusso e test degli strumenti ..................................... 66  
Appendice A File dati e materiali aggiuntivi .................................................................. 68  
Appendice B Metodo ad alto flusso raccomandato ................................................................... 69  
Appendice C Protocollo di test ............................................................................................... 76  
Riferimenti ................................................................................................................................ 81  
  
Tabella delle figure  
Figura 1: Vista sezionata del design dello strumento OS-HFS. .........................................................3  
Figura 2: Strumento OS-HFS integrato durante i test iniziali. ...................................................4  
Figura 3: Strumento ad alto flusso in uso. Il tessuto blu racchiude la fonte di perdita. ...............................9  
Figura 4: Un campionatore ad alto flusso (HFS) quantifica il flusso di una fonte di emissione direttamente ...... 13  
Figura 5: Un BHFS viene utilizzato per misurare un'emanazione su un pozzo. ............................................. 14  
Figura 6: Schema sezionato dello strumento integrato. ........................................................ 17  
Figura 7: Architettura elettronica per l'unità prototipo. ........................................................... 20  
Figura 8: Foto degli assemblaggi elettronici chiave. ......................................................................... 21  
Figura 9: Schema dell'architettura del software. ................................................................................ 24  
Figura 10: Esempio di scheda GUI ..................................................................................................... 25  
Figura 11: Confronto delle curve della ventola per il soffiatore GVP-100 utilizzato nel BHFS ............................ 27  
Figura 12: All'interno del motore del soffiatore 3M GVP-100 utilizzato nel BHFS. ......................................... 28  
Figura 13: Prima calibrazione del flussometro OS-HFS ........................................................................ 31  
Figura 14: Seconda calibrazione del flussometro OS-HFS .................................................................... 31  
Figura 15: Strategia di selezione del sensore per lo sviluppo di OS-HFS. ................................................. 32  
Figura 16: Il sensore SGX INIR-ME100 e il sensore di gas infiammabile Nevada Nano MPS .................. 33  
Figura 17: Camera di prova per la calibrazione e la caratterizzazione del sensore prototipo. ......................... 34  
Figura 18: Esempio di acquisizione dati dalla caratterizzazione del sensore. .................................................. 35  
Figura 19: Il sensore INIR mostra una forte dipendenza dalla pressione ambiente. ........................... 36  
Figura 20: L'output del sensore Nano mostra una minore dipendenza dalla pressione. ........................................ 36  
Figura 21: Limite inferiore di rilevamento del sensore INIR del prototipo OS-HFS. ........................................ 38  
Figura 22: Limite inferiore di rilevamento del sensore Nano del prototipo OS-HFS. ......................................... 38  
Figura 23: Precisione di quantificazione del sensore INIR del prototipo OS-HFS. .......................................... 39  
Figura 24: Precisione di quantificazione del sensore Nano del prototipo OS-HFS. ......................................... 40  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
Figura 25: Risultati aggiuntivi dei test di precisione del prototipo OS-HFS. ............................... 42  
Figura 26: Risultati dei test di composizione del gas del sensore INIR del prototipo OS-HFS. ........ 42  
Figura 27: Risultati dei test di composizione del gas del sensore Nano del prototipo OS-HFS. ....... 43  
Figura 28: Risultati dei test di utilizzo pratico del sensore INIR del prototipo OS-HFS. ................ 44  
Figura 29: Risultati dei test di utilizzo pratico del sensore Nano del prototipo OS-HFS. ............... 44  
Figura 30: Unità HFS presso METEC. .......................................................................................... 46  
Figura 31: Limite inferiore di rilevamento BHFS. ........................................................................ 48  
Figura 32: Limite inferiore di rilevamento GFM. ......................................................................... 49  
Figura 33: Limite inferiore di rilevamento Hetek. ........................................................................ 49  
Figura 34: Limite inferiore di rilevamento dei sensori. ................................................................ 49  
Figura 35: Precisione di quantificazione BHFS. .......................................................................... 51  
Figura 36: Precisione di quantificazione GFM. ........................................................................... 52  
Figura 37: Precisione di quantificazione Hetek. .......................................................................... 53  
Figura 38: Precisione di quantificazione dei sensori. ............................................................... 54  
Figura 39: Risultati della miscela di gas BHFS. .......................................................................... 56  
Figura 40: Risultati della miscela di gas GFM. ........................................................................... 56  
Figura 41: Risultati della miscela di gas Hetek. .......................................................................... 56  
Figura 42: Risultati della miscela di gas dei sensori. ................................................................ 57  
Figura 43: Pad 4 presso METEC con gruppi di attrezzature contrassegnati. ............................. 57  
Figura 44: Punti di rilascio METEC utilizzati per i test. ............................................................ 58  
Figura 45: Test di utilizzo pratico BHFS. ................................................................................... 59  
Figura 46: Test di utilizzo pratico GFM. .................................................................................... 60  
Figura 47: Test di utilizzo pratico Hetek. ................................................................................... 60  
Figura 48: Test di utilizzo pratico dei sensori. .......................................................................... 61  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
9  
1. Introduzione  
1.1 Contesto e Obiettivi del Progetto  
La misurazione accurata delle emissioni delle fonti è fondamentale per molti sforzi del California Air Resources Board (CARB), così come per gli sforzi dell'industria per comprendere e ridurre le emissioni. CARB, ONG1-5 e il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE)6-8 hanno sponsorizzato programmi di ricerca per comprendere le emissioni di gas naturale. Questi sforzi sul campo hanno spesso utilizzato tecniche di misurazione diretta del tasso di emissione per ottenere una caratterizzazione accurata delle emissioni a livello di componente su una vasta gamma di impianti, dalla produzione e l'esplorazione alla distribuzione. In definitiva, CARB è molto interessato alla mitigazione delle emissioni. L'implementazione pratica dei programmi di mitigazione spesso richiede misurazioni delle emissioni prima e dopo la mitigazione.  
Sia per la ricerca che per la mitigazione, la misurazione delle emissioni dei componenti viene più spesso completata utilizzando il metodo di misurazione ad alto flusso utilizzando uno strumento appositamente progettato: un Campionatore ad Alto Flusso (HFS). Nonostante le diverse esigenze e utilizzi, attualmente non esiste uno strumento HFS disponibile commercialmente. Lo strumento commerciale più diffuso per le misurazioni HFS fino ad oggi (il Bacharach® HI FLOW® Sampler o "BHFS"), un progetto degli anni '90, è stato interrotto dal produttore due anni fa. In un momento in cui la domanda di misurazione è in crescita, i dispositivi non sono più disponibili.  
1.1.1 Campionamento ad Alto Flusso nel Contesto di Altri Metodi  
Mentre le tecniche a valle, come il flusso tracciante9,10 o le tecniche di bilancio di massa11, possono stimare le emissioni a livello di impianto, l'azione correttiva richiede tipicamente la rilevazione e la misurazione a livello di componente. Inoltre, sono necessarie misurazioni delle fonti di emissione a livello di componente per informare i programmi di mitigazione delle emissioni degli operatori. I programmi normativi sono più interessati ai tassi di emissione per componente o processo al fine di indirizzare meglio i programmi di riduzione delle emissioni e di effettuare valutazioni costo/beneficio. Tutti questi sforzi richiedono la misurazione utilizzando un dispositivo qualificato e standardizzato e un protocollo di misurazione associato per il suo utilizzo.  
Lo standard scientifico e industriale per questo tipo di misurazione è l'HFS, originariamente sviluppato negli anni '90 12. Questo strumento ha ottenuto l'accettazione normativa ed è comunemente utilizzato per studi scientifici 1-3,13-15, rilevamenti interni delle emissioni dell'industria e segnalazioni normative16. Negli ultimi anni, un processo tipico consiste nel rilevare le perdite utilizzando l'imaging ottico dei gas (OGI) o il metodo 2117 dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente degli Stati Uniti (EPA) e successivamente quantificare quelle perdite utilizzando un HFS. Solo quando un HFS non funziona (ad esempio, la perdita è troppo grande), i team ricorrono ad altri metodi di misurazione delle perdite, come gli anemometri in flusso o le borse antistatiche18.  
Figura 3: Strumento ad alto flusso in uso. Il tessuto blu racchiude la fonte di perdita.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
In breve, per utilizzare uno strumento HFS, l'operatore racchiude liberamente il punto di emissione. Un ventilatore nello strumento HFS aspira sia l'intera perdita che l'aria circostante attraverso lo strumento e sui sensori che misurano sia la concentrazione (% di gas per volume) delle specie di gas target (ad esempio, metano o composti organici volatili (VOC)) che il volume totale del flusso d'aria. Un secondo sensore misura la concentrazione di fondo dello stesso gas nell'aria circostante. La portata massica della specie target viene calcolata dalla portata massica complessiva, dalla concentrazione di fondo e dalla concentrazione del punto di emissione.  
  
In sintesi, sebbene siano disponibili molti strumenti per identificare i punti di emissione (imaging ottico dei gas, rilevatori di gas, rilevatori a laser), e molti strumenti possono fornire una stima della concentrazione delle specie target nell'aria (ppm o letture ppm-m), l'unico metodo ampiamente accettato e generale per quantificare le emissioni dai componenti è il campionamento ad alto flusso.  
  
1.1.2 Situazione attuale del mercato per gli strumenti HFS  
Sebbene la tecnica sia semplice e ben compresa, l'unico strumento disponibile commercialmente, il BHFS 19, è stato recentemente interrotto. Molti strumenti BHFS esistenti sono ancora in uso, ma il supporto a lungo termine è incerto. Lo strumento ha affrontato diverse sfide legate alla sua usabilità (peso, ingombro, potenziale mancanza di sicurezza intrinseca) e preoccupazioni sulla sua precisione quando utilizzato con gas umidi.  
  
Studi recenti (primavera 2019) hanno ulteriormente evidenziato problemi con il BHFS. Il National Physical Laboratory nel Regno Unito ha analizzato i sensori dello strumento in un recente articolo e ha evidenziato diversi problemi di prestazioni del software e dei sensori. Anche la CSU ha effettuato test approfonditi nella primavera del 2019 utilizzando le capacità di miscelazione del gas e di controllo del flusso presso il Methane Emissions Technology Evaluation Center (METEC) presso la CSU. Questi test hanno rivelato diversi problemi non documentati in precedenza con lo strumento, tra cui variazioni nelle emissioni indicate con il flusso totale attraverso lo strumento e cambiamenti nelle emissioni indicate durante il passaggio da concentrazioni di gas alte a basse o da basse ad alte. Una recente campagna sul campo ha abbinato un sottoinsieme di misurazioni BHFS con campioni contemporanei di SUMMA-canister e ha riscontrato una scarsa correlazione nella cosiddetta zona di transizione tra concentrazioni in cui il sensore funziona in modalità di ossidazione catalitica e modalità di conducibilità termica - una concentrazione di idrocarburi di perdita indicata del 3-6%. Lo strumento non è riuscito a effettuare la transizione nonostante gli sforzi per ridurre al minimo l'uso di pratiche note per causare questo comportamento indesiderato.  
  
Sono state sviluppate diverse implementazioni di sistemi ad alto flusso per circostanze specializzate, tra cui la misurazione di emissioni più grandi della capacità del BHFS; la misurazione di piccole emissioni distribuite; la misurazione di emissioni da perdite di condotte sotterranee; e la misurazione di emissioni utilizzando il metodo della "camera dinamica". Ogni sviluppo di questi ha comportato set di strumentazione molto più grandi, tipicamente montati su veicoli e spesso utilizzando strumenti di laboratorio di alta qualità per fornire la necessaria risoluzione del sensore. Nel ottobre 2017, l'Ufficio di Ricerca e Sviluppo dell'EPA (EPA/ORD), in collaborazione con la Regione 8 dell'EPA, ha ottenuto un finanziamento di $100.000.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campione ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
11  
attraverso il programma di Ricerca Applicata Regionale dell'EPA per sviluppare e testare componenti di un prototipo di HFS 23.  
In sintesi, quando questo progetto è iniziato, non erano in corso sviluppi di nuovi strumenti commerciali.  
La revisione o lo sviluppo di un HFS è stato ostacolato dal previsto volume di vita breve (≈1500 unità in 20 anni\*) e dal costo di sviluppo richiesto. Mentre diversi gruppi scientifici hanno sviluppato i propri strumenti HFS, nessuno di questi progetti rappresenta un design riproducibile, compatto o standardizzato necessario per un impiego pratico e un uso diffuso. È necessaria una versione pratica, affidabile, compatta e versatile di uno strumento HFS per raggiungere un uso diffuso e l'accettazione dei risultati, ed è fondamentale per l'industria, il governo e scopi scientifici.  
Diversi progressi tecnologici dagli anni '90 sono ora disponibili e possono migliorare il funzionamento e l'imballaggio dei futuri strumenti HFS:  
• I sensori di concentrazione di gas sono notevolmente migliorati dagli anni '90, inclusa la conversione analogico-digitale (A/D) interna al sensore, nuovi elementi del sensore e maggiore sensibilità.  
• I sensori ausiliari per il flusso, il monitoraggio dell'alimentazione e altri scopi sono avanzati e hanno ridotto i costi dagli anni '90.  
• Il controllo computerizzato del flusso d'aria (ad esempio, la velocità della ventola) è più pratico utilizzando regolatori di velocità facilmente disponibili, inclusi regolatori interni all'assemblaggio della ventola stessa.  
• Miglioramenti computazionali e di memoria del computer supportano ora la registrazione delle letture dei sensori in serie temporali per l'assicurazione della qualità, i requisiti del metodo (ad esempio, garantire letture stabilizzate) e la cattura delle emissioni in cambiamento.  
• Le attuali batterie al litio forniscono alimentazioni più compatte e stabili rispetto a quelle disponibili negli anni '90.  
1.1.3 Obiettivi del progetto  
Gli obiettivi dichiarati di questo progetto erano sviluppare un design open-source che riducesse il rischio di produrre una nuova generazione di prodotti, ovvero per un'entità commerciale per sviluppare un nuovo strumento HFS.  
I risultati del progetto erano:  
1) Progettazione dei componenti chiave attualmente non disponibili in commercio.  
2) Considerare progetti che adattino strumenti esistenti con sensori elettronici migliorati - se i retrofit emergono come un percorso valido.  
3) Software pre-produzione che incorpora il metodo e il controllo di qualità.  
4) Selezione o progettazione dei componenti consigliati per la sicurezza intrinseca.  
5) Istruzioni per l'approvvigionamento e la costruzione per realizzare lo strumento.  
  
\* Stima basata su dati aneddotici da conversazioni private con un'azienda che distribuisce unità BHFS nell'ultimo decennio. La stima non tiene necessariamente conto di un eventuale aumento dell'interesse per la mitigazione delle emissioni di metano a causa di programmi regolatori, aziendali o di gas certificati.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
12  
Si noti che il design open-source richiederebbe comunque ulteriori sviluppi di prodotto e certificazioni di sicurezza per diventare uno strumento vendibile.  
Durante il progetto, diverse entità commerciali hanno annunciato piani per sviluppare nuovi strumenti HFS. Le ragioni di questo improvviso aumento di interesse commerciale non sono chiare, ma probabilmente sono dovute all'aumento dell'interesse da parte degli operatori e dei regolatori per strumenti di sostituzione per il BHFS. È anche possibile che questo progetto abbia stimolato ulteriore interesse e aiutato le aziende a identificare gli strumenti HFS come un'opportunità commercialmente valida. Alla primavera del 2021, era sempre più chiaro che gli sforzi commerciali sarebbero arrivati sul mercato verso la fine di questo progetto. Pertanto, il team del progetto ha collaborato con tre produttori e ha testato ciascuna delle loro unità pre-produzione utilizzando lo stesso protocollo utilizzato per il prototipo OS-HFS in fase di sviluppo. Il BHFS in carica è stato anche incluso nei test come punto di confronto per tutti gli strumenti in fase di sviluppo.  
  
1.2 Organizzazione di questo rapporto  
Il capitolo 2 fornisce una panoramica del metodo ad alto flusso, compreso un riassunto qualitativo delle possibili fonti di errore nel metodo e negli strumenti utilizzati per il metodo. Il capitolo 3 descrive il design OS-HFS creato da questo progetto, con enfasi sulla selezione e valutazione dei componenti chiave dello strumento. Il capitolo 4 riassume i test del prototipo e il capitolo 5 fornisce conclusioni e raccomandazioni per il metodo ad alto flusso e gli strumenti. Gli allegati forniscono informazioni scritte ausiliarie. I dati di test, il software, il design meccanico e i layout PCB per l'OS-HFS sono inclusi nei file allegati.  
  
1.3 Il Pannello Consultivo Tecnico  
Il progetto includeva anche un Pannello Consultivo Tecnico (TAP) per la revisione dei progressi del progetto. Il TAP includeva circa 50 contributori nel settore del petrolio e del gas, tra cui rappresentanti di aziende petrolifere e del gas, aziende di tecnologia per la rilevazione del metano e agenzie regolatorie. Il panel si è incontrato diverse volte tramite Zoom o Teams nelle prime fasi del progetto nel 2020 (16 aprile, 21 maggio, 29 giugno) per discutere delle opzioni per i ventilatori, i sensori e altri elementi di design desiderati per un HFS di prossima generazione.   
Successivi incontri nel 2021 (20 gennaio, 14 luglio) e nel 2022 (29 marzo) hanno fornito aggiornamenti sui progressi, presentato informazioni sul prototipo e sollecitato feedback dal TAP. Questi incontri si sono svolti tramite Teams. Inoltre, il team del progetto si è incontrato con diversi membri del TAP individualmente per ottenere un input più dettagliato e comprendere le esigenze e i desideri della base di clienti probabile.  
Due membri del team del progetto hanno anche partecipato a un processo di "scoperta del cliente" all'inizio del 2021 che ha sollecitato feedback dagli utenti di HFS, potenziali fornitori e altri gruppi. Le conoscenze acquisite da questi stakeholder hanno influenzato il design dell'OS-HFS in molti modi tangibili e intangibili.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
13  
2. Panoramica del metodo ad alto flusso  
2.1 Descrizione del metodo  
Il metodo ad alto flusso quantifica il flusso di una sorgente di emissione (𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4) intrappolandola completamente all'interno di un flusso e misurando contemporaneamente il flusso totale (𝑄𝑄ℎ𝑓𝑓𝑓𝑓= 𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4+𝑄𝑄𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎) e la concentrazione dell'emissione (𝐶𝐶𝐶𝐶𝐻𝐻4) intrappolata. I due parametri misurati vengono quindi utilizzati per calcolare il flusso sconosciuto della sorgente di emissione, come indicato nell'equazione (1).  
  
𝐶𝐶𝐶𝐶𝐻𝐻4=𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4  
𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4+𝑄𝑄𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎  
𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4=𝐶𝐶𝐶𝐶𝐻𝐻4÷(𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4+𝑄𝑄𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎)  
𝑄𝑄ℎ𝑓𝑓𝑓𝑓=𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4+𝑄𝑄𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎𝑎  
𝑄𝑄𝐶𝐶𝐻𝐻4=𝑄𝑄ℎ𝑓𝑓𝑓𝑓𝐶𝐶𝐶𝐶𝐻𝐻4 (1)  
  
Figura 4: Un campionatore ad alto flusso (HFS) quantifica direttamente il flusso di una sorgente di emissione intrappolandola completamente all'interno di un flusso di aria circostante (Q air) e misurando la concentrazione delle specie di emissione all'interno del flusso totale attraverso l'HFS (Q hfs).  
Le seguenti assunzioni sono intrinseche al metodo:  
• Che l'aria e il metano si comportino come gas ideali.  
• Che l'aria e il metano siano perfettamente miscelati.  
• Che la misurazione della concentrazione sia perfettamente accurata dallo 0 al 100%.  
• Che la misurazione del flusso del flusso sia perfettamente accurata nel suo intervallo di utilizzo definito (Qhfs,min a Q hfs,max) e non influenzata dalla proporzione relativa di aria/metano.  
• Che la sorgente di emissione sia intrappolata completamente dal flusso. Ciò implica che Q CH4 sia <= Q hfs,max.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
14  
È importante notare che le misurazioni di concentrazione effettuate dagli strumenti variano nella specificità del gas campionato. Mentre alcune unità possono utilizzare sensori sensibili solo al metano, altri strumenti utilizzano sensori più generalmente sensibili a tutti gli idrocarburi, o potenzialmente a tutti i gas combustibili.  
L'offerta commerciale archetipica per la quantificazione delle perdite di componenti di gas naturale è stata il BHFS mostrato in uso nella Figura 3 e nella Figura 5. Un ventilatore contenuto nello zaino crea il flusso di aria che aspira la fonte di emissione e l'aria in eccesso. Sia nella Figura 3 che nella Figura 5, l'operatore ha utilizzato l'attacco a sacco per bloccare il vento e indirizzare l'emissione nel BHFS. Il sacco è appeso liberamente per evitare di limitare il flusso verso il BHFS e consentire all'aria in eccesso di essere aspirata e mescolata con la fonte di emissione. I sensori all'interno dello zaino misurano la concentrazione di gas e riportano il flusso misurato, la concentrazione misurata e il tasso di emissione calcolato su uno schermo portatile. I risultati possono anche essere memorizzati come dati di testo e recuperati tramite un'interfaccia informatica.  
Un HFS potrebbe essere costruito in vari modi e diversi gruppi hanno implementato le proprie versioni utilizzando diverse tecniche per le misurazioni di flusso e concentrazione (vedi 27,31). Altri approcci sono anche possibili. La configurazione di un HFS specifico sarebbe guidata dall'applicazione di interesse, dal modello di utilizzo, dalla precisione richiesta, dal costo desiderato, dalle preoccupazioni per la sicurezza, dalle risorse disponibili e da altri fattori.  
Convertire i principi di questo semplice metodo in un dispositivo di misurazione utile nel mondo reale non è banale e soggetto a potenziali limitazioni e fonti di errore, alcune delle quali sono discusse nelle sezioni seguenti.  
2.2 Fonti di errore degli strumenti  
La composizione del gas, le sensibilità incrociate, la saturazione dei sensori e l'avvelenamento dei sensori possono contribuire agli errori nelle letture riportate dagli strumenti HFS. Gli effetti ambientali come temperatura, pressione e umidità relativa possono influenzare anche i risultati riportati. Tenere conto correttamente di ciascuno di questi fattori e specificare i casi d'uso appropriati (e inappropriati) per lo strumento può risolvere la maggior parte di questi problemi, sia mediante approcci di progettazione che procedurali.  
La composizione del gas e i tassi di emissione tipici varieranno notevolmente lungo la catena di approvvigionamento del gas naturale insieme alle condizioni ambientali. Ad esempio, utilizzare uno strumento HFS con un rilevatore specifico per il metano per misurare le emissioni dal tappo di un serbatoio potrebbe fornire un tasso di emissione di metano accurato ma probabilmente sottostimerà il tasso di emissione di gas completo e darà un'immagine inaccurata dei COV.  
Figura 5: Un BHFS viene utilizzato per misurare un' emissione su un pozzo.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
15  
emissioni presenti. A seconda dell'obiettivo finale della misurazione, questo potrebbe essere o meno problematico.  
2.3 Errori potenziali del metodo  
Due possibili limitazioni del metodo ad alto flusso sono la cattura incompleta e la "sovracattura":  
La cattura incompleta può verificarsi quando si tenta di catturare una sorgente in cui:  
• Il flusso è maggiore di quanto l'strumento HFS sia in grado di misurare.  
• Una sorgente di emissione ha una velocità di uscita che non può essere superata dal ventilatore HFS.  
• Il vento disperde la sorgente di emissione in modo tale che il ventilatore HFS non possa trattenere le emissioni.  
• L'incapsulamento della sorgente di emissione è incompleto e alcune emissioni vengono emesse all'esterno dell'incapsulamento e non vengono trattenute nell'strumento.  
Gli operatori possono evitare la cattura incompleta osservando la misurazione con una telecamera OGI per assicurarsi che tutte le emissioni visibili vengano trattenute nell'strumento.  
La sovracattura si verifica quando il flusso motore dell'HFS preleva un'emissione a una velocità superiore alla sua velocità di emissione naturale, campionando effettivamente "emissioni immagazzinate" anziché "velocità di emissione".  
La sovracattura può verificarsi quando non viene ammesso aria di diluizione sufficiente insieme alla sorgente di emissione e l'HFS "aspira" efficacemente la sorgente dal suo contenitore. Sebbene questo errore possa verificarsi in diverse situazioni, è più diffuso quando si misurano aperture su serbatoi, ovvero quando si campiona un grande volume di emissioni immagazzinate a pressione quasi atmosferica.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
16  
3. Progettazione open source di un campione ad alto flusso  
Il prototipo open source del campione ad alto flusso (OS-HFS) della CSU è stato progettato per sostituire il BHFS, affrontando le sue carenze, ampliando le sue capacità e aggiornando la selezione dei componenti per una portabilità a lungo termine. Gli obiettivi di prestazione per l'OS-HFS sono stati guidati dalle specifiche del BHFS come punto di riferimento. Il progetto mirava a riprodurre la funzionalità generale e a mantenere il modello di utilizzo esistente del BHFS, ma con prestazioni migliorate e un'esperienza utente migliorata. Gli obiettivi complessivi erano:  
  
• Ridurre le dimensioni e il peso.  
• Migliorare le prestazioni della batteria.  
• Ampliare gli estremi inferiore e superiore della gamma di misurazione.  
• Migliorare l'accuratezza complessiva del sistema.  
  
I progetti preliminari hanno mostrato che ciò sarebbe stato possibile con una selezione attenta e l'integrazione di componenti appropriati disponibili in commercio.  
  
3.1 Architettura e componenti chiave  
3.1.1 Architettura meccanica  
Questa sezione fornisce una panoramica dell'architettura elettronica e meccanica dello strumento.  
L'architettura meccanica dello strumento è stata progettata per un modello di utilizzo specifico, basato sull'esperienza sul campo del team del progetto in progetti precedenti 1,2,25,26.  
  
Strumenti precedenti: Il BHFS confezionava lo strumento in una scatola metallica inserita in uno zaino per facilitarne il trasporto. Sebbene lo zaino potesse potenzialmente contenere alcuni accessori per lo strumento, in genere c'era spazio insufficiente nello zaino per il tubo e l'attrezzatura di cattura più grande. Di conseguenza, l'operatore(i) doveva fare più viaggi per portare l'attrezzatura a ogni perdita. Inoltre, l'esperienza sul campo indica che, nell'uso effettivo, l'operatore di solito posizionava lo zaino a terra, posizionava il display in una posizione comoda utilizzando l'attacco magnetico e quindi organizzava l'attrezzatura di ingresso per catturare la perdita (Figura 5). L'esperienza sul campo del team ha indicato che il design dello zaino non era adatto alle condizioni pratiche sul campo. Lo zaino è difficile da pulire e raccoglie sporco e olio dall'area circostante. Anche gli accessori diventano sporchi ed è problematico inserirli nello zaino con lo strumento. Infine, il cavo e il display, sebbene spesso comodi, erano anche scomodi da riporre e, in molti casi, non potevano essere attaccati magneticamente vicino al punto di misurazione. Nella pratica, molti team sul campo utilizzano due operatori per le misurazioni ad alto flusso; uno per chiudere la fonte di emissione e uno per monitorare e registrare i dati dal display dell'HFS.  
  
Design attuale: L'architettura meccanica dell'OS-HFS si basa sul seguente modello di utilizzo:  
  
• Spostare lo strumento e gli accessori necessari vicino alla perdita.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
17  
• Posizionare l'unità strumento su una superficie vicina e aprire il coperchio.  
• Disporre gli accessori di raccolta (tubi, sacchetti, ecc.) per catturare la perdita.  
• Monitorare lo schermo per avviare e registrare la misurazione.  
• Rimuovere gli accessori, chiudere il coperchio, passare alla prossima posizione di misurazione.  
Per spostare lo strumento, è possibile fissare una tracolla alla strumento e portarla su una o entrambe le spalle per liberare le mani per trasportare altri attrezzi; i componenti della custodia in plastica vengono utilizzati per ridurre il peso dello strumento. Sebbene non sia completato nel prototipo attuale, i componenti della custodia potrebbero dover essere rivestiti con una finitura metallica conduttiva per migliorare la messa a terra e ridurre le scariche statiche.  
La Figura 6 fornisce una vista schematica a sezione del OS-HFS. I componenti principali sono etichettati. Una copertura estetica che racchiude l'elettronica e il display sullo scaffale superiore non è stata progettata e non è mostrata. Il prototipo utilizza una custodia Pelican™ Pelicase™ 1430 come custodia.  
  
Figura 6: Vista a sezione schematico dello strumento integrato.  
I componenti meccanici principali sono mostrati nella Figura 6. Viene fornita un'overview del funzionamento dello strumento con dettagli dei componenti chiave nella sezione successiva.  
Percorso del flusso d'aria: In funzione, l'ingresso è dotato di un raccordo per l'attacco del tubo che si collega rapidamente a un tubo. Possono essere utilizzati diversi tipi di tubi; l'OS-HFS utilizza il tubo fornito con lo strumento BHFS di CSU. La scelta della lunghezza e del tipo di tubo influenza il flusso massimo attraverso lo strumento. In generale, i tubi più corti hanno una minore resistenza al flusso, il che porta a...  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
18  
un flusso d'aria più elevato attraverso lo strumento, che è importante per misurare emissioni più grandi. Uno schermo di ingresso è anche richiesto, sia come parte dell'attacco del tubo che all'ingresso dello strumento. Il ventilatore aspira le emissioni attraverso il tubo di flusso e la piastra dell'orifizio e le scarica nella camera del sensore. Posizionando i sensori direttamente nel percorso del flusso, non sono necessarie pompe di campionamento per estrarre una parte del flusso per la misurazione, riducendo la complessità dello strumento. Il flusso è diretto verso l'uscita del flusso. In funzione, questa porta è dotata di uno schermo per evitare che corpi estranei entrino nella camera del sensore. In alcuni casi, può essere utile collegare un tubo di scarico per indirizzare le emissioni catturate lontano dall'apparecchio e dall'operatore. Ciò può essere realizzato utilizzando gli stessi raccordi e lo stesso tipo di tubo dell'ingresso. La resistenza al flusso aumentata causata dal tubo di scarico ridurrà la portata massima attraverso lo strumento e la portata massima di emissione che può essere misurata.  
Rilevazione: Il flusso totale viene misurato dalla caduta di pressione attraverso la piastra dell'orifizio nel tubo di flusso, utilizzando un sensore di pressione differenziale. Le dimensioni del tubo di flusso forniscono una stabilità sufficiente per la piastra dell'orifizio per misurare la portata del flusso. Le variazioni di queste dimensioni dovrebbero essere analizzate accuratamente. Le dimensioni del tubo di flusso e del ventilatore praticamente stabiliscono la dimensione orizzontale dello strumento e tutti gli altri componenti sono posizionati in relazione ai volumi di tali componenti.  
La camera del sensore include supporti per i sensori di gas. Lo strumento prototipo utilizzava due sensori. Maggiori/minori sensori potrebbero essere installati nella stessa camera con una qualche rielaborazione. Le fluttuazioni di pressione causate dal flusso d'aria turbolento all'uscita del ventilatore potrebbero influire sulle letture del sensore. Alcuni sensori potrebbero aver bisogno di essere riparati o posizionati in camere separate per i sensori fornite da pompe di campionamento. Molti sensori di gas riportano anche temperatura, pressione e umidità relativa che potrebbero essere utili per correzioni di calibrazione avanzate e per tradurre le misurazioni alle condizioni standard.  
Come regola generale, l'architettura favorisce l'uso di sensori con uscite digitali. Questo approccio facilita l'integrazione con altre elettroniche dello strumento (vedi la prossima sezione) e l'amplificazione integrata, la conversione A/D e la correzione riducono i problemi di rumore del sensore presentati dall'uso di ponti di Wheatstone separati e conversione A/D. Tuttavia, limita la scelta dei sensori e la velocità con cui il sensore può essere letto. Nella pratica, queste limitazioni non hanno indebitamente limitato la progettazione del sistema e sono altamente raccomandate per dispositivi derivati.  
Elettronica: L'elettronica include un SBC che fornisce controllo di supervisione, interfaccia utente e gestione dei dati per lo strumento e schede elettroniche ausiliarie che integrano i componenti necessari per l'integrazione dei sensori e la gestione della batteria.  
Involucro: L'involucro utilizza un case commercialmente disponibile, impermeabile all'acqua e alla polvere. Tutti i componenti vengono inseriti nell'involucro dalla parte superiore dell'unità. Ciò limita l'accesso ai componenti ma mantiene l'integrità dell'involucro.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
19  
La batteria principale, che alimenta la ventola e diversi altri componenti, è posizionata nella parte inferiore dell'involucro per mantenere il baricentro basso, contribuendo a stabilizzare l'unità quando è ferma o trasportata. L'SBC utilizza una batteria separata e continuerà a funzionare quando la batteria principale si scarica. La ricarica della batteria principale avviene in situ, senza rimuoverla dal case, utilizzando le connessioni appropriate. La batteria ausiliaria dell'SBC si ricarica dalla batteria principale. Nel prototipo, la ricarica avviene con connettori all'interno della scatola, mentre un'unità prodotta avrebbe probabilmente connettori a passo d'uomo installati nel case.  
Il percorso dell'aria è sigillato e sigillato al case per ridurre al minimo l'intrusione di gas nell'area elettronica. Una sigillatura completa è, tuttavia, impraticabile. La valutazione delle possibili intrusioni di gas e delle fonti di accensione fa parte della revisione di sicurezza richiesta per qualsiasi strumento completato.  
3.1.2 Architettura elettronica  
Questa sezione discute il design e le interconnessioni dei componenti elettronici. Consultare i file PCB nell'archivio dati per i dettagli.  
Un obiettivo principale dell'architettura elettromeccanica era consentire una facile sostituzione (o sostituzione) di sensori e controlli. L'architettura utilizza un SBC (Raspberry Pi™) standard del settore e il linguaggio di programmazione Python. Questa classe di computer è economica, potente, a basso consumo energetico e si integra bene con altri sistemi di calcolo, inclusi dispositivi di rete e Bluetooth. Il linguaggio di programmazione è trasportabile su altre piattaforme informatiche simili e le porte I/O di qualsiasi SBC simile possono essere facilmente mappate per comunicare con i sistemi di sensori tramite standard di porta seriale comuni. Infine, questa classe di computer supporta schermi di visualizzazione di qualità, con retroilluminazione, che consentono un'interfaccia utente moderna e facilitano la diagnostica, il caricamento dei dati e l'operazione sul campo rispetto al display LCD a 4 linee utilizzato nel BHFS.  
Inoltre, l'allontanamento dai controller proprietari supporta un rapido aggiornamento dei componenti di controllo di supervisione dello strumento; gli SBC evolvono rapidamente nel corso della vita di uno strumento e costruire intorno a un microcontrollore proprietario potrebbe ritardare l'adattamento dello strumento a modelli di utilizzo in evoluzione. L'incapacità di aggiornare lo strumento BHFS esistente rende difficile la raccolta di dati a serie temporali, impedisce l'automazione efficace delle misurazioni e impedisce efficacemente l'integrazione di sensori nuovi o diversi.  
Come esempio chiave di integrazione, molte aziende si stanno orientando verso sistemi integrati di tracciamento dei dati per i loro programmi di rilevamento e riparazione delle perdite (LDAR). L'integrazione automatizzata della misurazione delle perdite in questi sistemi di tracciamento ridurrebbe gli errori di dati, fornirebbe un migliore tracciamento della rilevazione e delle misurazioni e ridurrebbe l'onere della segnalazione regolamentare. Sarebbe necessario un ridisegno completo per adattare un BHFS a questo tipo di comunicazione. Al contrario, il controller SBC dell'OS-HFS potrebbe essere facilmente adattato per caricare le misurazioni delle perdite su un server, utilizzando protocolli standard di interscambio dati.  
La Figura 7 fornisce una panoramica dell'architettura elettronica e dei sensori dell'OS-HFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
20  
  
Figura 7: Architettura elettronica per l'unità prototipo.  
Panoramica: Il controllo primario è realizzato da un SBC. È stato selezionato un Raspberry Pi per il prototipo, in quanto dispone di un numero sufficiente di pin GPIO (uso generale) e utilizza una versione robusta del sistema operativo Linux. Il SBC gestisce anche lo schermo del display, utilizzando un driver standard HDMI con un'aggiunta di touchscreen.  
Un connettore header GPIO espande i pin GPIO per l'accesso a molti altri componenti. In generale, ognuno di questi è su una scheda separata e disperso in tutto lo strumento in posizioni adatte per il rilevamento o il controllo. Il breakout GPIO è un prodotto commerciale (Raspberry Pi Cobbler di Adafruit\*). In un'unità di produzione, il breakout sarebbe montato su una PCB specifica per lo strumento che poi distribuirebbe le connessioni per altri sottosistemi. Per l'OS-HFS, è stata utilizzata una scheda a spina, come mostrato nella Figura 8. Nel prototipo, non c'è una copertura sulle assemblee elettroniche; un'unità di produzione avrebbe una copertura in lamiera o plastica conduttiva.  
PCB: Entrambi i sensori utilizzano un montaggio a 5 pin che richiedeva una PCB personalizzata per mantenere saldamente il sensore e montarlo nella camera del sensore. Entrambi i sensori eseguono la conversione A/D, le correzioni di calibrazione e la riduzione del rumore interne ai sensori e comunicano i risultati tramite una connessione seriale (vedere Figura 7 per i tipi di connessione seriale utilizzati). Pertanto, la PCB fornisce solo connessioni seriali e di alimentazione; non sono necessari altri componenti attivi. La PCB deve anche essere  
  
\* https://www.adafruit.com/product/914 Microcontroller  
(Raspberry Pi)  
Scheda di interconnessione  
Scheda di alimentazione PiJuice  
Sensore di pressione  
Sensore di temperatura e umidità  
Scheda di supporto del sensore (SGX)  
Scheda di supporto del sensore (Nano)  
Sensore GPS  
Regolatore 5V  
Convertitore A/D  
Connessione header GPIO  
Connessione header GPIO  
I2C  
Analogico  
UART 1  
UART 2  
UART 3  
12 V  
PWM  
Scheda di controllo della velocità integrata  
Batteria LiIon 12 V  
Porta di ricarica 12V  
Ventola  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
21  
progettato per essere montato in modo sicuro alla camera del sensore e fornire spazio per una tenuta ermetica intorno al sensore.  
  
Figura 8: Foto degli assemblaggi elettronici chiave. La foto principale mostra la parte superiore del prototipo con gli assemblaggi elettronici chiave visibili. La foto in miniatura mostra la scheda di montaggio per gli elementi del sensore. Il controllo della velocità del ventilatore è stato realizzato inviando un segnale di modulazione di larghezza di impulso (PWM) al controller integrato del ventilatore. Questo metodo semplifica la complessità dell'elettronica, poiché non è richiesto alcun ponte H o un simile dispositivo di controllo del motore, e fornisce una migliore soppressione del rumore, poiché tutti gli switch avvengono vicino al ventilatore. È altamente consigliato che tutte le unità di produzione identifichino ventilatori con funzionalità di controllo della velocità interno.   
  
La scheda di interconnessione mappa principalmente le porte seriali in ingresso o il segnale PWM in uscita per il ventilatore alle porte GPIO sul controller, anche se è stata implementata una conversione di livello da 3,3 V a 5 V del Raspberry Pi per alcune funzioni di interfaccia. Il mapping delle GPIO è stato realizzato tramite software.  
  
Comunicazioni dati: ad eccezione del sensore di pressione, tutti i sensori sono stati selezionati per comunicare tramite porte seriali. Ci sono due vantaggi in questa strategia. In primo luogo, i sensori con conversione A/D integrata, scaling e calibrazione tendono ad essere più stabili e meno suscettibili al rumore elettrico nell'apparecchiatura. Poiché queste funzioni critiche sono all'interno del modulo del sensore, ciò supporta anche una rapida sostituzione di eventuali assemblaggi difettosi. In secondo luogo, i sensori possono essere posizionati come necessario all'interno.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campione ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
22  
Lo strumento e non ha bisogno di essere posizionato sulla scheda principale. Ciò elimina l'equipaggiamento di supporto, come le pompe per campioni per i sensori di gas, e riduce la quantità di schermatura elettrica richiesta, anche se si consiglia l'uso di cavi di connessione schermati.  
Il sensore di pressione (Honeywell HSCDRRN002NDAA5) utilizza una scheda convertitore A/D disponibile in commercio (scheda Adafruit\* per il chip convertitore A/D I2C TI™ ADS1115) per eseguire la conversione A/D e comunicare i risultati alla SBC tramite comunicazioni seriali (I2C†).  
Sono disponibili versioni I2C di questo sensore di pressione, ma erano esaurite durante lo sviluppo del prototipo. Poiché qualsiasi sensore di pressione differenziale richiederà tubazioni dai porti di pressione nel tubo di flusso al sensore di pressione, l'unità del sensore può essere posizionata sulla stessa scheda di circuito del breakout GPIO.  
Il modulo GPS fornisce sia l'ora che la posizione alla SBC. Poiché i file di dati vengono spesso elaborati utilizzando timestamp per combinare più flussi di dati, il timing preciso è essenziale. Il modulo GPS utilizza un'antenna ausiliaria montata all'interno dell'involucro di plastica dello strumento. Se viene utilizzato un tipo di involucro metallico nelle unità derivate, potrebbe essere necessaria una disposizione per un'antenna esterna. Il GPS potrebbe anche essere necessario per integrare la posizione delle misurazioni nei sistemi di tracciamento dei dati delle aziende.  
Le velocità di comunicazione variano tra i sensori (vedere la sezione 3.2 per i sensori chiave), ma poiché nessuno dei sensori deve essere campionato a più di pochi Hz, le comunicazioni seriali sono sufficientemente veloci per leggere contemporaneamente tutti i sensori.  
Gestione dell'alimentazione: Tutta l'alimentazione è stata fornita al prototipo utilizzando una batteria al litio da 12 V. La batteria è stata acquistata con un caricatore. Il ventilatore è collegato direttamente alla batteria e lo strumento non funzionerà senza una carica sufficiente nella batteria principale. La SBC è alimentata da una batteria al litio-polimero a bordo (un pacchetto batteria PiJuice™) tramite un regolatore da 12 a 5 V. Il piano operativo per il sistema di alimentazione è il seguente:  
1) L'operatore carica la batteria principale da 12 V nell'unità durante la notte e eventualmente durante le pause, ad esempio durante gli spostamenti da un impianto all'altro.  
2) Il pacchetto PiJuice viene caricato dalla batteria principale e non richiede attenzione diretta da parte dell'utente.  
  
\* https://www.adafruit.com/product/1085?gclid=Cj0KCQiAmKiQBhClARIsAKtSj-mfjMTuiiBfQe9myI45V6en-MEQ9GxW7dEGcl1MfewyX5R6\_fjnoFu0aAqAXEALw\_wcB  
† I2C o 𝐼𝐼2𝐶𝐶 è un protocollo di comunicazione seriale comunemente utilizzato che può ospitare più componenti slave su una singola connessione seriale. Vedi, ad esempio, https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C  
‡ https://uk.pi-supply.com/products/pijuice-standard?\_pos=21&\_sid=4a1f56936&\_ss=r,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
23  
3) L'SBC rimane alimentato quando la batteria principale viene scollegata o scaricata, per 1-3 ore, consentendo l'upload dei dati e altre operazioni di manutenzione. Ciò impedisce anche la perdita di impostazioni, ecc. se la batteria principale si scarica durante l'uso.  
3.1.3 Architettura del software  
Il software che esegue l'OS-HFS è scritto in Python, un linguaggio interpretato indipendente dalla piattaforma. Gli elementi dell'interfaccia utente sono attualmente implementati utilizzando PyQt5, ma l'approccio modulare del software consente una facile sostituzione di altre librerie per l'interfaccia utente. L'architettura del software assomiglia molto all'architettura hardware in quanto è implementata utilizzando un approccio orientato agli oggetti (vedi Figura 9). Le classi "Reader" comunicano direttamente con ogni sensore o dispositivo periferico in base alle schede tecniche dei produttori e a eventuali comportamenti non documentati osservati durante i test. Ogni classe di lettore mappa comandi e risposte appropriati a un livello inferiore specifici per ogni sensore in una coda comune di comandi/risposte per l'utilizzo in altre funzioni dello strumento. Una classe "Hi Flow" coordina le funzioni critiche dell'OS-HFS emettendo comandi, ricevendo risposte, eseguendo calcoli e aggiornando l'interfaccia utente. Questa classe gestisce anche l'I/O dei file e la memorizzazione dei dati di misurazione. Il software prototipo attuale è stato fornito a CARB ed è identificato nell'Appendice A. Poiché l'OS-HFS è implementato su un SBC con un sistema operativo Linux completo anziché su un microcontrollore, la visualizzazione e l'interfacciamento dei dispositivi sono semplificati e le capacità di rete sono intrinseche al sistema operativo del SBC, inclusi Wi-Fi, Ethernet e Bluetooth. L'implementazione attuale è realizzata come un'applicazione desktop, ma l'SBC potrebbe facilmente servire l'applicazione su un'interfaccia web in cui sarebbe disponibile su qualsiasi dispositivo mobile con Wi-Fi e un browser web.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alta portata open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
24  
  
Figura 9: Schema dell'architettura del software. Classi personalizzate in Python interagiscono con librerie native o con sensori fisici direttamente. L'architettura del software segue l'approccio modulare dell'architettura fisica.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
25  
Il prototipo migliora l'esperienza dell'utente fornendo informazioni dettagliate all'utente su un display a colori touch screen. Dal display, l'utente può visualizzare tutti i parametri dello strumento, calibrare i sensori e eseguire controlli di sistema.   
L'utente può anche salvare i dati dello strumento elettronicamente utilizzando un ciclo di misurazione automatizzato o avviare e interrompere una misurazione "manuale" che cattura dati in serie temporali senza intervento dello strumento. Alla fine di ogni misurazione, vengono forniti i tassi di perdita e i dati di riepilogo insieme agli indicatori di qualità dei dati. Utilizzando un SBC, i dati possono essere registrati in formati di file standard e accessibili tramite trasferimento di file e connettività con altri dispositivi. Ciò apre anche la possibilità di trasferimento di dati in tempo reale abbinando l'OS-HFS con dispositivi ausiliari tramite Wi-Fi o Bluetooth®.  
Una schermata del GUI OS-HFS è mostrata nella Figura 10.  
I dati di tempo e posizione sono sempre mostrati nella casella dell'intestazione in alto dello schermo. Questi dati sono forniti direttamente dall'unità GPS e sono quindi sempre corretti, con un offset minimo rispetto al tempo reale. Diverse schede forniscono accesso alle varie funzioni necessarie per il funzionamento del dispositivo, compreso l'accesso diretto ai sensori dello strumento (chiamati "INIR" e "Nano" in tutto questo rapporto; vedere la sezione 3.2.3) per eseguire calibrazioni di zero, span e offset. Vengono visualizzati anche i parametri generali del dispositivo e sono disponibili altre interazioni basate su comandi.  
La scheda di misurazione ("Misura", Figura 10) è di maggior interesse durante le attività di misurazione. Qui, l'operatore può abilitare o disabilitare il ventilatore e modificare il setpoint del ventilatore. Viene mostrata anche l'impostazione corrente del PWM insieme alla velocità del ventilatore in rpm. Viene inoltre mostrato il flusso di campione misurato insieme alla concentrazione misurata da ciascun sensore e alla classificazione del peso molecolare del gas fornita dal sensore Nano. Infine, viene mostrato il tasso di flusso di perdita e tracciato su un grafico delle serie temporali. La stabilità delle concentrazioni mostrate su questo grafico fornisce uno strumento prezioso per i praticanti esperti di HFS.  
Figura 10: Esempio di scheda GUI come mostrato su un display heads-up o su un desktop virtuale accessibile da uno smartphone, tablet o PC remoto. Lo screenshot è stato preso durante una sessione di debug, non durante una misurazione effettiva.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
26  
I pulsanti Auto, Manuale e Stop vengono utilizzati per salvare i dati su un file di testo delimitato che include tutti i parametri di input disponibili e i calcoli risultanti. Il pulsante Auto avvia un ciclo di misurazione temporizzato che si interrompe automaticamente e salva un file di misurazione al termine.   
La modalità Auto implementa una misurazione fugace tipica e il timer è impostato su un periodo di misurazione di due minuti per impostazione predefinita. Estensioni future del software potrebbero automatizzare ulteriormente il processo di misurazione seguendo l'outline nella sezione Appendice B, inclusa la regolazione automatica del flusso. Questo tipo di implementazione potrebbe potenzialmente ridurre i requisiti di formazione per gli operatori.  
Il pulsante Manuale consente all'operatore di eseguire una misurazione più lunga, ma richiede che venga premuto il pulsante Stop per concludere la misurazione. Un timeout predefinito può essere impostato per intervenire se una misurazione non viene interrotta manualmente. Questa modalità è destinata a misurazioni a lungo termine, ad esempio per stimare le emissioni da fonti variabili nel tempo. Può essere utilizzato un tempo di campionamento rappresentativo a discrezione dell'operatore fino alla durata della batteria dell'unità.  
Tutti i dati di flusso delle perdite vengono mostrati sul grafico della serie temporale. Durante una misurazione attiva (sia in modalità Auto che Manuale), i punti dati vengono mostrati in giallo per differenziarli dai punti inattivi sul grafico che sono stati raccolti prima dell'inizio della misurazione e per indicare che è in corso una misurazione. Nella versione 1 del prototipo, il sensore INIR è stato considerato il sensore principale e il tasso di emissione stimato è stato calcolato in base al suo output, come si può vedere nella Figura 10.  
Nota: Il team del progetto ha fatto ogni tentativo per utilizzare solo librerie software open-source per l'unità prototipo. Tuttavia, chiunque adotti il design OS-HFS dovrebbe verificare tutte le librerie utilizzate per assicurarsi che il loro utilizzo sia compatibile con le licenze delle librerie.  
  
3.2 Selezione dei Componenti Chiave  
3.2.1 Ventilatore  
Il manuale utente per il BHFS19 afferma che il dispositivo può produrre un massimo di ~10 SCFM (283 LPM) a flusso iniziale con batteria piena. Il tasso di perdita misurabile è indicato come 0.05-8.0 SCFM (1.42-226 LPM), anche se il dispositivo visualizzerà letture fino a 0.1 LPM quando la modalità di visualizzazione è impostata su LPM. I test mostrano che mentre il display del BHFS riporta letture al di sotto del limite inferiore dichiarato, l'accuratezza è discutibile e potrebbe essere che il limite inferiore dichiarato di 1.42 LPM sia quello che ancora soddisfa l'accuratezza di sistema dichiarata (± 10% rispetto alla lettura del tasso di perdita in volume, metano). Calcoli preliminari effettuati utilizzando varie combinazioni di ventilatori e sensori presi in considerazione hanno indicato che 0.1 SLPM era un obiettivo ragionevole per un limite inferiore utilizzabile nell'OS-HFS. Allo stesso modo, il limite superiore di destinazione per il design OS-HFS è stato fissato a 12-15 SCFM (336-420 SLPM). Questo obiettivo amplierebbe le capacità del BHFS di circa il 50% consentendo comunque al prototipo di essere un dispositivo più compatto.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
27  
Il BHFS utilizza il motore soffiatore GVP-100 di 3M™ per creare il flusso che aspira le emissioni e l'aria in eccesso nel dispositivo. Il GVP-100 è un componente di un sistema di respirazione a purificazione dell'aria alimentato, commercializzato da 3M, che comprende il soffiatore, un cavo di alimentazione e un pacco batteria. Il sistema di respirazione è stato classificato come intrinsecamente sicuro per l'uso in ambienti pericolosi. Le curve di prestazione per il soffiatore GVP-100 non sembravano essere facilmente disponibili, quindi è stato creato un banco di prova per sviluppare una curva di prestazione del ventilatore come base per identificare sostituti adatti. Un'unità BHFS di riserva (non funzionante) è stata fornita al progetto da Heath Consultants Inc. Il soffiatore è stato rimosso e testato applicando la massima potenza e bloccando gradualmente l'uscita, monitorando la pressione statica prodotta man mano che diminuiva il flusso. Questa procedura è una versione semplificata della procedura di test formale utilizzata per caratterizzare ventilatori e soffiatori nell'industria.   
32. La curva del ventilatore risultante è mostrata nella Figura 11. Curve di ventilatori simili possono essere ottenute dai produttori di ventilatori; altre unità prese in considerazione sono mostrate nella Figura 11, a scopo di confronto.  
  
Figura 11: Confronto delle curve dei ventilatori per il soffiatore GVP-100 utilizzato nel BHFS rispetto ad altri modelli presi in considerazione da San Ace e Delta Fan. La traccia gialla (San Ace (ventilatore)) mostra le prestazioni di un ventilatore assiale, a scopo di confronto. Le curve di prestazione per il GVP-100, Delta e San Ace sono tipiche dei soffiatori centrifughi.  
  
Nella scelta di un ventilatore per una determinata applicazione, il ventilatore dovrebbe essere scelto in modo tale da essere generalmente utilizzato al di sotto della regione di stallo (la regione in cui, partendo dal flusso massimo e seguendo la curva, la curva inizia a livellarsi). Pertanto, i flussi desiderati dovrebbero essere disponibili quando la pressione statica necessaria è al di sotto della regione di stallo. Nella Figura 11, la curva per un ventilatore assiale (San Ace (ventilatore)) è mostrata insieme alle curve di prestazione per i soffiatori centrifughi - due comuni design di ventilatori utilizzati nelle applicazioni di raffreddamento elettronico. La forma della curva del GVP-100 indica che è probabilmente un soffiatore centrifugo, il che non era evidente osservando il design del suo involucro. Per un flusso simile, dimensioni del pacchetto e consumo di energia, i soffiatori centrifughi sono generalmente in grado di produrre una pressione statica più elevata a un determinato flusso rispetto ai ventilatori assiali. Osservando la curva gialla (San Ace (ventilatore)), il ventilatore assiale mostra una riduzione più drastica del flusso con l'aumento della pressione statica. Pertanto, i soffiatori centrifughi dovrebbero fornire un flusso più stabile che è meno sensibile alle variazioni della contro-pressione. Questa caratteristica può essere vantaggiosa durante le misurazioni sul campo in cui è presente una vasta gamma di pressioni di ritorno.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
28  
Si incontreranno una varietà di situazioni di misurazione che probabilmente richiederanno una varietà di accessori per raccogliere le emissioni.  
È necessario prestare particolare attenzione per garantire che il ventilatore sia sicuro per l'uso a diretto contatto con miscele di gas/aria che possono trovarsi nei limiti di infiammabilità. Ciò indica automaticamente l'utilizzo di motori senza spazzole adatti o certificati per l'uso in luoghi pericolosi (ad esempio, UL Class/Division, ATEX, Haz-Loc, IECEx, ecc.). Per comprendere meglio le caratteristiche di un ventilatore intrinsecamente sicuro, prima è stato smontato il GVP-100 del BHFS di scorta per studiarne la costruzione. Come mostrato nella Figura 12, il ventilatore era principalmente costruito in plastica con un albero metallico e un piccolo motore elettrico. Tutti i collegamenti elettrici direttamente a contatto con il flusso erano racchiusi in resina epossidica, e le superfici interne a contatto con il flusso erano sigillate dall'esterno. Il ventilatore era di tipo centrifugo, in linea con i risultati dei test della curva della ventola.  
Una ricerca di ventilatori centrifughi CC certificati per l'uso in luoghi pericolosi non ha identificato unità disponibili commercialmente. Conversazioni con diversi produttori hanno rivelato un'azienda disposta a produrli su contratto con un ordine minimo specificato e un periodo di produzione, insieme a tariffe per servizi di ingegneria e certificazione. Sono stati identificati anche altri due produttori che hanno recentemente iniziato a produrre ventilatori con classificazione ATEX. Entrambi i produttori stavano producendo ventilatori assiali per l'uso con alimentazione di rete in corrente alternata. Quando sono stati interrogati sulla disponibilità di ventilatori centrifughi CC con certificazione ATEX, entrambi i produttori hanno dichiarato che l'applicazione prevista per i ventilatori assiali ATEX era in nuove unità di refrigerazione commerciale che utilizzano idrocarburi come fluido di lavoro. Hanno affermato che un ventilatore centrifugo CC certificato non sarebbe probabilmente prodotto a meno che non ci fosse una domanda di mercato simile, nuova e diffusa.  
I ventilatori assiali con classificazione ATEX di entrambi i produttori avevano numeri di parte simili che designavano unità non ATEX con specifiche altrimenti identiche. Le unità non ATEX erano classificate IP68 contro l'ingresso di acqua e polvere e presentavano connessioni elettriche incapsulate e materiali non scintillanti, molto simili al GVP-100. Per confrontare le unità con e senza classificazione, è stato acquisito e smontato un modello di ventilatore di ciascun tipo per uno studio, rivelando poche, se non nessuna, differenza tra le due unità. L'unica differenza osservata era così insignificante che potrebbe essere attribuibile a variazioni di produzione. Il produttore ha rifiutato di commentare su questa questione.  
Sulla base di questo risultato, il team del progetto ha fatto due ipotesi. In primo luogo, è probabile che le unità CC non siano certificate ATEX a causa della mancanza di domanda e, in secondo luogo, l'ingegneria necessaria per realizzare un ventilatore ATEX - Figura 12: All'interno del motore del ventilatore GVP-100 di 3M utilizzato nel BHFS. Il ventilatore è certificato per l'uso in aree pericolose. Tutti i collegamenti elettrici interni sono incapsulati. L'alloggiamento interno (in alto a sinistra) è caratteristico di un design di ventilatore centrifugo.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
29  
È probabile che l'unità conforme fosse di piccole dimensioni. Il team ha scelto il San Ace 97W, una ventola centrifuga alimentata a corrente continua con classificazione IP68, per l'utilizzo nel prototipo. Le unità di produzione o i prototipi successivi potrebbero richiedere l'utilizzo di altre ventole o la stipula di un contratto con il produttore per lo sviluppo delle certificazioni corrette. Sono state acquisite due unità e una è stata smontata per lo studio. Il team del progetto ha trovato connessioni e componenti elettrici incapsulati, con componenti realizzati in alluminio, acciaio inossidabile, ottone e plastica. Tuttavia, l'involucro non era ermetico al gas e presentava aperture di ventilazione o fori di drenaggio nell'involucro. Per l'utilizzo nel prototipo, questi sono stati sigillati con adesivo al silicone per contenere completamente il flusso all'interno dell'involucro.  
  
3.2.2 Misurazione del flusso  
Un misuratore di flusso a piastra orifizio è una tecnica di misurazione del flusso standardizzata e ben documentata, con un design semplice e un basso numero di componenti che è relativamente facile da implementare. Un misuratore di flusso a piastra orifizio funziona misurando la caduta di pressione causata dall'aumento della velocità del flusso in presenza di una restrizione di flusso a bordo affilato all'interno di una condotta chiusa. Diversi documenti descrivono le considerazioni di progettazione e le incertezze associate ai misuratori di flusso a piastra orifizio, tra cui il rapporto AGA 3.1.33 e il documento ISO 5167. Un misuratore di flusso a piastra orifizio è stato anche utilizzato nel BHFS. Le misurazioni del flusso riportate dal BHFS sono state confrontate con un elemento di flusso laminare recentemente calibrato in un intervallo di flusso tra 100 e 250 LPM e si sono rivelate concordare entro il 5%, come specificato nel manuale del BHFS. Date le prestazioni della misurazione del flusso del BHFS e la facilità di implementazione, è stato selezionato un misuratore di flusso a piastra orifizio per l'uso nell'OS-HFS.  
  
Il flusso e l'incertezza associata riportati da un misuratore di flusso a piastra orifizio costruito e implementato secondo gli standard ISO e AGA dovrebbero essere ben caratterizzati; le misurazioni effettuate senza ulteriori calibrazioni dovrebbero rientrare nelle tolleranze specificate, per progetto. Spesso, una calibrazione del misuratore viene utilizzata per tener conto di eventuali deviazioni inevitabili e per caratterizzare un misuratore specifico, in situ. Il risultante "fattore del misuratore" caratterizza le deviazioni del misuratore in fase di calibrazione rispetto al flusso attraverso uno strumento di riferimento. Il fattore del misuratore viene quindi applicato alle letture in uso per allinearle allo standard di riferimento. L'OS-HFS utilizza questo tipo di calibrazione indipendente e correzione.  
  
Lo standard ISO 5167 offre indicazioni dettagliate sulla costruzione di un misuratore di flusso a piastra orifizio. Tuttavia, la guida non copre le piastre orifizio per l'uso in condotte con diametro inferiore a 50 mm o a numeri di Reynolds inferiori a 5000. I numeri di Reynolds calcolati per i flussi target dell'OS-HFS superavano generalmente i 5000 in una condotta con diametro di 2 pollici, rendendo questo un punto di partenza adatto per il design. La condotta da 2 pollici supportava anche il desiderato aumento del flusso rispetto al BHFS, pur supportando un pacchetto simile o più piccolo con requisiti di potenza simili.  
  
L'accuratezza pratica ottenibile con una piastra orifizio costruita in conformità agli standard sarà limitata dall'accuratezza della misurazione della pressione differenziale e da eventuali fattori ambientali presenti che influenzano tale accuratezza. L'accuratezza può anche essere limitata dall'incertezza del coefficiente di scarico, che viene determinato sperimentalmente o da dati empirici.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
30 equazioni basate su un gran numero di esperimenti. Il rapporto dell'incertezza nel coefficiente di scarico empirico (𝐶𝐶𝑑𝑑) a un dato numero di Reynolds (Re) rispetto all'incertezza in 𝐶𝐶𝑑𝑑 a un Re infinito è minimizzato quando il rapporto di diametro β è ~0,56; queste dimensioni sono state utilizzate per l'OS-HFS.  
  
Durante i test della curva di flusso del ventilatore per il GVP-100 è stato osservato che la massima pressione statica prodotta era di circa 1,5 in H2O. L'originale BHFS era dotato di un sensore di pressione differenziale (Δ𝑃𝑃) con un intervallo di circa 15 in H2O (MPX5004DP). Le curve del ventilatore pubblicate dai produttori di soffiatori mostravano una pressione statica massima di 1,5 in H2O a flusso zero. Ciò significava che l'intero intervallo del sensore utilizzato nell'BHFS non sarebbe stato necessario nella pratica e che la risoluzione dello strumento poteva essere migliorata sostituendo un sensore con un intervallo ridotto. L'OS-HFS utilizza un sensore con un intervallo di ± 2 in H2O per migliorare la risoluzione, che copre le differenze di pressione attese ma protegge il sensore da sovrapressioni in caso di blocco completo dello scarico. Il sensore scelto ha un'accuratezza del ± 0,25% (rispetto al ± 1,5% del sensore dell'BHFS). La combinazione di un intervallo limitato e una migliore accuratezza migliora la risoluzione e l'accuratezza complessiva della misurazione del flusso dell'OS-HFS rispetto a quella dell'BHFS.  
  
La misurazione del flusso dell'OS-HFS è stata calibrata utilizzando la diluizione del gas tracciante in conformità con la designazione ASTM E2029-1135. Metano di grado CP (Airgas, Inc.) è stato misurato a un flusso costante di 13 SLPM\* attraverso un orifizio critico e introdotto all'ingresso del tubo del campione dell'OS-HFS. La pressione e la temperatura a monte sono state monitorate per la coerenza e il flusso a valle è stato verificato con un provatore volumetrico (Bios DryCal) che riporta in unità standard. Un analizzatore di metano (QC-TLDS, Aerodyne Research Inc.) ha misurato il metano all'uscita dell'OS-HFS prelevando un campione da un ingresso posizionato al centro della camera del sensore dell'OS-HFS. La gamma di misurazione dell'analizzatore di metano è di 0-200 ppm di metano con una precisione di 1 secondo di 0,3 ppb. Durante i test, il controllore PWM del ventilatore dell'OS-HFS è stato utilizzato per variare il setpoint tra il 20% e il 100% di duty. Il flusso di gas tracciante al metano è stato mantenuto costante. Le letture del metano variavano tra 30 e 60 ppm durante i test; le concentrazioni di metano di fondo (nell'aria ambiente) sono state prese tra ogni setpoint PWM per calcolare l'aumento dovuto al flusso di gas tracciante.  
  
Questa procedura di calibrazione è stata eseguita due volte. Entrambi i test sono stati eseguiti a Fort Collins, CO, ad un'altitudine di 5.003 ft sopra il livello del mare a una pressione di stazione di circa 12,2 psia. Il primo test è stato eseguito il 9/7/2021, a una temperatura ambiente di 27 °C utilizzando un tubo antistatico da 2 pollici all'ingresso dell'OS-HFS. I risultati sono confrontati nella Figura 13, prima per un 𝐶𝐶𝑑𝑑 costante basato sulla formulazione empirica trovata negli standard, e poi con un 𝐶𝐶𝑑𝑑 specifico del misuratore sviluppato come funzione di Δ𝑃𝑃, cioè risolvendo per il 𝐶𝐶𝑑𝑑 sconosciuto in ogni punto di test. Per i parametri del design dell'OS-HFS, il 𝐶𝐶𝑑𝑑 empirico era 0,637, mentre il 𝐶𝐶𝑑𝑑 specifico del misuratore varia tra 0,674 e 0,656 per Re che varia da 6,8x103 a 12,6x103. La massima Δ𝑃𝑃 raggiunta durante i test è stata di 0,72 in.  
  
\* Le condizioni standard sono 25 °C / 1 atmosfera in tutto.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
31  
H2O. In questa configurazione, l'OS-HFS è stato in grado di raggiungere un flusso massimo di 442 SLPM, che era ben allineato con l'obiettivo di progettazione.   
  
Nel successivo test, il tubo flessibile antistatico utilizzato durante il primo test si è rivelato troppo rigido per un uso pratico quando è stato testato presso l'impianto METEC della CSU. Pertanto, l'OS-HFS è stato modificato per utilizzare il tubo flessibile del BHFS. Una seconda calibrazione è stata effettuata utilizzando il tubo flessibile del BHFS il 19/12/2021 con una temperatura ambiente media di 19 °C. In questa configurazione, l'OS-HFS è stato in grado di raggiungere un flusso massimo di 316 SLPM, come mostrato nella Figura 13. In questa configurazione, il 𝐶𝐶𝑑𝑑 variava da 0,677 a 0,651 per Re compresi tra 4,6x103 e 9,8x103. La massima Δ𝑃𝑃 sviluppata era di 0,36 in H2O. Come si può vedere sia nella Figura 13 che nella Figura 14, il coefficiente di scarico empirico differisce da quelli ottenuti specificamente per l'OS-HFS mediante calibrazione diretta. In entrambi i casi, il 𝐶𝐶𝑑𝑑 variava con il flusso (e quindi Δ𝑃𝑃) e i risultati sono stati migliorati applicando il 𝐶𝐶𝑑𝑑 come funzione di Δ𝑃𝑃. In ogni caso, un singolo 𝐶𝐶𝑑𝑑 di 0,667 probabilmente sarebbe adatto per i range di flusso testati e non degraderebbe molto l'accuratezza.  
3.2.3 Misurazione della concentrazione  
Il BHFS utilizzava un sensore a pellistore (ad esempio, serie SGX Sensortech VQ549ZD) che veniva utilizzato sia in modalità di ossidazione catalitica che di conducibilità termica. Il sensore non è specifico per il metano e la sua uscita varia in base alla composizione del gas. La natura catalitica del sensore lo rende vulnerabile sia alla saturazione che all'avvelenamento da altre specie di gas che possono essere incontrate nell'uso sul campo (ad esempio, idrocarburi superiori, nebbia di olio, H2S, ecc.).  
L'implementazione precisa del sensore all'interno del BHFS è un segreto commerciale, ma molti hanno osservato un "comportamento di transizione" intorno al 5% di concentrazione, che generalmente si assume essere il punto di transizione.  
Figura 13: Prima calibrazione del misuratore di flusso OS-HFS effettuata nel luglio 2021 utilizzando un tubo flessibile antistatico con diametro di 2 pollici.  
Figura 14: Seconda calibrazione del misuratore di flusso OS-HFS effettuata il 19/12/2021 utilizzando il tubo di ingresso del BHFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
32  
transizione tra la modalità di ossidazione catalitica e la modalità di conducibilità termica, o la transizione tra le curve di calibrazione. Questa transizione può essere notata osservando il numero di cifre visualizzate sullo schermo BHFS; non viene visualizzata nessun'altra indicazione.  
L'obiettivo della selezione dei sensori per l'OS-HFS era (a) alleviare i problemi identificati dei sensori, (b) modernizzare la comunicazione tra la SBC e i sensori, (c) mitigare altri problemi di utilizzo pur selezionando sensori facilmente disponibili e a costo moderato. Un'indagine di mercato ha indicato che i sensori di tipo componente e i moduli mirati alle applicazioni industriali soddisfacevano questi requisiti, come mostrato nella Figura 15.  
  
Figura 15: Strategia di selezione dei sensori per lo sviluppo dell'OS-HFS. Evitare sensori a basso costo con scarsa precisione e evitare sensori costosi con grande precisione, ma dimensioni maggiori. Concentrarsi su sensori industriali compatti, facilmente disponibili, con precisione ragionevole e convenienza.  
  
Due sensori si sono distinti in base alle specifiche del produttore, alla disponibilità e al costo (Figura 16):  
1. SGX INIR-ME100\*, un sensore a infrarossi non dispersivo (NDIR). Le principali affermazioni del datasheet includono un'operazione "Triple Range" (0-1 %v, 1-4 %v, >4 %v), una risoluzione fino a 10 ppm e un LDL di 100 ppm.  
  
2. Nevado Nano MPS flammable gas sensor†, che il produttore chiama "spettrometro di proprietà molecolari" con una certa capacità di differenziare tra specie di gas (o miscele) in base al peso molecolare medio. Le principali affermazioni del datasheet includono il rilevamento del metano.  
  
\* https://sgx.cdistore.com/products/detail/inirme100-sgx-sensortech/578557/  
† https://nevadanano.com/mps-flammable-gas-sensor/,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
33  
intervallo da 0-100% LEL, una risoluzione dello 0,1% LEL, un'accuratezza di ± 3% del LEL da 0 a 50% LEL. Durante il funzionamento, il sensore poteva anche riportare in percentuale di volume (invece che in percentuale di LEL) ed è stato utilizzato in tale modalità nell'OS-HFS.  
Entrambi i sensori sono pacchetti integrati con diagnostica e controllo a bordo, richiedendo solo connessioni di alimentazione e comunicazione. L'intento del design iniziale era quello di utilizzare l'ampio intervallo e l'alta risoluzione del sensore INIR come sensore primario, e il Nano come sensore secondario per fornire correzioni o calibrazioni aggiuntive in base al tipo di gas misurato. Ad esempio, il Nano può distinguere tra 6 classi di gas o miscele di gas. Ciò consentirebbe di passare tra una famiglia di calibrazioni integrate per il sensore INIR al fine di migliorare l'accuratezza delle misurazioni effettuate in varie posizioni nella catena di approvvigionamento del gas naturale con composizioni variabili.  
  
Figura 16: Il sensore di gas infiammabili SGX INIR-ME100 e il sensore di gas infiammabili Nevada Nano MPS sono stati scelti per l'uso nel prototipo OS-HFS.  
Per comprendere il comportamento e le prestazioni dei sensori, è stato sviluppato un banco di prova per sensori in grado di contenere 2 sensori INIR e 2 sensori Nano come mostrato nella Figura 17. Al momento dei test, è stato scoperto che i sensori INIR utilizzavano diverse versioni del firmware (2.25 e 2.33); gli utenti del design OS-HFS potrebbero desiderare di controllare questa variabile, poiché le prestazioni e l'interfacciamento potrebbero differire tra le revisioni del firmware. I test hanno caratterizzato le prestazioni di ciascun sensore su una gamma di concentrazioni di gas e pressioni atmosferiche variabili. Si è scoperto che l'INIR ha una dipendenza dalla pressione costante, non trascurabile, come indicato nel datasheet. Il Nano ha mostrato una variazione molto inferiore con la pressione.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
Figura 17: Camera di prova per la calibrazione e caratterizzazione del sensore prototipo.  
Durante i test, sono state generate miscele di metano/aria utilizzando orifizi a flusso strozzato (O'Keefe) e provatori volumetrici calibrati (Bios DryCal). Le miscele di gas sono state introdotte nella camera di campionamento tra 0,5 e 1 SLPM. È stato utilizzato un regolatore di pressione di ritorno per monitorare la pressione all'interno della camera. Le pressioni sono state variate tra 85 kPa e 100 kPa per ogni miscela di concentrazione di gas introdotta. Sono stati effettuati test con concentrazioni nominali di 200, 500, 1000, 2500 e 5000 ppm, 1, 1,5, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60 e 80% di metano in volume nell'"aria di laboratorio" che era stata filtrata e asciugata mediante filtri coalescenti e particolari.  
Prima di ogni test, l'INIR è stato azzerato e calibrato secondo le linee guida del produttore, con la camera mantenuta a 90 kPa. Il Nano non richiede una calibrazione dell'utente ed è calibrato in fabbrica per cinque anni. Durante i test è stato osservato che il Nano sembra "autocalibrarsi" durante l'accensione e la presenza di gas o pressione ambientale può influenzare l'output a seconda delle condizioni presenti all'accensione. Di conseguenza, è necessario fare attenzione a presentare solo concentrazioni di aria di fondo al sensore all'accensione.  
Un esempio di serie temporale di uno di questi test è mostrato nella Figura 18.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
Figura 18: Esempio di acquisizione dati dalla caratterizzazione del sensore. L'output del sensore INIR varia maggiormente con la pressione ambientale rispetto al sensore Nano.  
In breve, è stata introdotta una miscela di metano-aria al 1,5% in volume nella camera di campionamento a 85 kPa fino a quando le letture del sensore si sono stabilizzate. Una volta stabilizzate, i dati sono stati registrati per 5 minuti. Successivamente, la pressione è stata cambiata a 90 kPa e le letture sono state lasciate stabilizzare prima di essere registrate nuovamente. Questa procedura è stata ripetuta a 95, 100 e di nuovo a 85 kPa per una varietà di concentrazioni di gas. Questo test è stato effettuato nel corso di diversi giorni durante febbraio e marzo 2021.  
  
Dai test risulta evidente che la risposta del sensore INIR è lineare nell'intervallo di concentrazioni testate e che vi è una forte dipendenza dalla pressione, come mostrato nella Figura 19. Le letture sono consistenti alla pressione di calibrazione di 90 kPa, inferiori del 10% a 85 kPa e superiori del 10% a 95 kPa.  
Pertanto, il sensore INIR richiede una calibrazione e una correzione per la pressione atmosferica prevalente. Il sensore INIR è stato testato sia con che senza un punto di calibrazione offset. Come indicato nel manuale, questo passaggio non sembra essere necessario con il firmware attuale e non sembra offrire un miglioramento significativo delle prestazioni.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
Figura 19: Il sensore INIR mostra una forte dipendenza dalla pressione ambientale. Una variazione di 5 kPa rispetto alla linea di base di 90 kPa utilizzata per la calibrazione comporta una variazione del 10% nell'intervallo testato.   
La risposta del Nano ai cambiamenti di pressione è meno pronunciata rispetto all'INIR, leggendo il 1% in meno rispetto alla linea di base di 90 kPa a 85 kPa e il 2% in più a 95 kPa. Il Nano sottostima la concentrazione presente considerando i risultati a piena scala, come mostrato nella Figura 20. È stato anche osservato che il Nano riporta una concentrazione del 0% quando la concentrazione effettiva scende al di sotto di 1500 ppm e riporta letture quando la concentrazione effettiva è superiore a 1500 ppm.  
  
Figura 20: L'output del sensore Nano mostra una minore dipendenza dalla pressione ma sembra costantemente sottostimare la concentrazione di gas.  
  
3.2.4 Misurazione della concentrazione di sfondo  
L'uso di un sensore di sfondo è inteso a considerare eventuali concentrazioni elevate di gas nell'aria di diluizione ambientale aspirata nell'strumento HFS insieme alla sorgente di perdita misurata.   
Tipicamente, la concentrazione di gas di sfondo viene sottratta dalla concentrazione di gas misurata all'interno dello strumento per rimuovere il suo contributo al tasso di emissione riportato. Questa situazione può verificarsi, ad esempio, in caso di una piccola perdita all'interno di un edificio chiuso con scarsa ventilazione. Se la,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
37  
Quando l'operatore cattura completamente la fonte di perdita, l'aria contaminata che viene aspirata insieme ad essa provoca una risposta aggiuntiva del sensore, inflazionando artificialmente la misurazione riportata. Un sensore di background sull'apparecchio potrebbe sottrarre il contributo di background e riportare il vero tasso di emissione dalla perdita catturata. Questo esempio assume che il sensore di background stia misurando un background veramente elevato e non una porzione di aria contenente residui della fonte di emissione, altre fonti di emissione vicine o l'esaurimento del campionatore ad alto flusso stesso. Più comunemente, un cattura incompleta viene rilevata dal sensore di background, abbassando ulteriormente il tasso di emissione riportato dalla fonte.  
Un sensore di background posizionato vicino all'ingresso del campione potrebbe essere utile come indicatore di cattura incompleta, ma sarebbe difficile includerlo correttamente nella strategia di misurazione in tutti i possibili scenari. Per questo motivo e dato che le quantificazioni del campionatore ad alto flusso sono normalmente accoppiate con un mezzo primario di rilevamento, come un sensore portatile o una telecamera OGI, il team del progetto ha deciso di eliminare questa funzionalità dal prototipo OS-HFS.  
3.3 Analisi dell'accuratezza  
Una volta assemblato il prototipo OS-HFS, sono state condotte diverse serie di test per quantificare le sue prestazioni e individuare eventuali miglioramenti necessari. I test avevano lo scopo di quantificare il limite inferiore di rilevamento, valutare l'accuratezza complessiva della quantificazione, determinare gli effetti delle diverse composizioni di gas e condurre test di utilizzo pratico su "apparecchiature reali" presso l'impianto METEC della CSU. Per ciascuno dei test, le letture dei due sensori integrati (INIR e Nano) sono state utilizzate per calcolare i risultati in modo indipendente anziché utilizzare il Nano come sensore ausiliario come originariamente previsto, anche se l'uso del Nano come sensore ausiliario per il tipo di gas potrebbe essere utile con ulteriori sviluppi. Sono stati effettuati diversi test di follow-up nel tentativo di identificare i bias osservati nei test iniziali.  
I metodi di test sono descritti in maggior dettaglio nella Sezione 4.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
38  
3.3.1 Limite inferiore di rilevamento  
  
Figura 21: Limite inferiore di rilevamento del sensore INIR del prototipo OS-HFS.  
  
Figura 22: Limite inferiore di rilevamento del sensore Nano del prototipo OS-HFS.  
I limiti inferiori di rilevamento (LDL) sono stati testati con il flusso di campionamento OS-HFS impostato a ~150 SLPM. Sono stati testati diversi punti dati vicino al LDL previsto ed è stata eseguita una regressione logistica per il rilevamento vs non rilevamento dell'emissione di origine. Va notato che il LDL riportato qui indica solo il flusso di gas di prova più basso a cui l'HFS ha riportato un tasso di emissione diverso da zero e non dice nulla sull'accuratezza del valore riportato. In base alle schede tecniche del sensore, l'INIR ha un LDL dichiarato di 100 ppm, equivalente approssimativamente a un LDL di 0,015 SLPM. Tuttavia, durante i test questi sensori non hanno rilevato concentrazioni con un'accuratezza significativa molto al di sotto di 1.000 ppm.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
39  
  
portando ad un LDL atteso di 0,15 SLPM. Il LDL osservato nei test di sistema era vicino a questa cifra: 0,178 SLPM. Il datasheet del sensore Nano indica un intervallo di rilevamento del 0-100% di LEL (5% vol/vol per il metano) con un'accuratezza del ± 3% di LEL. Interessantemente, durante i test è stato osservato che il sensore Nano riportava 0 una volta che la concentrazione di prova scendeva al di sotto di 1.500 ppm e riprendeva a riportare valori una volta che la concentrazione di prova era superiore a 1.500 ppm. Ciò porterebbe ad un LDL atteso di 0,225 SLPM, mentre il LDL osservato era leggermente più alto, pari a 0,370 SLPM.  
3.3.2 Precisione di quantificazione  
  
Figura 23: Precisione di quantificazione del sensore prototipo OS-HFS INIR.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
40  
  
Figura 24: Precisione di quantificazione del sensore prototipo OS-HFS Nano.  
I test di precisione di quantificazione sono stati eseguiti nell'intervallo utilizzabile del prototipo OS-HFS.  
Ogni tasso di emissione è stato misurato con due impostazioni di flusso:  
1) I tassi di emissione inferiori a 30 SLPM utilizzavano flussi di 175 e 275 SLPM per migliorare la sensibilità.  
2) I tassi di emissione superiori a 30 SLPM utilizzavano flussi di 275 e 300 SLPM per garantire la cattura completa.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
41  
Sono stati utilizzati quattro diversi allestimenti sperimentali per generare flussi di riferimento "veri tassi di perdita" come base di confronto:  
1) Per i punti di prova a basso flusso (inclusi anche nei test LDL), le perdite sono state generate utilizzando un orifizio critico che è stato controllato con un provatore volumetrico (Bios Drycal) prima e dopo ogni test.  
2) Uno standard di gas diluito (2,5% di metano, aria bilanciata, Airgas Inc.) fornito da un regolatore di flusso massico (Alicat, Inc).  
3) Per i punti di prova intermedi, il metano al 100% (ME CP300, Airgas Inc) è stato fornito utilizzando un regolatore di flusso massico (Alicat, Inc).  
4) Per i punti di prova ad alto flusso, il gas naturale fornito dall'utilità è stato misurato utilizzando un misuratore di flusso massico termico (Omega Inc).  
  
L'accuratezza di entrambi i sensori era relativamente scarsa a basse velocità di emissione, anche se va notato che una volta che il Nano ha iniziato a riportare valori, erano molto ben correlati con il vero tasso di perdita. Il comportamento di commutazione dell'uscita del Nano discusso nella sezione LDL può essere visto nella Figura 24 (pannello in alto a destra).  
Entrambi i sensori hanno prodotto risposte lineari ben correlate nei punti di prova intermedi, con una buona ripetibilità, anche se entrambi erano inclini al ribasso. Questo risultato era inaspettato sulla base dei risultati dei test dei sensori e dei test di portata e sarà oggetto di ulteriori indagini.  
Il sensore INIR è diventato saturo per due dei tre punti di prova ad alto flusso e ha riportato una concentrazione di perdite del 93% quando la concentrazione di perdite reale era del 25-40% per i tre punti di prova ad alto flusso. I punti di prova ad alto flusso sono stati effettuati utilizzando gas fornito dall'utilità con il 85% di metano, il 9% di etano e l'1% di propano, mentre il sensore è stato calibrato utilizzando il 100% di metano. Questo risultato sottolinea l'importanza di considerare la composizione del gas e la necessità di un controllo degli errori integrato per contribuire a mitigare problemi simili nei campionatori ad alto flusso installati sul campo. Il sensore Nano ha mostrato risultati lineari e ripetibili per i test ad alto range, anche se era leggermente inclinato al ribasso rispetto ai test di medio range.  
Sono stati effettuati altri due test di accuratezza nel dicembre 2021 e nel febbraio 2022 immediatamente dopo la calibrazione del sensore INIR, come mostrato nella Figura 25. I risultati indicano che il sensore INIR si era spostato rispetto ai precedenti test di accuratezza e che il Nano era rimasto stabile. Anche in questi test è emerso un bias basso nel tasso di perdita previsto da entrambi i sensori in tutto il range di test. La causa di questo bias basso rimane poco chiara.  
Considerati nel loro insieme, i test di accuratezza indicano che qualsiasi produttizzazione del design OS-HFS richiederà ulteriori test e eventualmente controllo/calibrazione per massimizzare l'accuratezza di questi sensori. Sebbene le prestazioni siano state inferiori alle aspettative dei precedenti test solo sui sensori, i risultati indicano che:  
• Questa classe di sensori è in grado di supportare uno strumento HFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione aperto di campionatore ad alto flusso per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
42  
• L'uso di sensori multipli, utilizzando diversi meccanismi di rilevamento, mostra promesse per identificare errori, problemi di composizione del gas o altre problematiche di precisione che non verrebbero rilevate da un'unità che utilizza un solo sensore o anche sensori multipli dello stesso tipo.  
• L'uso di sensori con conversione A/D integrata e comunicazione seriale funziona bene.  
  
Figura 25: Risultati aggiuntivi dei test di precisione del prototipo OS-HFS.  
3.3.3 Test di composizione del gas.  
  
Figura 26: Risultati dei test di composizione del gas del sensore NIR del prototipo OS-HFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
43  
  
Figura 27: Risultati dei test di composizione del gas del sensore prototipo OS-HFS Nano.  
Per i test di composizione del gas, sono state generate 21 miscele di gas con proporzioni variabili di metano, etano e propano. Per l'OS-HFS, tutte le miscele sono state fornite a 20 SLP M. Sono stati eseguiti tre test replicati per ogni miscela, variando il setpoint del flusso utilizzando flussi nominali di 180, 240 e 280 SLPM.  
Il sensore INIR è stato calibrato con metano prima dei test e ha riportato tassi di emissione elevati per tutte le miscele con anche una piccola quantità di idrocarburi non metanici (NMHC) presenti nel gas. La risposta aumentava drasticamente con l'aumento del contenuto di NMHC, illustrando la necessità di calibrare il sensore sul gas in prova per evitare risultati errati e possibile saturazione del sensore. L'intervallo dinamico del sensore dovrebbe essere testato quando si misurano miscele di gas con livelli più elevati di NMHC per capire se, e a quale livello, il sensore diventa saturo.  
Il sensore Nano può differenziare tra specie di gas o miscele di specie di gas in base ai pesi molecolari medi. Per i test di miscele di gas con una percentuale di metano inferiore al ~50%, il Nano ha riportato la presenza di un "Gas leggero" che è definito come una miscela di gas con un peso molecolare medio compreso tra 25-75 g/mol e una densità compresa tra 1,2-2,5 kg/m3, con un numero tipico di atomi di carbonio compreso tra 1-4. Per i test di miscele di gas con una percentuale di metano superiore al 50%, il Nano ha riportato la presenza di "Metano" che si applica al metano e alle miscele di gas naturale leggero con un peso molecolare medio di 16-19 g/mol, una densità media di 0,6-0,9 kg/m3 e un numero tipico di atomi di carbonio compreso tra 1 e 2. In questi test, le miscele di gas di prova con un peso molecolare medio di 17-25 g/mol sono state riportate come "Metano" e le miscele di gas di prova da 25-33 g/mol sono state riportate come "Gas leggero".  
Nell'intervallo di miscele di gas considerate "Metano" dal Nano, l'output del sensore INIR variava di un fattore di cinque. Quando il Nano riportava "Gas leggero", l'output del sensore INIR variava di un fattore di 2. Questo risultato indica un miglioramento immediato dell'accuratezza nella segnalazione delle emissioni riportate.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alta portata open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
44  
Non è possibile ottenere un tasso di correzione dei dati INIR basato sulla classificazione del gas fornita dal Nano. Calibrare il sensore INIR su un gas diverso dal metano potrebbe influire sui risultati, anche se non è chiaro quanto.  
  
3.3.4 Test di utilizzo pratico  
  
Figura 28: Test di utilizzo pratico del sensore INIR del prototipo OS-HFS.  
  
Figura 29: Test di utilizzo pratico del sensore Nano del prototipo OS-HFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
45  
Per i test di utilizzo pratico, il prototipo HFS è stato impiegato in una prova sul campo simulata presso il centro METEC della CSU, dove le sue prestazioni sono state valutate rispetto a tassi di emissione noti su "apparecchiature reali" destinate a simulare da vicino le sfide incontrate nell'uso effettivo sul campo. Punti di prova con tassi di perdita veri nominali di 35 SLPM sono stati testati all'inizio di ottobre 2021 (2S-11, 2T-11, 1S-11, 1W-15, 1S-15), mentre i restanti punti di emissione sono stati testati nel novembre 2021 durante i test di altre unità HFS in pre-produzione. Per i sensori INIR, tutti i tassi di emissione sono stati sovrastimati a causa del fatto che le emissioni erano di gas naturale mentre i sensori erano calibrati sul metano. Per entrambi i sensori, i dati dei test di ottobre mostrano una vasta gamma di variabilità che potrebbe indicare che le sfide associate alle misurazioni sul campo (ad esempio, accuratezza del metodo) hanno un'influenza molto maggiore sui risultati complessivi rispetto all'accuratezza dello strumento HFS stesso. Per il sensore Nano, tutti i risultati dei test erano distorti verso il basso, anche se il bias complessivo è stato influenzato dai test di ottobre che hanno mostrato un bias inferiore maggiore rispetto ai test di novembre. Questi risultati ribadiscono ulteriormente l'importanza della calibrazione del sensore per il sensore INIR, ma indicano anche che le prestazioni del Nano possono essere ragionevoli.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
46  
4. Test di unità HFS di pre-produzione  
Oltre al prototipo costruito durante questo progetto, sono state testate anche tre unità di pre-produzione commerciali. Il protocollo completo di test è fornito nell'Appendice C e una foto delle unità è nella Figura 30.  
Nota: Tutte le unità di pre-produzione testate qui erano in fase di sviluppo al momento del test. Tutti i risultati dei test devono essere considerati preliminari e si consiglia ai lettori di consultare gli sviluppatori di questi strumenti per i dati sulle prestazioni più aggiornati. Le descrizioni dei dispositivi sono incluse come fornite dai produttori e le specifiche affermate non sono state verificate da CSU o CARB.  
Sono stati effettuati quattro set di test. I primi tre set di test (Sezioni 4.1-4.3) sono stati eseguiti introducendo direttamente l'emissione nell'apparecchio inserendo l'uscita dell'attrezzatura di rilascio del gas nell'ingresso dell'apparecchio. Questo approccio garantisce che tutte le emissioni siano catturate dall'apparecchio. Il test finale (Sezione 4.4) ha misurato perdite rappresentative su attrezzature reali. Il test finale è stato eseguito su attrezzature da campo modificate presso METEC presso CSU. Sono state catturate e misurate cinque posizioni di perdite.  
Per tutti i test, le letture degli strumenti sono state registrate dallo schermo dello strumento. Le registrazioni dei dati prodotte dallo strumento sono state esaminate ma non sono state analizzate in modo approfondito. Il codice utilizzato per caratterizzare il prototipo CSU è stato utilizzato anche per generare l'analisi e i grafici visualizzati di seguito.  
Sono stati testati i seguenti strumenti:  
  
• Bacharach® - HI FLOW® Sampler: ("BHFS", di seguito): Questo strumento è stato incluso come riferimento, in quanto è lo strumento ad alto flusso più comunemente utilizzato. Prodotto da Bacharach, è stato recentemente interrotto e non è più in produzione.  
  
• Sensors, Inc. - SEMTECH® HI-FLOW 2: ("Sensors", di seguito)  
  
Sensors, Inc., 6812 State Road Saline, MI, 48176 USA  
  
Figura 30: Unità HFS presso METEC. Da sinistra a destra: Sensors, Inc. (modulo sensore di gas, unità portatile collegata da cavo), Bacharach HI FLOW, Hetek Flow Sampler e AddGlobe GFM.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
47  
Descrizione (dal produttore):  
• Campionatore - Dispositivo portatile con una ventola di campionamento ad alto volume e un monitor del flusso totale  
• Analizzatore - Modulo di controllo portatile (che può essere trasportato, posizionato a terra o montato su uno zaino) che ospita le tecnologie dei sensori di gas, l'elettronica di controllo e il pacchetto batteria  
La combinazione di questi due componenti (con una varietà di adattatori di campionamento) consente di catturare, diluire e quantificare con precisione l'intera emissione di metano fugace.  
Utilizzando la spettroscopia di assorbimento laser a diodi sintonizzabili (TDLAS) per la misurazione accurata del metano fugace, la gamma dinamica delle concentrazioni può coprire con precisione 4-5 ordini di grandezza e inoltre senza alcuna interferenza incrociata da altri gas presenti nella perdita catturata. Accoppiato con una misurazione accurata del flusso estratto (perdita di metano e aria ambiente), è possibile determinare con elevata precisione il tasso di perdita di metano fugace basato sul volume e sulla massa su un'ampia gamma (ad esempio da 0,001 a 25 CFM).  
Piani di commercializzazione: Q2 2022  
  
• HETEK Solutions, Inc. - Hetek Flow Sampler: ("Hetek", di seguito)  
Hetek Solutions, Inc., 2085 Piper Lane, London, ON N5V 3S5 Canada  
Descrizione (dal produttore): L'Hetek Flow Sampler è uno strumento portatile, intrinsecamente sicuro e alimentato a batteria che misura con precisione le emissioni fugaci sul campo dei componenti del gas naturale. Ciò viene realizzato campionando a un alto flusso per catturare completamente tutto il gas che fuoriesce dal componente e misurando con precisione il flusso del flusso di campionamento e la concentrazione di gas naturale all'interno di tale flusso. Il tasso di perdita di gas viene quindi calcolato e restituito come tasso di flusso volumetrico in CFM o LPM. Hetek Solutions è lieta di produrre l'Hetek Flow Sampler, che serve come sostituto del BHFS interrotto e supporta l'industria con uno strumento che è realizzato, assistito e supportato in Nord America.  
Piani di commercializzazione: Q2 2022  
  
• Add Globe, LLC - GFM ("GFM", di seguito)  
AddGlobe, LLC, 1650 Arabian Drive, Loxahatchee, FL 33470  
Descrizione (dal produttore): Il campionatore di flusso di gas (GFM) è un dispositivo portatile (9,3 libbre, 290 x 285 x 100 mm), con corpo realizzato in alluminio ad alta resistenza, antideflagrante.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
48  
Dispositivo alimentato a batteria (Li-Pol) progettato per determinare il tasso di perdita di gas da vari raccordi e valvole. Le capacità del dispositivo includono guarnizioni scorrevoli, guarnizioni del compressore nelle linee principali, strutture di stoccaggio, stazioni di compressione per gas naturale e molte altre fonti di perdite di gas. Il prodotto è modulare al 100%. GFM è controllato senza fili utilizzando un telefono Android (versione 6.0 o superiore) che visualizza informazioni tecniche e supervisiona il campionatore GFM. Il campionatore è installato in un case che può essere attaccato a un'apposita imbracatura, lasciando le mani dell'operatore libere per effettuare le misurazioni.  
Piani di produttività: lo strumento GFM testato era un prototipo funzionante. Attualmente, il dispositivo GFM 2.0 viene prodotto in serie. Il volume di produzione dichiarato è di 50 dispositivi al mese. La nuova versione (GFM 2.0) migliora il prototipo testato, riflettendo tutte le note e i commenti degli esperti del settore. Questa versione del dispositivo (2.0) è prevista per essere testata in un nuovo studio indipendente.  
4.1 Limite inferiore di rilevamento  
Lo scopo principale di questo test è identificare la dimensione più piccola di perdita che lo strumento può rilevare e, se rilevata, segnalare una misurazione (che potrebbe essere zero). Per produrre le dimensioni di perdita piccole richieste, il team del progetto ha utilizzato regolatori e orifizi di precisione per controllare il flusso di gas e un misuratore di precisione (Bios Drycal) per misurare il tasso di emissione. Il test ha utilizzato metano di grado industriale. L'emissione è stata quindi introdotta direttamente nell'ingresso dello strumento.  
Quando possibile, i tassi di emissione sono stati variati da sotto il LDL (lo strumento segnala sempre falsi rilevamenti negativi) a solidamente sopra il LDL (lo strumento segnala sempre veri rilevamenti positivi). Per determinare il LDL, è stata adattata una curva logit ai dati (libreria scipy.optimize.curve\_fit) e utilizzata per calcolare il LDL. I risultati sono mostrati nella Figura 31 alla Figura 34, in ordine alfabetico. Il grafico destro in ogni figura mostra i punti utilizzati per la regressione logit e la legenda indica il LDL di confidenza al 50% calcolato dalla regressione logistica. Seguono i commenti alle figure.  
  
Figura 31: Limite inferiore di rilevamento BHFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
49  
  
Figura 32: Limite inferiore di rilevamento GFM.  
  
Figura 33: Limite inferiore di rilevamento Hetek.  
  
Figura 34: Limite inferiore di rilevamento dei sensori.  
Il LDL varia sostanzialmente in queste unità pre-produzione e probabilmente riflette diversi punti di progettazione per le aziende. Il LDL per l'unità BHFS in questo test più rigoroso è sostanzialmente più alto rispetto a...  
  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
50  
Il LDL di 0,2 SCFH (~0,1 SLPM) misurato in Zimmerle et al. 25, mostra un basso bias a bassi livelli di flusso. Per i nuovi prodotti, il LDL variava da un minimo di 0,015 SLPM per l'unità Sensors a 0,47 SLPM per l'unità Hetek - una differenza di 30 volte. Tutti mostravano meno bias di misurazione a questi bassi livelli di emissione rispetto all'unità BHFS.  
  
La idoneità di qualsiasi LDL dipende probabilmente dal settore in cui verranno effettuate le misurazioni; le perdite nei sistemi di distribuzione (ad esempio, set di contatori residenziali) tendono ad essere più piccole rispetto a quelle nei settori di trasporto o di produzione.  
  
4.2 Precisione della quantificazione  
Lo scopo principale di questo test è caratterizzare la precisione della quantificazione degli strumenti quando si misura il metano industrialmente puro. I tassi di rilascio sono stati variati da valori superiori al range utilizzato per il test del LDL fino al limite superiore massimo dell'attrezzatura di rilascio di CSU\*.  
  
I risultati sono mostrati nella Figura 35 alla Figura 38. Poiché diversi strumenti mostrano prestazioni notevolmente diverse a diversi tassi di rilascio, i dati in tutte le figure sono stati suddivisi in quattro pannelli. Il pannello in alto a sinistra mostra una regressione lineare attraverso tutti i dati, in tutto il range utilizzato per il test. In alto a destra vengono mostrati solo i punti di test al di sotto di 4 SLPM, in basso a sinistra i dati per la fascia media di 4-60 SLPM e in basso a destra i dati al di sopra di 60 SLPM.  
  
Poiché tutte le unità erano pre-produzione al momento del test, alle aziende è stata data la possibilità di esaminare e rispondere ai dati prima della pubblicazione. Due aziende hanno risposto con spiegazioni per determinati errori che il team del progetto ha ritenuto validi. Sono state apportate correzioni in base alle spiegazioni delle aziende prima dell'analisi. I grafici sono contrassegnati con cerchi se i dati non sono stati corretti a causa del contributo dell'azienda e con quadrati se lo sono stati. Le correzioni apportate ai dati sono state:  
1) Hetek Solutions, Inc. ha indicato di aver trovato un errore nel firmware, in cui le misurazioni sopra i 65,536 LPM sarebbero state visualizzate in modo errato. Hanno fornito valori corretti, che sono stati inclusi nell'analisi.  
2) Sensors, Inc. ha indicato che un errore di calibrazione stava causando una lettura del 5% in meno. È stato applicato un +5% uniforme a tutti i punti dati diversi da zero.  
  
\* In teoria, lo strumento può essere testato a tassi di perdita fino al punto in cui lo strumento segnala la saturazione alla velocità più alta del ventilatore. Nella pratica, ciò non è accaduto durante i test effettuati qui. Le concentrazioni massime osservate in questi test sono state:  
Unità Concentrazione massima di gas (%)  
BHFS 45,0  
GFM 55,0  
Hetek 78,4  
Sensors 28,7,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
51  
In generale, le curve di adattamento su tutti i dati o su set di dati di media portata sono probabilmente le più rappresentative delle misurazioni sul campo, tranne nei casi in cui la maggior parte dei punti di emissione sia estremamente piccola o grande.  
  
Figura 35: Precisione di quantificazione BHFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
52  
  
Figura 36: Precisione di quantificazione GFM.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
53  
  
Figura 37: Precisione nella quantificazione di Hetek.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
Figura 38: Precisione di quantificazione dei sensori.  
Per i test eseguiti qui, tutte le unità prototipo hanno mostrato un certo bias (pendenza della curva di adattamento), che è probabilmente dovuto allo stato di pre-produzione degli strumenti; durante i test non sono emersi problemi di prestazioni fondamentali. Nel test di gamma media, i bias vanno dal -10% all'8%, con bias leggermente più alti osservati per la gamma alta. Per la gamma bassa - utilizzando gli stessi dati del test LDL, ma con tutti i punti, inclusi quelli non rilevati - il bias è, come previsto, notevolmente più alto.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
55  
4.3 Test sulla Composizione del Gas  
Lo scopo principale di questo test è capire come l'apparecchio reagisce quando vengono introdotti nel gas altri gas diversi dal metano. Tradizionalmente, gli strumenti ad alto flusso sono stati progettati per il gas naturale di mercato che contiene principalmente metano con una percentuale di etano compresa tra lo 0 e il 15% (tipicamente lo 0-5%) e piccole quantità di altre specie di gas. Negli ultimi dieci anni, le misurazioni HFS sono state effettuate sempre più nei sistemi di upstream (produzione e raccolta), dove le miscele di gas contengono frazioni più elevate di NMHC e le composizioni dei gas variano di più tra gli impianti e le diverse località all'interno di un impianto.  
Lo strumento commerciale principale, il BHFS, è calibrato sul metano e sul metano diluito in aria secca. È possibile correggere altre miscele di gas, o calibrare su tali miscele, seguendo i suggerimenti nel manuale e avendo una comprensione dei sensori utilizzati nello strumento. Nella pratica, queste correzioni sono state difficili e spesso richiedono misurazioni supplementari, come campioni di gas per la speciazione con la cromatografia del gas.  
Gli altri strumenti sono arrivati calibrati e si è tentata la calibrazione su tutte le unità, come pratica comune, anche se le istruzioni di calibrazione non erano complete per nessuno degli strumenti. Inoltre, i sensori interni di concentrazione del gas variano nella loro sensibilità ad altri idrocarburi. Mentre alcuni sono specifici per il metano, altri utilizzano sensori che rispondono a tutti i gas combustibili (ad esempio, sensori di ossidazione catalitica) nel flusso di gas.  
Nota: I test sulla composizione del gas dovrebbero essere considerati come un indicatore di quali controlli sono necessari per utilizzare lo strumento con gas contenenti NMHC significativi, piuttosto che come una misura di prestazione specifica per estrarre il tasso di emissione di metano o idrocarburi totali dalle misurazioni. Si consiglia agli operatori di seguire le istruzioni dei produttori.  
I test sono stati eseguiti variando la miscela e il tasso di emissione di metano, etano e propano. La miscelazione è stata effettuata utilizzando l'impianto di miscelazione del gas METEC (abbreviato come "GMR" nei file dati allegati). I risultati sono mostrati dalla Figura 39 alla Figura 42. Sono mostrati dati limitati per l'unità BHFS, ma ulteriori risultati possono essere trovati in Zimmerle et al.25  
Ogni grafico mostra una barra a pila che rappresenta la miscela di gas per ogni test, in unità volumetriche. La barra più bassa rappresenta il metano e uno strumento specifico per il metano dovrebbe produrre misurazioni posizionate nella parte superiore di questa barra. Le misurazioni sono mostrate come punti con barre di errore derivate da misurazioni ripetute effettuate per ogni miscela.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alta portata open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
56  
  
Figura 39: Risultati della miscela di gas BHFS.  
  
Figura 40: Risultati della miscela di gas GFM.  
  
Figura 41: Risultati della miscela di gas Hetek.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
57  
  
Figura 42: Risultati del sensore per la miscela di gas.  
Come già accennato, i sensori incorporati in ciascun strumento possono avere sensibilità sostanzialmente diverse per gli NMHC. Ad esempio, il sensore di ossidazione catalitica nell'unità BHFS è sensibile a tutti i gas combustibili e, per flussi di gas con NMHC apprezzabili, devono essere effettuate correzioni.26  
Gli strumenti Hetek e GFM mostrano una deviazione simile quando vengono introdotti NMHC, mentre lo strumento Sensors mostra un comportamento più specifico per il metano.  
Come indicato in altre sezioni, tutti gli strumenti testati sono unità pre-produzione. Al momento dei test non erano disponibili indicazioni per flussi di gas con una elevata proporzione di specie di gas NMHC, calibrazione specializzata e altre indicazioni sull'uso.  
4.4 Test di utilizzo pratico  
Lo scopo principale di questo test è determinare se la configurazione dello strumento influenzerà la capacità di un operatore di chiudere e misurare una perdita. Per effettuare questo test, l'operatore di prova ha utilizzato lo strumento per misurare una varietà di perdite presso METEC, notando quanto accuratamente veniva misurata la velocità di perdita e eventuali problemi con il funzionamento dello strumento. Per questo test sono state utilizzate cinque posizioni su Pad 4 presso METEC (Figura 43) come attrezzatura rappresentativa.  
  
Figura 43: Pad 4 presso METEC con gruppi di attrezzature contrassegnati.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
58  
Le posizioni di prova sono conosciute dai loro identificatori METEC (foto nella Figura 44):  
• 4S-14: Raccordo su un regolatore di temperatura su un separatore trifase.  
• 4S-41: Linea di valvola di sicurezza sul doghouse di un separatore trifase.  
• 4T-32: Tappo di furto sul serbatoio 4T-3.  
• 4W-31: Imballaggio della valvola su una grande valvola di inviluppo su un pozzo.  
• 4W-32: Connessione flangiata sul rivestimento del pozzo.  
Seguendo il protocollo consigliato per le misurazioni ad alto flusso (Appendice B), le misurazioni  
in ogni combinazione di posizione/velocità di perdita sono state completate con diverse portate totali attraverso lo  
strumento. Consultare i file di dati per i dettagli. Le misurazioni replicate effettuate a diverse portate sono  
identificate come "repliche" nelle descrizioni seguenti.  
I dati per lo strumento Sensors, Inc. sono stati regolati come descritto nella sezione di quantificazione (Sezione 4.2),  
e i grafici contengono una nota per indicare l'aggiustamento. I dati per l'unità Hetek Solutions, Inc.  
non sono stati regolati come descritto nella Sezione 4.2.  
  
Figura 44: Punti di rilascio METEC utilizzati per i test.  
I risultati sono mostrati nella Figura 45 alla Figura 48. In ogni figura, il pannello sinistro illustra tutte  
le misurazioni effettuate sui punti di perdita selezionati, mentre il pannello destro presenta gli stessi dati dopo  
che tutte le repliche per ciascuna posizione di emissione e velocità di emissione sono state mediate. Nella pratica,,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
59  
di solito vengono mediati più misurazioni di perdite prima di utilizzarle in uno studio. La regressione lineare dei dati è stata effettuata con il metodo dei minimi quadrati ordinari, senza intercetta.  
La legenda del pannello in basso di ogni figura fornisce l'identificatore della posizione della perdita, come indicato nell'elenco sopra, e il rapporto tra le misurazioni e il vero tasso di perdita tra parentesi per ogni punto di emissione. Il rapporto è calcolato come:  
𝑟𝑟𝑗𝑗=∑𝑀𝑀𝑎𝑎,𝑗𝑗𝑁𝑁𝑗𝑗  
𝑎𝑎=1  
∑𝐴𝐴𝑎𝑎,𝑗𝑗𝑁𝑁𝑗𝑗  
𝑎𝑎=1  
dove l'indice 𝑗𝑗 si riferisce a tutti i dati per un singolo test, con un "test" definito come una posizione di emissione con un tasso di perdita nominale. 𝑟𝑟𝑗𝑗 è il rapporto per il test 𝑗𝑗. 𝑀𝑀𝑎𝑎,𝑗𝑗 e 𝐴𝐴𝑎𝑎,𝑗𝑗 sono il tasso di emissione misurato e reale per la 𝑖𝑖𝑡𝑡ℎ replica del test 𝑗𝑗 e 𝑁𝑁𝑗𝑗 è il numero di repliche per quel test.  
Per effettuare il test, la posizione della perdita è stata sigillata una volta (simile alla Figura 5), e quindi ogni strumento è stato utilizzato per misurare la posizione sigillata scambiando il tubo con lo strumento. Pertanto, tutti gli strumenti hanno utilizzato la stessa cattura della perdita.  
  
Figura 45: Test di utilizzo pratico del BHFS.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
60  
  
Figura 46: Test di utilizzo pratico del GFM.  
  
Figura 47: Test di utilizzo pratico di Hetek.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
61  
  
Figura 48: Test di utilizzo pratico dei sensori.  
In questa categoria di test, un confronto utile è tra lo strumento BHFS ampiamente utilizzato  
e ciascuno degli altri tre strumenti. Come si può vedere dai grafici, sia gli errori che il bias aumentano  
quando applicati a punti di emissione realistici rispetto ai risultati nella Sezione 4.2, dove le emissioni  
sono state introdotte direttamente nell'ingresso dei dispositivi. Questo test combina fattori legati alle prestazioni dello strumento - facilità d'uso, gamma di portate, ecc. - e fattori indipendenti dello strumento e principalmente dipendenti dal metodo ad alta portata stesso - principalmente la variabilità nella cattura della perdita, ma anche cambiamenti nella contropressione e altri fattori che possono disturbare l'accuratezza della misurazione.  
Un elemento chiave per valutare gli strumenti è la gamma di risultati per un singolo test - cioè, la variazione del tasso di perdita del dispositivo per un vero tasso di perdita (asse X). Gli strumenti pre-produzione differiscono sostanzialmente in questa area, ed è un'area da tenere in considerazione durante la finalizzazione del prodotto.  
Riepilogo dei test 4.5  
I test di prestazione di queste unità pre-produzione indicano che le nuove unità sono sulla buona strada per sostituire lo strumento BHFS sul campo. Le unità mostrano diversi "punti di progettazione", con variazioni nel limite inferiore di rilevamento e, probabilmente, nel limite superiore di quantificazione. Per questi test, la quantificazione è stata limitata dall'attrezzatura disponibile e la parte superiore di diversi strumenti non è stata completamente caratterizzata.  
Come unità pre-produzione, è necessario un lavoro aggiuntivo sulla maggior parte delle unità. Gli elementi chiave includono:  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione di flusso elevato open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
62  
1) Migliorare l'accuratezza dello strumento e, di conseguenza, documentare chiaramente le procedure di calibrazione o le procedure di conferma di calibrazione se non è richiesta la calibrazione sul campo. La maggior parte degli strumenti mostra qualche tipo di offset - cosa non sorprendente data la fase di pre-rilascio degli strumenti - che probabilmente può essere corretto con aggiornamenti dei sensori e del software.  
  
2) Decidere e comunicare le procedure per la gestione di flussi di gas con una elevata proporzione di componenti diversi dal metano. Le procedure probabilmente saranno specifiche per lo strumento e potrebbero variare tra l'evitare determinate composizioni di gas e istruzioni specifiche di correzione. Inoltre, la maggior parte delle unità richiede ancora una qualifica di sicurezza finale prima del rilascio; questo non è stato un problema per i test.  
  
I risultati dei test evidenziano anche la necessità di standardizzare i test di questi strumenti. Le raccomandazioni includono:  
1) Strutturare i test per catturare più repliche per ogni condizione di test al fine di caratterizzare meglio la stabilità e l'accuratezza dello strumento.  
  
2) Se possibile, testare più di una unità di produzione per valutare la variabilità tra le unità (come è stato osservato su alcune unità BHFS25).  
  
Infine, i risultati dei test illustrano (ancora una volta) che l'incertezza nelle misurazioni sul campo ad alto flusso è probabilmente sottovalutata a causa delle sfide nel misurare l'attrezzatura reale in condizioni di campo.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
63  
5. Conclusioni e Raccomandazioni  
In generale, le raccomandazioni specifiche per l'argomento sono incluse in tutto il rapporto. Questo capitolo discute solo i punti principali presenti nel rapporto.  
5.1 Conclusioni chiave: Prototipo CSU OS-HFS  
L'unità prototipo CSU OS-HFS rappresenta un prototipo completamente funzionante, sebbene incompleto, di uno strumento ad alto flusso. Sono stati integrati e testati elementi chiave di progettazione, tra cui:  
• Utilizzo di componenti commerciali, pronti all'uso, per elementi fisici e sensoriali chiave, incluso l'utilizzo di un ventilatore ampiamente utilizzato con controllo integrato della velocità, un pacchetto batteria ad alta energia comunemente disponibile e un involucro commerciale come custodia resistente all'acqua per lo strumento. Tutti questi fattori aumentano la possibilità che un lettore possa creare un'unità funzionante e farlo con un investimento minimo.  
  
Un'eccezione a questo miglioramento è stata l'accessorio del tubo flessibile e dell'involucro (noto anche come "la borsa"), ma potenzialmente includendo diversi elementi per catturare le emissioni in diverse geometrie di perdita) necessario per catturare le perdite in condizioni di campo. Il team del progetto non ha trovato valide alternative per il tubo flessibile del comune aspirapolvere commerciale e la borsa utilizzata con l'unità BHFS. Questa è sicuramente un'area per ulteriori indagini e sviluppi.  
  
• Il prototipo ha dimostrato una nuova architettura per uno strumento ad alto flusso utilizzando un SBC commerciale (Raspberry Pi) per il controllo, l'interfaccia utente e la gestione dei dati, e - cosa più importante - accoppiando in modo lasco quel computer al resto dello strumento. Per utilizzare questo tipo di dispositivo di calcolo generico in uno strumento, sono state necessarie tre decisioni di progettazione cruciali: o Tutti i sensori vengono letti utilizzando comunicazioni seriali - standard di settore UART o interfacce I2C - che sono facilmente supportate dalla maggior parte dei SBC. Il computer non esegue conversioni A/D direttamente (i convertitori A/D integrati su SBC e microcontrollori hanno una bassa risoluzione e sono notoriamente imprecisi). Inoltre, le conversioni A/D richieste sono isolate dalla circuiteria di calcolo e visualizzazione ad alta frequenza e alta rumorosità.  
o Utilizzo di un linguaggio standard interpretato (Python) per l'acquisizione dei dati, il controllo e la visualizzazione. Un linguaggio indipendente dalla piattaforma supporta la sostituzione del computer e del display se necessario, riducendo al minimo gli strumenti software specializzati per i microcontrollori e le dipendenze hardware associate.  
o Mantenere il computer di controllo separato dalle schede a circuito stampato che supportano i sensori e altre acquisizioni di dati.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
64  
o Guidare il display utilizzando un'interfaccia HDMI standard del settore.  
  
Queste decisioni di progettazione isolano efficacemente il computer dello strumento dai sensori e dai circuiti di misurazione nello strumento. L'innovazione e l'obsolescenza dell'elemento informatico di uno strumento avvengono molto più velocemente rispetto a quelli dei sensori o di altri componenti hardware. Inoltre, l'installazione di aggiornamenti software per correggere problemi dopo il rilascio dello strumento è un processo robusto a cui gli utenti possono accedere facilmente. Adottare questo approccio renderà gli strumenti ad alto flusso più adattabili ai cambiamenti delle esigenze e all'evoluzione delle aspettative per la gestione dei dati e la comunicazione.  
• I produttori di sensori si stanno rapidamente orientando verso sensori che includono la conversione A/D all'interno del sensore, spesso includendo correzioni aggiuntive che consentono al sensore di essere più stabile e di operare su un range più ampio. Eseguire la conversione A/D nel sensore riduce anche la suscettibilità al rumore elettrico all'interno dello strumento. L'OS-HFS utilizzava un sensore analogico solo per la pressione (con chip convertitore A/D dedicato); tutti gli altri sensori avevano conversione A/D integrata e comunicazioni seriali. Il prototipo dimostra che la comunicazione seriale è sufficientemente veloce e robusta per applicazioni ad alto flusso.  
• L'uso esclusivo delle comunicazioni seriali consente anche al prototipo CSU OS-HFS di dimostrare, sebbene non completamente implementare, un'architettura indipendente dal sensore. Le varianti di sensori migliorate possono essere sostituite nello strumento man mano che i sensori evolvono, probabilmente richiedendo solo un aggiornamento minore del codice di comunicazione se viene eseguito un rilevamento simile, come sarebbe comune quando si utilizzano sensori dello stesso produttore. Poiché molti strumenti ad alta sensibilità (ad esempio, analizzatori di gas traccia) utilizzano anche la comunicazione seriale, questo approccio supporta anche l'integrazione di tale strumento come sensore per il processo ad alto flusso scrivendo un nuovo "lettore" per lo strumento. Questo tipo di integrazione potrebbe essere utile se le misurazioni richiedono una maggiore sensibilità (ad esempio, per perdite molto piccole), una migliore speciazione del gas o sensibilità a specifiche specie di gas. Il prototipo dimostra il concetto di una piattaforma ad alto flusso flessibile ai sensori che potrebbe adattarsi a nuovi utilizzi e sfide man mano che si presentano.  
5.2 Conclusioni chiave: Strumenti prototipo pre-produzione  
Sebbene diversi strumenti prototipo pre-produzione siano stati testati come parte di questo progetto, è importante notare che, per la maggior parte, gli strumenti non hanno sfruttato l'architettura sviluppata durante il progetto. Detto ciò, tutti gli strumenti utilizzano il metodo di misurazione HFS e non presentano grandi differenze con il metodo ad alto flusso come è stato praticato dagli anni '90.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri -Source High Flow Sampler per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
65  
Alcune caratteristiche del prototipo CSU erano rappresentate in alcuni degli strumenti di pre-produzione, spesso casi di design convergente, ma possibilmente includendo il contributo delle discussioni sui primi lavori sul progetto. Esempi includono:  
1) Modernizzazione dell'interfaccia utente e della raccolta dati dello strumento rispetto allo strumento BHFS. Sulla base dell'esperienza sul campo, il prototipo CSU ha spostato il display da un cavo collegato alla parte superiore dell'unità dello strumento, dove poteva essere letto dall'alto verso il basso durante il lavoro. Diverse unità di pre-produzione hanno affrontato anche questa esigenza con display remoti (GFM, Sensori) non collegati all'unità.  
2) Due delle unità di pre-produzione (Sensori, GFM) hanno optato per configurazioni dello strumento che differivano sostanzialmente dal BHFS, generalmente pacchetti più piccoli che potevano essere posizionati più facilmente da un operatore durante la misurazione. L'unità GFM utilizza uno stile di pacchetto simile al prototipo CSU, mentre Sensori, Inc. ha sviluppato un design portatile radicalmente nuovo. Al contrario, Hetek ha scelto di imitare da vicino la configurazione dello zaino BHFS.  
Nonostante i progressi in questo settore, il modello di utilizzo e l'ergonomia associata rimangono sfidanti nelle condizioni sul campo; questi strumenti sono ancora ingombranti e pesanti per l'uso sul campo, soprattutto perché nessuna unità, inclusa la CSU, ha identificato tubi e custodie più compatti o leggeri per catturare la perdita.  
3) L'esperienza sul campo indica che è molto utile registrare i dati del sensore ad alta velocità che sottostanno al tasso di perdita calcolato per una successiva post-elaborazione al fine di identificare problemi o caratterizzare meglio le incertezze. Il prototipo CSU ha dato priorità a questa funzione e la maggior parte delle unità di pre-produzione includeva anche la registrazione dei dati, anche se non tutti erano facilmente accessibili al momento dei test. Tuttavia, nessuno degli strumenti includeva diversi elementi chiave identificati durante questo lavoro:  
1) Supporto per più sensori complementari. L'esperienza pratica sul campo ha dimostrato che è difficile correggere diverse miscele di gas in condizioni sul campo. L'intento del prototipo CSU era quello di supportare un sensore come sensore di misurazione primario (sensore SGX INIR) e un secondo sensore (Nano) con una risposta diversa alle miscele di gas, consentendo di rilevare deviazioni nella miscela di gas, anche se una correzione dipendente dalla composizione non era possibile senza ulteriori informazioni.  
2) Recenti campagne sul campo e esperimenti di laboratorio indicano che il "sensore di concentrazione di sfondo" non è necessario nella stragrande maggioranza delle condizioni di misurazione. Pertanto, l'unità prototipo CSU non includeva un sensore di sfondo, mentre diverse unità di pre-produzione lo includevano.  
Sebbene la presenza di un sensore di sfondo sembri positiva, nella pratica, il sensore di sfondo è spesso difficile da isolare dalle emissioni del punto di perdita, attirando in alto.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
66  
emissioni che non sono rappresentative del vero sfondo e risultano in stime ridotte del tasso di emissione. Questo è altamente indesiderabile. Nell'estremo opposto, le misurazioni vengono raramente effettuate, per motivi di sicurezza, dove le concentrazioni di sfondo sono notevolmente elevate. Pertanto, un sensore di sfondo tende occasionalmente a sottostimare e solo raramente sovrastimare le emissioni. Secondo il giudizio del team del progetto, non vale la pena aggiungere un secondo sensore per la caratterizzazione dello sfondo a causa dei costi aggiuntivi e della complessità.   
Un problema continuo con il BHFS è stata la difficoltà di misurare le emissioni con contenuto variabile di metano, sia per produrre un numero di emissioni di metano, sia per caratterizzare correttamente un numero totale di COV. Ad eccezione dello strumento Sensors, che è specifico per il metano, i fornitori devono essere più chiari su come gestire le emissioni con composizione di gas variabile durante la calibrazione e l'uso sul campo.   
5.3 Conclusioni chiave: Metodo ad alto flusso e test degli strumenti   
Infine, lo sviluppo e i test condotti in questo progetto evidenziano diverse aree che richiedono ulteriore attenzione:   
1) Le misurazioni condotte qui su "attrezzature reali" presso METEC suggeriscono che le incertezze legate al metodo ad alto flusso (rispetto allo strumento) potrebbero essere sottovalutate nelle condizioni sul campo. I test eseguiti qui e altri test informali completati presso METEC illustrano che una cattura incompleta (o altri fattori di stress sul processo di misurazione) tendono ad aumentare le imprecisioni e potenzialmente aggiungere un bias ai risultati delle misurazioni. Inoltre, i test presso METEC tendono ad essere meno complessi rispetto alle vere condizioni sul campo: l'attrezzatura non viene riscaldata, c'è generalmente meno pressione di tempo e l'obiettivo del test è chiaramente noto, stimolando le migliori pratiche da parte del personale di misurazione. Pertanto, è probabile che le incertezze osservate nella Sezione 4.4 rappresentino un limite inferiore delle vere incertezze sul campo. Il team del progetto raccomanda che queste incertezze vengano caratterizzate utilizzando personale di misurazione professionale in un ambiente controllato, ma realistico.   
2) Le unità di produzione dovrebbero essere sottoposte a test simili a quelli condotti qui prima dell'uso sul campo. Tutte le unità presentano problemi di qualche natura, tutti probabilmente risolvibili, ma ulteriori test aumenterebbero la fiducia in questi strumenti per un uso futuro.   
3) Per supportare i test, c'è la necessità di standardizzare ulteriormente i protocolli per il test degli strumenti e probabilmente la necessità di un protocollo leggero per verificare le prestazioni sul campo. Questi test dovrebbero essere strutturati per catturare più repliche per ogni condizione di test e idealmente testare più di una unità di produzione per valutare la variabilità tra le unità (come è stato osservato su alcune unità BHFS 25).  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alta portata open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
67  
Il metodo ad alta portata rimane uno dei pochi metodi adatti per isolare i singoli punti di emissione per la misurazione diretta. Strumenti di qualità in questo settore sono fondamentali per caratterizzare le emissioni da componenti o altre posizioni "punto". Questo tipo di quantificazione produce informazioni critiche per i programmi di rilevamento e riparazione delle perdite, aiuta nello sviluppo di fattori di emissione specifici per attrezzature e componenti e genera informazioni utili per i programmi di controllo delle emissioni.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
68  
Appendice A File di dati e materiali aggiuntivi  
Descrizione di ciascun file di dati, nome del file, contenuti.  
• Consolidated.xlsx - Risultati dei test del prototipo OS-HFS e degli HFS di pre-produzione dei tre produttori, oltre al riferimento BHFS.  
• OSH FS Software v1.zip - tutto il software utilizzato nell'unità prototipo. Il software contiene diverse schermate che non sono state completamente implementate nel prototipo, ma sono conservate nella distribuzione come esempi e per evitare modifiche dell'ultimo minuto che potrebbero compromettere il software.  
• HiFlow\_Assembly\_V7 v7.iges - File di modello solido IGES per l'assemblaggio meccanico.  
• Gas\_sensor\_mount PCB.zip - file di progettazione della scheda per il PCB del sensore (solo PCB personalizzato realizzato durante il progetto).  
• Part Datasheets.zip - Schede tecniche del produttore per i componenti chiave, inclusi i sensori INIR e Nano MPS.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
69  
Appendice B Metodo ad alto flusso consigliato  
B.1 Scopo  
Lo scopo di questo documento è delineare un protocollo per effettuare una misurazione completa ad alto flusso in condizioni di campo. Questo protocollo fornisce un meccanismo di controllo di qualità per le misurazioni ad alto flusso che possono essere utilizzate da aziende, enti regolatori o altre parti interessate. Il protocollo non è specifico per uno strumento, anche se gli strumenti possono automatizzare alcune parti del processo per assistere gli utenti dello strumento.  
Prima di avviare questo protocollo, lo strumento deve essere correttamente calibrato e alimentato, seguendo le istruzioni specifiche per lo strumento ad alto flusso; la calibrazione e le procedure di manutenzione non sono incluse in questo protocollo. Inoltre, l'accuratezza della misurazione dipende sia dal protocollo di misurazione, descritto qui, che dallo strumento che effettua la misurazione. Gli utenti devono stimare gli errori e l'accuratezza utilizzando tutte le informazioni a loro disposizione.  
Il capitolo B.2 descrive la procedura per misurare una singola posizione di emissione che emette a un tasso approssimativamente costante. Questa è la modalità di funzionamento predefinita per la maggior parte delle emissioni sul campo. Una modalità operativa aggiuntiva è descritta nel capitolo B.3 per le fonti variabili nel tempo.  
B.2 Misurazione di una singola sorgente costante  
Questa sezione descrive le procedure uomo-macchina per effettuare una singola misurazione ad alto flusso, di solito con diverse ripetizioni, di una sorgente di emissione che emette a un tasso costante. L'utente è responsabile di stimare che il tasso di emissione sia approssimativamente costante.  
La misurazione è divisa in due fasi:  
1) Sensori di concentrazione a selezione automatica.  
2) Esecuzione di una misurazione delle emissioni.  
Uno strumento ad alto flusso tipico può fare affidamento su più sensori di concentrazione che sono efficaci in diverse gamme di concentrazione. Questo protocollo è scritto come se ci fosse più di un sensore e lo strumento seleziona automaticamente tra di essi per massimizzare la gamma operativa dello strumento. Tuttavia, alcuni strumenti possono includere solo un sensore.  
Nota: Lo scopo principale di questo processo è proteggere contro diversi errori comuni di misurazione che spesso si verificano in condizioni di campo, come la cattura impropria di tutte le emissioni di perdite. Il processo è anche inteso a incoraggiare la cattura di misurazioni replicate multiple fornendo una guida chiara per l'automazione del cambio dei setpoint. Questo processo non proteggerà da tutti gli errori, né è un sostituto di una formazione adeguata.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
70  
B.2.1 Auto -regolazione  
L'obiettivo dell'auto-regolazione è quello di posizionare uno o più sensori di concentrazione nell'intervallo corretto per una misurazione accurata e, se ciò non è possibile, segnalare all'utente che il tasso di emissione è al di fuori delle capacità di misurazione dello strumento. Il processo è descritto nel diagramma di flusso a destra. I numeri indicano i collegamenti nel diagramma di flusso di misurazione nella sezione B.2.2.  
A. L'utente imposta i parametri dello strumento come definito nella sezione B.2.3.  
B. L'utente configura lo strumento e isola la perdita per la misurazione utilizzando il tubo di ingresso, la sacca o altro dispositivo per chiudere la perdita; assicura che lo strumento sia messo a terra; e completa eventuali azioni di configurazione aggiuntive specificate nel manuale dello strumento. L'utente avvia quindi il processo di auto-regolazione.  
C. Lo strumento seleziona una velocità di ventilatore di avvio come definito in (A).  
D. Lo strumento imposta la velocità del ventilatore e legge i sensori per assicurarsi che il ventilatore stia funzionando come comandato. Poi attende che le letture dei sensori si stabilizzino.  
E. Se tutti i sensori sono al di sotto dell'intervallo, lo strumento diminuisce il punto di settaggio della velocità del ventilatore e ritorna a (D) per verificare l'aggiustamento. Se il ventilatore è già alla velocità minima di flusso, viene generato un errore e la misurazione si interrompe.  
F. Se tutti i sensori sono saturi, lo strumento aumenta il punto di settaggio della velocità del ventilatore e ritorna a (D). Se il ventilatore sta già funzionando alla massima velocità, viene generato un errore e la misurazione si interrompe. (B)  
Configurazione fisica per la misurazione e attivazione della misurazione  
(C)  
Seleziona la velocità di flusso di avvio del ventilatore (A)  
Imposta i parametri selezionabili per il protocollo di misurazione  
Confronta con l'intervallo operativo (D)  
Imposta il ventilatore e conferma il cambiamento di velocità  
Sensore al di sotto dell'intervallo (E)  
Diminuisci il punto di settaggio del ventilatore  
Sensore satura (F)  
Aumenta il punto di settaggio del ventilatore  
Nell'intervallo  
1 Ventilatore alla velocità minima? No  
Errore Sì Ventilatore alla velocità massima? (D)  
Attendi che la lettura del sensore si stabilizzi No  
Errore Sì Inizia  
2  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
71  
Quando il/ i sensore/i è/sono in funzione all'interno del range, lo strumento passa alla misurazione. Si noti che tutti i dati da A a F devono essere registrati per scopi di controllo qualità e contrassegnati come "auto-range". Nei passaggi D-F, uno strumento avanzato potrebbe prima tentare di impostare l'auto-range in modo che più sensori siano all'interno del range utilizzabile prima di passare a un singolo sensore.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
72  
B.2.2 Misurazione  
La misurazione procede come nel diagramma successivo. Una misurazione consiste in 𝑁𝑁 impostazioni del ventilatore, ognuna delle quali produce un tasso di emissione calcolato. Varie velocità del ventilatore (flusso d'aria) forniscono una verifica che la perdita venga interamente catturata per la misurazione.  
All'inizio del flussochart di misurazione (a destra), lo strumento è in grado di effettuare una misurazione dopo aver impostato automaticamente la gamma. Pertanto, il primo passo è registrare i dati e calcolare un tasso di emissione per l'impostazione iniziale.  
G. Lo strumento registra per un periodo definito, come specificato in (A), completando una replica della misurazione (un set-point).  
H. Lo strumento confronta la nuova impostazione con le impostazioni precedenti. Se il tasso di perdita misurato è entro la tolleranza ("tolleranza del tasso di emissione" nella sezione B.2.3), il setup di misurazione ha probabilmente catturato l'intera perdita. Lo strumento annota e memorizza i risultati con indicatori di qualità appropriati.  
Se sono state completate abbastanza impostazioni, il processo di misurazione è completato.  
(G)  
Registra i dati per X secondi, come definito nelle impostazioni1  
Regolazione riuscita? (J)  
Regola il ventilatore su/giù come nei passaggi (D)-(F)(I)  
Utilizzando le letture del sensore e le impostazioni del ventilatore, seleziona una nuova velocità del ventilatore ±10% rispetto a quella attuale (H)  
Impostazioni desiderate completate?  
NoSìMisurazione completata.  
Annota e chiudi i file. Incrementa l'ID del testFatto  
Sì  
Mostra un messaggio di errore.  
No(H)  
Confronta il tasso di perdita con le impostazioni precedenti  
Entro la tolleranzaFuori dalla tolleranza(K)  
Raccomanda all'utente di regolare la configurazione fisica per catturare la perdita2Utente accettaUtente rifiuta  
Termina la misurazione con meno impostazioni di quelle desiderate  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
73  
Se il tasso di perdita misurato non rientra nella tolleranza, potrebbe non essere stata catturata completamente la perdita a questo o ai precedenti punti di impostazione. Lo strumento annota e memorizza i risultati, li contrassegna con un indicatore di controllo di qualità e passa al passaggio (K).  
I. Confrontando i sensori con i loro intervalli di funzionamento e il ventilatore con il suo intervallo di funzionamento, lo strumento decide di aumentare o diminuire il flusso di aria di una quantità desiderata (vedere "frazione di passo del ventilatore" nella sezione B.2.3).  
J. Il ventilatore si regola, con le condizioni di errore gestite come in (D)-(F) sopra. Se l'aggiustamento fallisce, viene visualizzato un messaggio di errore e la misurazione viene completata con meno punti di impostazione desiderati. Se ha successo, torna a (G) per completare il punto di impostazione.  
K. Se il tasso di perdita varia tra i punti di impostazione nel passaggio (H), l'interfaccia grafica consiglia all'utente di verificare la cattura fisica della perdita. Se la guida viene accettata, il flusso torna al (2) sulla tabella precedente. Se viene rifiutata, viene aggiunto un indicatore di controllo di qualità alla misurazione e lo strumento continua con il punto di impostazione successivo.  
Tutti i dati raccolti durante questo processo vengono memorizzati e ogni punto di impostazione viene contrassegnato con indicatori di controllo di qualità.  
La misurazione viene completata normalmente (senza errori) quando il numero desiderato di replicati, che concordano entro la "tolleranza del tasso di emissione" specificata nella sezione B.2.3, è stato acquisito.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
74  
B.2.3 Parametri di configurazione  
Il processo sopra descritto accede a un insieme di parametri di configurazione nel dispositivo (o, se non automatizzato, applicati dall'utente) per completare una misurazione di successo. Inoltre, un regolatore o un soggetto simile potrebbe voler specificare determinati valori per le misurazioni riportate al fine di garantire un adeguato controllo di qualità.  
La tabella di seguito descrive i parametri chiave citati altrove in questo documento. I valori raccomandati, minimi e massimi sono solo illustrativi. SBI ("impostato dal dispositivo") indica che questi valori sono impostati dal produttore del dispositivo o dalla procedura di calibrazione dello strumento.  
Parametro Scopo Raccomandato Valore minimo Valore massimo  
Numero di punti di settaggio Numero di punti di settaggio del ventilatore utilizzati per produrre una misurazione completa. 3 1 Qualsiasi  
Intervallo utilizzabile del sensore Le letture del sensore vengono calibrate solo in questo intervallo. N/A SBI SBI  
Intervallo utilizzabile del ventilatore Intervallo di velocità operativa del ventilatore. N/A SBI SBI  
Frazione di passo del ventilatore Quale frazione dell'intervallo del ventilatore utilizzare per aumentare e diminuire la velocità del ventilatore. 10% 2-3 volte la risoluzione del controllo di velocità del ventilatore N/A  
Velocità di avvio del ventilatore Velocità predefinita del ventilatore nella fase C. Può essere regolata in base alle comuni attività di misurazione. 50% N/A N/A  
Tolleranza del tasso di emissione tra i punti di settaggio Variazione consentita tra i tassi di emissione calcolati da ciascun punto di settaggio del ventilatore. ±TBD (vedi nota 1) ±10% ±100%  
Stabilità del sensore Al di sotto di questa deviazione standard della lettura del sensore, la lettura del sensore viene considerata stabile (fasi D o G). ±TBD (vedi nota 1) ±1% ±100%  
Tempo minimo del punto di settaggio Quantità di tempo per registrare i dati dopo che il sensore è stabile nella fase G (tempo di mediazione). 15 s 1 s 120 s  
Note:  
1) La stabilità prevista delle misurazioni ad alto flusso, in condizioni di campo, deve essere caratterizzata per impostare questi valori.  
  
B.3 Sorgenti variabili nel tempo  
Una sorgente variabile nel tempo è un punto di emissione che si prevede vari in base al tempo di misurazione. Esempi tipici includono lo sfiato da controllori pneumatici o dispositivi, o emissioni dipendenti dal clima o dalla pressione. La variabilità non dovrebbe includere cambiamenti nel tasso di emissione dovuti a una cattura incompleta dell'emissione. Pertanto, l'utente dovrebbe utilizzare un metodo secondario, come l'osservazione con una telecamera per l'imaging del gas ottico (OGI), per assicurarsi che tutte le emissioni vengano catturate.  
Date le tempistiche di risposta del sensore e del ventilatore, uno strumento tipico non sarà in grado di regolare automaticamente l'intervallo durante una misurazione. Pertanto, l'utente selezionerà una velocità adeguata del ventilatore che manterrà le letture del sensore all'interno dell'intervallo utilizzabile del sensore per le parti della misurazione di interesse.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
75  
Ad esempio, il ventilatore può essere impostato per catturare i picchi di emissioni di una fonte intermittente, a discapito della mancanza di letture durante i periodi di basse emissioni.  
In generale, le fonti che variano nel tempo potrebbero non essere automaticamente quantificabili dall'apparecchio, anche se strumenti avanzati potrebbero essere in grado di stimare e integrare le emissioni nel tempo. Pertanto, l'accento principale di questa modalità di misurazione è registrare i dati alla massima velocità supportata dall'apparecchio per l'analisi successiva e la stima delle emissioni. Ciò comporta diversi requisiti per l'apparecchio:  
1) L'apparecchio avrà costanti di tempo documentate per il tempo di risposta di tutti i sensori.  
2) L'apparecchio contrassegnerà tutte le letture registrate al di fuori della gamma utilizzabile del sensore con indicatori di controllo di qualità.  
3) Se le letture tra i sensori non sono simultanee entro l'1% del tasso di campionamento dell'apparecchio, l'apparecchio avrà offset documentati tra le letture dei sensori (concentrazione, flusso d'aria totale e parametri ambientali come temperatura e umidità).  
Processo di misurazione:  
A. L'utente configura l'apparecchio e isola la perdita per la misurazione utilizzando il tubo di ingresso, la sacca o altro dispositivo per racchiudere la perdita; assicura che l'apparecchio sia messo a terra; e completa eventuali azioni di configurazione aggiuntive specificate nel manuale dell'apparecchio.  
B. L'utente configura la velocità del ventilatore e altri parametri per la registrazione continua.  
C. L'utente verifica che tutte le emissioni vengano catturate alle impostazioni selezionate.  
D. L'utente avvia la registrazione.  
a. Ad ogni campione, l'apparecchio verifica se i sensori sono all'interno della gamma utilizzabile (e altri controlli di qualità) e annota il campione con indicatori di controllo di qualità appropriati.  
b. Gli indicatori di sovra e sotto-gamma vengono mostrati sullo schermo, ma la registrazione non viene interrotta.  
c. Se automatico, l'apparecchio regola i ritardi temporali tra i sensori per allineare i tempi di misurazione.  
d. Se automatico, l'apparecchio fornisce una media in tempo reale delle emissioni totali.  
E. L'utente interrompe la registrazione dopo un intervallo preimpostato. Le registrazioni possono durare da un minuto a molte ore.  
F. L'apparecchio completa la registrazione, annota la registrazione e incrementa l'ID del test.  
Nella maggior parte dei casi, l'utente analizzerà successivamente i dati registrati per stimare le emissioni, la variabilità delle emissioni e parametri simili.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
76  
Appendice C Protocollo di test  
C.1 Introduzione  
Nel 2021 il team CSU METEC, in collaborazione con il partner SLR International, condurrà un test di prestazioni su campionatori ad alto flusso (HFS) esistenti e di prossima generazione, un tipo comune di strumento per misurare piccole perdite su apparecchiature a gas. Questo documento illustra il protocollo per il test. Durante lo studio saranno testati più strumenti HFS.  
L'obiettivo di questo test è comprendere l'accuratezza degli strumenti in condizioni di campo pseudo-realistiche, attraverso l'intero intervallo di emissioni di ciascuno strumento, in diverse posizioni di perdita. Le emissioni verranno variate per tracciare la curva di quantificazione dal di sotto del limite di rilevamento inferiore (LDL) al di sopra del limite di saturazione superiore (USL) o al massimo sicuro che può essere rilasciato, a seconda di quale sia più basso.  
Inoltre, verranno effettuati test limitati con rilasci di gas che contengono frazioni più elevate di etano e propano per identificare eventuali problemi nella quantificazione del tasso di perdita.  
Tutti i test saranno eseguiti da un ingegnere SLR o CSU esperto nell'uso di HF S ("tester"). I test saranno a scatola bianca per il tester: il tester saprà dove si trova la perdita e (approssimativamente) il tasso di emissione, ma a scatola nera per eventuali osservatori delle aziende produttrici di strumenti HFS. Potrebbero partecipare più ingegneri ai test; "tester" potrebbe riferirsi a più di una persona.  
C.2 Pubblicazione  
I dati raccolti in questo studio saranno pubblicati sul sito web della CSU e su un articolo scientifico o un rapporto pubblico. Saranno inoltre forniti alla California Air Resources Board come parte dei deliverable del progetto.  
C.3 Struttura di test  
Tutti i test saranno eseguiti presso il METEC utilizzando rilasci controllati da posizioni di emissione realistiche. Le posizioni saranno situate su pozzi, separatori, compressori, una piccola unità di deidratazione e, se disponibili, aperture di ladro o sfoghi di serbatoi. L'obiettivo di questi test non è testare ogni tasso di perdita su ogni posizione. Piuttosto, le posizioni saranno selezionate per identificare problemi di cattura di tutte le emissioni.  
Salvo diversa indicazione, le emissioni saranno di gas CNG, con una percentuale compresa tra l'85% e il 95% di metano, con il resto costituito principalmente da etano. La composizione del gas verrà determinata utilizzando la cromatografia del gas. I tassi di emissione verranno misurati mediante misuratori di flusso di gas installati presso il METEC; l'accuratezza di questi misuratori è ben nota.  
I tassi di emissione verranno variati dal di sotto della soglia di rilevamento dello strumento fino al punto di saturazione dello strumento o al limite operativo sicuro per il campionamento. Per i test LDL, il team probabilmente utilizzerà una miscela di metano/azoto o metano/aria per ottenere tassi di emissione molto bassi.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
77  
C.4 Protocollo di test  
Il test sarà diviso in più fasi o "esecuzioni di test", ognuna con un obiettivo specifico. In tutti i casi, ogni strumento HFS sarà utilizzato come indicato dal produttore e i dati saranno registrati dallo schermo dello strumento o elettronicamente, come fornito dallo strumento. Dopo il periodo di formazione (vedi sotto), ai produttori degli strumenti non sarà consentito manipolare o osservare il test in alcun modo, se non per riparare, sostituire o rispondere alle domande sull'strumento.  
  
C.4.1 Formazione  
Ogni azienda HFS fornirà fino a un giorno di formazione al tester prima dello studio. Ciò dovrebbe essere programmato in anticipo direttamente con il tester. I tester di backup possono partecipare alla formazione nel caso in cui siano necessari per coprire il tempo del test.  
  
Prima di ogni giornata di test, il tester seguirà le istruzioni per configurare, verificare e calibrare lo strumento secondo le istruzioni del produttore. Saranno presi appunti per documentare le procedure di avvio e annotare eventuali comportamenti anomali.  
  
C.4.2 Esecuzione di test 1: Determinare il LDL dello strumento sul metano  
Lo scopo di questo test è determinare il LDL di tutti gli strumenti.  
Posizione:  
Il test verrà eseguito utilizzando i regolatori di flusso di massa sul banco di miscelazione del gas METEC e, per flussi estremamente bassi, orifizi critici verificati con provatori volumetrici DryCal. Il rilascio sarà diretto nell'ingresso dello strumento. Non verrà eseguita alcuna chiusura o confezionamento di una posizione di perdita.  
  
Procedura di test:  
1) Inserire il tubo di perdita nell'ingresso del tubo flessibile dello strumento come specificato dal produttore dello strumento.  
2) Impostare il tasso di emissione al LDL indicato dello strumento.  
3) Consentire al tasso di emissione di stabilizzarsi.  
4) Registrare i risultati delle misurazioni.  
5) Ridurre il tasso di emissione e ripetere (3) e (4), registrando ogni tentativo di misurazione, fino a quando lo strumento segnala costantemente zero emissioni o "nessuna emissione rilevata".  
6) Aumentare il tasso di emissione sopra il LDL dello strumento fino a quando lo strumento segnala una misurazione diversa da zero ad ogni tentativo. Registrare ogni misurazione e tentativo di misurazione per un'analisi successiva.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione aperto di campionatore ad alto flusso per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
78  
Risultati attesi e analisi:  
• I risultati di questo esperimento dovrebbero rappresentare la risposta LDL di ogni strumento sotto forma di una curva logistica tra il 0% di rilevamento e il 100% di rilevamento. Come minimo, dovrebbero essere registrate >2 misurazioni ai livelli in cui le emissioni non vengono mai segnalate e >3 misurazioni ai livelli in cui vengono sempre segnalate emissioni diverse da zero. Di seguito è riportato un esempio. L'esempio si riferisce a un BHFS testato come parte dello studio GEF.  
25  
  
C.4.3 Esecuzione del test 2: Determinare l'accuratezza dello strumento  
Lo scopo di questo test è mappare l'accuratezza di ogni strumento nell'ambito del suo intervallo di misura dichiarato.  
Posizione:  
Il test verrà eseguito utilizzando l'impianto di miscelazione del gas presso METEC, con la fuoriuscita diretta nell'ingresso dello strumento. I flussi più elevati verranno testati utilizzando fuoriuscite misurate da tubazioni o condotte aperte a METEC che possono essere facilmente racchiuse.  
Procedura di test:  
1) Il tester creerà un set di velocità di emissione che vanno da un livello vicino al LDL determinato nel test precedente fino alla valutazione massima di ciascuno strumento nello studio. Se la velocità massima di flusso non può essere raggiunta a METEC o non è sicura, il tester selezionerà una velocità massima di flusso che può essere implementata e annoterà eventuali deviazioni dalle specifiche del produttore nelle note. Il test della valutazione massima verrà eseguito su condotte esposte che sono facili da racchiudere ("bag") per il campionamento. Il tester selezionerà la posizione in consultazione con il personale di METEC. Le velocità di perdita superiori a 80 LPM verranno eseguite con gas di mercato e potrebbero essere "bagged" se necessario per garantire una cattura completa. Le velocità di perdita inferiori a 80 LPM verranno eseguite utilizzando metano e tubazioni dirette nell'ingresso dello strumento.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Campione ad alta portata open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
79  
Verranno selezionati dieci o più tassi di emissione. I tassi selezionati potrebbero essere distribuiti in modo non uniforme se il team lo ritiene necessario per coprire l'intero intervallo dello strumento.  
  
2) Per ogni tasso di emissione, il tester dovrà:  
1. Rimuovere tutti gli strumenti dalla posizione della perdita.  
2. Avviare le emissioni al tasso desiderato.  
3. Seguire il protocollo dello strumento, chiudere/catturare la perdita e registrare una misurazione.  
4. Registrare il tasso di emissione dall'attrezzatura METEC.  
5. Ripetere fino a quando tutti gli strumenti sono stati testati al tasso impostato. Casualizzare l'ordine in cui gli strumenti vengono utilizzati.  
  
3) Per circa il 25% dei tassi di perdita, la procedura al punto (2) verrà ripetuta altre 2 volte per fornire una misura di ripetibilità per ogni strumento.  
  
Risultati attesi e analisi:  
• I tassi di emissione effettivi e riportati verranno confrontati su un grafico XY per determinare l'accuratezza dello strumento sia per intervallo di tasso di emissione che per l'intero intervallo operativo dello strumento.  
• La ripetibilità verrà valutata in modo simile.  
  
C.4.4 Esecuzione del test 3: Determinare la sensibilità dello strumento alla composizione del gas  
Lo scopo di questo test è misurare se i tassi di emissione riportati dallo strumento sono influenzati da una gamma di idrocarburi diversi dal metano nel flusso di emissione.  
  
Posizione:  
Tutti i test verranno eseguiti utilizzando l'impianto di miscelazione del gas presso METEC, con il rilascio diretto nell'ingresso dello strumento. Non verrà eseguita alcuna chiusura o confezionamento di una posizione di perdita.  
  
Procedura di test:  
1) Il tester creerà una matrice di composizioni di gas umido che variano dal 30% al 100% di metano, con diluizione variabile di etano e propano. Verranno selezionate circa 7 miscele di gas.  
2) Per ogni miscela di gas selezionata:  
1. Il tester selezionerà un tasso di emissione all'interno dell'intervallo operativo dello strumento, approssimativamente al 25% tra LDL e USL.  
2. Consentire allo strumento di stabilizzarsi su una lettura zero in aria pulita.  
3. Inserire l'uscita dell'impianto di miscelazione del gas nell'ingresso dello strumento.  
4. Consentire alla misurazione di stabilizzarsi.  
5. Registrare la lettura dello strumento e le letture dell'impianto di miscelazione del gas.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
80  
6. Rimuovere l'uscita del gas dall'ingresso dello strumento.  
7. Tornare al passaggio 2 con una miscela di gas diversa; ripetere i passaggi 2-6 per replicare i risultati.  
3) Durante il test, registrare eventuali messaggi di errore segnalati dallo strumento.  
Risultati attesi e analisi:  
• Analizzare i tassi di emissione riportati in relazione alla miscela di gas, considerando se lo strumento riporta metano, idrocarburi totali o altre metriche.  
C.4.5 Test Run 4: Determinare la sensibilità dello strumento alle posizioni di misurazione del mondo reale  
Lo scopo di questo test è determinare quanto facilmente ogni strumento può gestire le emissioni in posizioni non ideali, come all'interno di contenitori, superfici di perdite ampie, ecc.  
Posizione:  
I test si svolgeranno in numerose posizioni intorno a METEC che variano in complessità e accessibilità. Le posizioni includeranno, almeno:  
• Una posizione con un grande diametro esterno, come l'anello superiore del pozzo.  
• Una fonte di grande diametro con bassa velocità di flusso, come un coperchio di ispezione.  
• Una posizione che è strutturalmente ingombrante da racchiudere, come un attuatore di valvola o una scatola di controllo pneumatica.  
Procedura di test:  
1) Il tester selezionerà cinque posizioni a METEC, come indicato nell'elenco "posizione" sopra.  
2) Il tester selezionerà due tassi di emissione per ogni strumento, uno al 200% del LDL e uno nella gamma media dell'intervallo di misurazione dello strumento, come determinato nel Test Run 2. Se il tasso elevato non è possibile o non sicuro in una determinata posizione, il tester utilizzerà un tasso ridotto e lo annoterà nel registro sperimentale.  
3) Per ogni combinazione di tasso di emissione/posizione:  
1. Consentire allo strumento di stabilizzarsi su una lettura zero in aria pulita.  
2. Sigillare o racchiudere il punto di perdita come indicato nelle istruzioni del produttore.  
3. Consentire alla misurazione di stabilizzarsi.  
4. Registrare la lettura dello strumento e di METEC.  
5. Registrare osservazioni qualitative sulla facilità/difficoltà di effettuare la misurazione.  
6. Tornare al passaggio 2 con un altro tasso di emissione/posizione; ripetere i passaggi 2-5.  
4) Se possibile, ripetere i passaggi nel punto (3) tre volte per ogni strumento in ogni posizione e tasso di flusso.  
Risultati attesi e analisi:  
• Identificare eventuali deviazioni o differenze, per strumento, nella misurazione in posizioni difficili e qualsiasi dipendenza da tasso di emissione al momento del test.  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,```  
Apri - Campionatore ad Alto Flusso Open-Source per la Quantificazione delle Perdite di Gas Naturale  
  
81  
Riferimenti  
1. Zimmerle, D. J. et al. Emissioni di metano dal sistema di trasmissione e stoccaggio del gas naturale negli Stati Uniti. Environ. Sci. Technol. 49, 9374–9383 (2015).  
2. Subramanian, R. et al. Emissioni di metano dalle stazioni di compressione del gas naturale nel settore della trasmissione e stoccaggio: misurazioni e confronti con il protocollo del programma di segnalazione dei gas serra dell'EPA. Environ. Sci. Technol. 49, 3252–3261 (2015).  
3. Lamb, B. K. et al. Misure dirette mostrano una diminuzione delle emissioni di metano dai sistemi di distribuzione locale del gas naturale negli Stati Uniti. Environ. Sci. Technol. 49, 5161–5169 (2015).  
4. Allen, D. T. et al. Emissioni di metano da apparecchiature di processo presso siti di produzione di gas naturale negli Stati Uniti: controllori pneumatici. Environ. Sci. Technol. 49, 633–640 (2015).  
5. Allen, D. T. et al. Emissioni di metano da apparecchiature di processo presso siti di produzione di gas naturale negli Stati Uniti: scarichi di liquidi. Environ. Sci. Technol. 49, 641–648 (2015).  
6. DOE annuncia 13 milioni di dollari per quantificare e mitigare le emissioni di metano dall'infrastruttura del gas naturale. Energy.gov https://www.energy.gov/articles/doe-announces-13-million-quantify-and-mitigate-methane-emissions-natural-gas-infrastructure.  
7. Misure integrate specifiche dei componenti per sviluppare fattori di emissione per i compressori e ridurre le incertezze nell'inventario dei gas serra | netl.doe.gov. https://www.netl.doe.gov/node/2219.  
8. Vaughn, T. L. et al. La variabilità temporale spiega in gran parte la differenza dall'alto verso il basso nelle stime delle emissioni di metano da una regione di produzione di gas naturale. Proc. Natl. Acad. Sci. 201805687 (2018) doi:10.1073/pnas.1805687115.  
9. Roscioli, J. R. et al. Misure delle emissioni di metano da impianti di raccolta e lavorazione del gas naturale: metodi di misurazione. Atmos Meas Tech 8, 2017–2035 (2015).  
10. Lamb, B. K. et al. Sviluppo di metodi di tracciamento atmosferico per misurare le emissioni di metano da impianti di gas naturale e aree urbane. Environ. Sci. Technol. 29, 1468–1479 (1995).  
11. Conley, S. et al. Applicazione del teorema di Gauss per quantificare le emissioni di superficie localizzate da misurazioni aeree di vento e gas traccianti. Atmospheric Meas. Tech. (2017) doi:https://doi.org/10.5194/amt-10-3345-2017.  
12. Harrison, M. R., Shires, T. M., Wessels, J. K. & Cowgill, R. M. Emissioni di metano dall'industria del gas naturale, Volume 1: Sommario esecutivo. 24 (1996).  
13. Vaughn, T. L. et al. Confronto delle stime del tasso di emissione di metano a livello di impianto presso stazioni di raccolta e potenziamento del gas naturale. Elem Sci Anth 5, (2017).  
14. Bell, C. et al. Confronto delle stime delle emissioni di metano da diverse tecniche di misurazione presso i siti di produzione di gas naturale. Elem Sci Anth 5, (2017).  
15. Zimmerle, D. J. et al. Emissioni di metano dai gasdotti di raccolta nelle condotte dello scisto di Fayetteville e linee guida per future campagne di misurazione dei gasdotti. Elem Sci Anth 5, (2017).  
16. Programma di segnalazione dei gas serra, Sottoparte W. Codice dei regolamenti federali.  
17. US EPA. Metodo 21 - Determinazione delle perdite di composti organici volatili.  
https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/m-21.pdf (2017).  
18. Heath Consultants, Inc. Borsa di misurazione anti-statica.  
19. Bacharach Hi-Flow sampler, Istruzione 0055-9017, Funzionamento e manutenzione. (2015).  
20. Howard, T. Lo studio dell'Università del Texas sottovaluta le emissioni nazionali di metano presso i siti di produzione di gas naturale a causa del fallimento del sensore dello strumento. Energy Sci. Eng. 3, 443–455 (2015).  
21. Howard, T., Ferrara, T. W. & Townsend-Small, A. Fallimento della transizione del sensore nell'alto campionatore di flusso: Implicazioni per gli inventari delle emissioni di metano dell'infrastruttura del gas naturale. J. Air Waste Manag. Assoc. 65, 856–862 (2015).  
```,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
  
,Apri - Campione ad alto flusso open-source per la quantificazione delle perdite di gas naturale  
  
82  
22. Alvarez, R. A., Lyon, D. R., Marchese, A. J., Robinson, A. L. & Hamburg, S. P. Possibile malfunzionamento nel campionatore di metano ampiamente utilizzato merita attenzione ma ha limitate implicazioni per le stime delle emissioni della catena di approvvigionamento. Elem Sci Anth 4, (2016).  
23. EPA non ha utilizzato studi presumibilmente difettosi per stimare le emissioni di metano o stabilire nuovi standard di prestazione delle fonti per la produzione di petrolio e gas naturale. 19 (2018).  
24. Connolly, J. I., Robinson, R. A. & Gardiner, T. D. Valutazione delle caratteristiche e dei possibili modi di guasto del campionatore Bacharach Hi Flow® durante la misurazione delle emissioni di metano. Measurement 145, 226-233 (2019).  
25. Zimmerle, D. et al. Emissioni di metano da stazioni di compressione di raccolta negli Stati Uniti. Environ. Sci. Technol. 54, 7552-7561 (2020).  
26. GSI Environmental. Bozza del rapporto finale: Quantificazione delle emissioni di metano da pozzi marginali (piccola produzione) di petrolio e gas. https://www.ipaa.org/wp-content/uploads/2022/01/Attachment-C-DOE\_Draft-Final\_Project-Report\_31dec2021.pdf (2021).  
27. Johnson, D. R., Covington, A. N. & Clark, N. N. Progettazione e utilizzo di un sistema di campionamento a flusso completo (FFS) per la quantificazione delle emissioni di metano. JoVE J. Vis. Exp. e54179-e54179 (2016) doi:10.3791/54179.  
28. Tran, H. N. Q. et al. Emissioni di composti organici da stagni di acque prodotte II: valutazione delle misurazioni con camera a flusso inverso. J. Air Waste Manag. Assoc. 0, null (2018).  
29. Riddick, S. N. et al. Misurazione delle emissioni di metano da pozzi petroliferi e gas inattivi e attivi in Virginia Occidentale. Sci. Total Environ. 651, 1849-1856 (2019).  
30. Riddick, S. N., Mauzerall, D. L., Celia, M. A., Kang, M. & Bandilla, K. Variabilità osservata nel tempo nelle emissioni di metano da pozzi petroliferi e gas abbandonati. Int. J. Greenh. Gas Control 100, 103116 (2020).  
31. Deighton, J. A., Townsend-Small, A., Sturmer, S. J., Hoschouer, J. & Heldman, L. Le misurazioni mostrano che i pozzi marginali sono una fonte sproporzionata di metano rispetto alla produzione. J. Air Waste Manag. Assoc. 0, null (2020).  
32. Air Movement and Control Association. AMCA 210: Metodi di laboratorio per la prova di ventilatori per valutazioni. (1999).  
33. AGA 3.1: Misurazione con orifizio di gas naturale e altri fluidi idrocarburici correlati: Parte 1. 66.  
34. ISO 5167-1:2003 Misurazione del flusso di fluido mediante dispositivi differenziali di pressione inseriti in condotti a sezione circolare completamente riempiti.  
35. ASTM E2029-11 Metodo di prova standard per la misurazione del flusso volumetrico e di massa in un condotto utilizzando la diluizione del gas tracciante.,  
  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------  
--------------------------------------------------------------------------------------------------------