

R5 - Studio ed Identificazione dei componenti hardware (sensori ed elettronica di condizionamento a supporto)

Sommario

1. Introduzione	7
2. Scenario applicativo	9
2.1. Motivazioni alla Realizzazione di Sistemi IoT per l'Industria 4.0	9
3. Stato dell'arte della sensoristica per il risparmio energetico	11
3.1. Classificazione e Tipologie di Sensori per il Risparmio Energetico	11
3.1.1. Sensori di Luce (Luxometri)	11
3.1.2. Sensori di Corrente	11
3.1.3. Sensori di vibrazione (Accelerometri)	12
3.1.4. Sensori di Temperatura e di umidità	14
4. Stato dell'arte della sensoristica per la qualità dell'ambiente di lavoro e per la salvaguardia della salute degli operatori	15
4.1. Monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti di lavoro	15
4.2. Tecnologie di sensori di gas	16
4.3. Sensori di gas a semiconduttore – MOS type sensors	18
4.4. Sensori di gas ottici – optical gas sensors	20
4.5. Sensori di gas catalitici - catalytic gas sensor	26
4.6. Sensori di gas elettrochimici - electrochemical gas sensor	28
4.7. Sensori di particolato	32
4.8. Sensori Ottici di Gas basati sulla Risonanza Plasmonica di Superficie	36
4.9. Sensori di temperatura e di umidità	38
5. Panoramica commerciale di sensori per la rilevazione di gas	45
5.1. Process Sensig TechnologiesPST	45
5.2. ABB	55
5.3. Mattler Toledo	60
5.4. Sensori di gas della TechMaker	64
5.5. Figaro Engineering	67
6. Panoramica commerciale di sensori di temperatura ed umidità	71
6.1. Sensori di temperatura e umidità indoor	71
6.2. DHT22 (AM2302) – Adafruit	71
6.3. Sensirion SHT31 – Sensirion	72
6.4. Bosch BME280 – Bosch Sensortec	73
6.5. Sensori di temperatura e umidità outdoor	74
6.6. SHT75 – Sensirion	74
6.7. Decagon Devices VP-4	76
6.8. Vaisala HMP155	77

6.9. Sensori di temperatura ed umidità della Omni-Sensors	79
7. Panoramica commerciale di sensori di corrente	82
7.1. LEM LA 55-P	82
7.2. Honeywell CSLA2CD	82
7.3. YHDC SCT013	83
7.4. CR Magnetics CR8348.....	84
7.5. Tamura S23P-N	84
8. Panoramica commerciale di sensori di luce	86
8.1. TSL2561 - Sensore di luce digitale.....	86
8.2. BH1750FVI - Sensore di luce ambientale digitale.....	86
8.3. VEML7700 - Sensore di luce ambientale	87
8.4. OPT3001 - Sensore di luce ambientale	88
8.5. TEMT6000 - Sensore di luce ambientale analogico.....	88
9. Panoramica commerciale di sensori di vibrazione (accelerometri)	91
9.1. ADXL335 - Accelerometro a 3 assi analogico.....	91
9.2. MPU-6050 - Accelerometro e giroscopio a 6 assi	91
9.3. ADXL345 - Accelerometro digitale a 3 assi	92
9.4. LIS3DH - Accelerometro digitale a 3 assi	93
9.5. BMA400 - Accelerometro a 3 assi a bassa potenza	93
9. Identificazione dei sensori	95
9.1. Selezione della Sensoristica per il risparmio energetico	95
9.2. Selezione della Sensoristica per Qualità dell'ambiente di lavoro per la salvaguardia della salute operatori.....	99
7. Conclusioni	115
8. Bibliografia	116

Indice figure

Figura 1: Classificazione dei sensori secondo la tipologia di materiale sensibile al gas target	17
Figura 2: Classificazione dei sensori secondo il principio operativo	18
Figura 3: funzionamento del rilevamento dei gas su substrato MOS di tipo n con gas riducenti.....	19
Figura 4: circuito	20
Figura 5: Tecnologie ottiche di rilevamento dei gas	20
Figura 6: Spettri di assorbimento nel medio infrarosso di molecole selezionate con le loro intensità relative [60].....	21
Figura 7: Sensore ottico di gas basato sulla legge di Beer-Lambert. (a) Non è percepito nessun segnale quando l'emettitore è spento (b) Il segnale rilevato è al suo massimo quando l'emettitore è acceso e non è presente nessun gas e (c) diminuisce con la concentrazione c del gas quando esso è presente	22

Figura 8: Configurazione circuitale esemplificativa dove con A e B si indicano due materiali metallici diversi [68].....	23
Figura 9: Rappresentazione circuitale di una termocoppia [69]	23
Figura 10:Schematizzazione di una termopila composta da termocoppie in serie. [70]	24
Figura 11: Diagramma di una termopila a disco [71]	24
Figura 12: Rappresentazione schematica del fenomeno della piroelettricità [7]	25
Figura 13: Schematizzazione di un sensore piroelettrico [72]	25
Figura 14: Simbolo elettrico del fotodiodo [73].....	25
Figura 15: Diagramma di un bolometro [74]	26
Figura 16:Rappresentazione di un pellistore [11]	27
Figura 17:Ponte di Wheatstone con l'inserimento dell'elemento rilevatore (contrassegnato in figura come Active Bead) e l'elemento compensatore (contrassegnato in figura come Reference Bead) [11]	27
Figura 18: Come esempio di sensore potenziometrico si è scelto uno strumento per la misura di pH con elettrodo di lavoro in antimonio/ossido di antimonio [62]	29
Figura 19: Rappresentazione schematica di sensori di gas potenziometrici di tipo I [16]	30
Figura 20: Rappresentazione schematica di un sensore amperometrico.....	30
Figura 21: A sinistra un sensore elettrochimico amperometrico di CO a destra un sensore elettrochimico amperometrico di O ₂	31
Figura 22:Schematizzazione delle possibili interazioni tra un raggio di luce e la materia	33
Figura 23: Set-up del sensore ottico per il sensing del particolato	33
Figura 24: Diagramma di un Surface Acoustic Wave Sensor [61]	34
Figura 25:Schematizzazione di un interdigitated transducer	35
Figura 26:Circuito di un sensore di particolato composto da un sensore SAW sensibile al particolato e uno di riferimento [29]	35
Figura 27: Rappresentazione di un SPR	36
Figura 28:Rappresentazione di un LSPR.....	37
Figura 29: termocoppie.....	39
Figura 30: Effetto Seeback	39
Figura 31: RTD.....	39
Figura 32: Sensore di temperatura	40
Figura 33: Termistore.....	40
Figura 34: termistore	40
Figura 35: sonda di temperatura	41
Figura 36: termometro ad infrarossi.....	41
Figura 37: Termocamera	42
Figura 38: data logger di temperatura.....	42
Figura 39: sensori di gas serie Dynament Platinum	46
Figura 40: Sensore ad infrarossi Dual-Gas per metano/ossido di carbonio.....	48
Figura 41: Sensori infrarossi per idrocarburi - Dynament serie standard	50
Figura 42: sensore CO ₂ miniaturizzato CozIR®-Blink	50
Figura 43: Sensore di CO ₂ miniaturizzato a basso consumo energetico - SST CozIR-Blink.....	51
Figura 44: Sensore di CO ₂ versione ExplorIR- M	52
Figura 45: dimensioni Sensore di CO ₂ versione ExplorIR- M	52
Figura 46: Sensori di gas a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie standard	53
Figura 47: Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie Platinum	54
Figura 48: Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie Platinum	55

Figura 49: Rilevatore di gas EL3060	55
Figura 50: dimensioni EL3060	56
Figura 51: LGR-ICOS	58
Figura 52: Analizzatore per fase gas intervallo di CO ₂ %: GPro 500.....	62
Figura 53: analizzatore di ossigeno in fase gas GPro® 500	63
Figura 54: Analizzatore per fase gas intervallo di CO%: GPro 500.....	64
Figura 55: moduli sensori di gas.....	65
Figura 56: sensore gas GPL	65
Figura 57: Sensore MQ-8	66
Figura 58: Sensore MQ-9	66
Figura 59: IRON/CA3S	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 60: dimensioni del dispositivo IRON/CA3S.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 61: Rivelatori di gas WPD/MOS.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 62: rivelatori della serie ATX/CAL.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 63: versioni disponibili rivelatori della serie ATX/CAL.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 64: rivelatori WPD/CAL	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 65: rivelatori B20-WPDBR/CA3	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 66: Rivelatori ATX/ECL.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 67: Sensore IRON/CAL.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 68: Sensore IRON7CAL	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 69: Rilevatore di gas IRON/CO2	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 70: Dimensioni del dispositivo IRON/CO2.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 71: Rivelatori WPDL/CA3	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 72: rilevatore di gas WPDS7CO2	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 73: Rivelatore WPDS/CAx.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 74: Rivelatore FLY.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 75: sensori di gas della Figaro	69
Figura 76: analizzatore.....	70
Figura 77: Sensore LEM LA 55 P	82
Figura 78: sensori di corrente Honeywell	83
Figura 79: sensore di corrente YHDC SCT013	83
Figura 80: sensore di corrente Tamura.....	84
Figura 81: sensore di luce digitale TSL2561	86
Figura 82: sensore di luce ambientale BH1750FVI.....	87
Figura 83: sensore di luce ambientale VEML7700	87
Figura 84: sensore di luce ambientale OPT3001.....	88
Figura 85: sensore di luce TEMT6000	89
Figura 86: sensore di corrente	96
Figura 87: Diagramma di collegamento del sensore.....	96
Figura 88: sensore di accelerazione AZ Delivery GY-521	97
Figura 89: sensore di luce ambientale	99
Figura 90: sensore di ammoniaca	99
Figura 91: Schema elettrico di Fermion: sensore MEMS NH3 e Arduino UNO.....	100
Figura 92: Schema elettrico per il sensore VOC.....	100
Figura 93: Schema elettrico del sensore NO ₂ MEMS Fermion e Arduino UNO.....	101
Figura 94: sensore di ossigeno.....	102

Figura 95: sensore di ozono	104
Figura 96: sensore di metano CH4.....	105
Figura 97: sensore di monossido di carbonio	107
Figura 98: sensore di qualità dell'aria	108
Figura 99: schematic del funzionamento del sensore di qualità dell'aria.....	108
Figura 100: Funzionamento	109
Figura 101: sensore di fiamma (1)	111
Figura 102: sensore di fiamma (2)	111
Figura 103: diagramma a blocchi del sensore.....	112
Figura 104: sensore della qualità dell'aria Sensirion	112
Figura 105: dimensioni del sensore	112

Indice tabelle

Tabella 1.....	21
Tabella 2: Attuali standard di esposizione al PM10 e al PM 2,5 nei Paesi occidentali e orientali.....	32
Tabella 3: specifiche tecniche serie Dynament Platinum SIL1 Certified	46
Tabella 4: specifiche tecniche Sensori infrarossi Dual-Gas per metano/ossido di carbonio.....	49
Tabella 5: specifiche tecniche Sensore di CO2 versione ExploIR- M	53
Tabella 6: Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie Platinum.....	54
Tabella 7: Specifiche - Analizzatore per fase gas intervallo di CO ₂ %.....	62
Tabella 8: Specifiche analizzatore di ossigeno in fase gas	63
Tabella 9: Specifiche Analizzatore per fase gas intervallo di CO%:	64
Tabella 10: dati tecnici sensore MQ-2	65
Tabella 11: dati tecnici sensore MQ-8	66
Tabella 12: Dati tecnici sensore MQ-9	66
Tabella 13: specifiche tecniche IRON/CA3S	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 14: Specifiche tecniche rilevatori di gas WPD/MOS	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 15: Specifiche tecniche del rivelatore rivelatori WPD/CAL	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 16: Specifiche tecniche rivelatori B20-WPDBR/CA3.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 17: Specifiche tecniche Rivelatori ATX/ECL	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 18: Specifiche tecniche IRON7CAL	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 19: Specifiche tecniche Rivelatori WPDL/CA3	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 20: specifiche tecniche rilevatore di gas WPDS7CO2	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 21: Specifiche tecniche WPDS/CAx	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 22: Specifiche tecniche rivelatore FLY	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 23: confronto tra i sensori di corrente	85
Tabella 24: confronto tra i sensori di luce	90
Tabella 25: confronto tra le prestazioni degli accelerometri	95
Tabella 26: Specifiche tecniche del sensore	110
Tabella 27: caratteristiche tecniche del sensore della qualità dell'aria della Sensirion.....	113
Tabella 28: specifiche del sensore per la misura di temperatura ed umidità	113
Tabella 29: Specifiche del sensore per la misura di determinate concentrazioni di gas.....	114

1. Introduzione

Questo documento rappresenta l'output relativo all'attività - A3.1 Studio ed identificazione dei componenti hardware (sensori ed elettronica di condizionamento a supporto) e del firmware (RI) presente nel WP3 dal titolo Studio, progettazione ed implementazione dei componenti hardware e firmware del prototipo IoT del progetto Smart Work Platform - Piattaforma IoT per la manutenzione predittiva, l'efficienza energetica delle macchine industriali ed il benessere dell'uomo nei luoghi di lavoro. Tale progetto in generale ha come obiettivo la realizzazione di una soluzione integrata per favorire la transizione di impianti industriali da tradizionali ad impianti di Industria 4.0. In particolare, si prevede la realizzazione di un dispositivo IoT munito di una piattaforma tecnologica di virtualizzazione e monitoraggio dell'impianto produttivo esistente finalizzata all'ottimizzazione dell'efficienza energetica, alla manutenzione predittiva e al miglioramento del livello di benessere e sicurezza dell'uomo nei luoghi di lavoro.

La soluzione proposta si implementa attraverso i seguenti obiettivi specifici (OS):

- OS1. Implementazione di un dispositivo IoT costituito da sensori in grado di controllare i principali parametri dell'impianto e monitorare l'ambiente di lavoro
- OS2. Implementazione di una piattaforma per il monitoraggio e la virtualizzazione degli impianti industriali dotata di Intelligenza Artificiale (IA) per l'analisi dei dati estratti dai sensori.

Per il dispositivo IoT, sono stati individuati sensori in grado di monitorare parametri fisici legati al:

- Risparmio Energetico (come ad esempio la corrente assorbita per ogni fase, vibrazioni e accelerazioni)
- Qualità dell'ambiente di lavoro e per la salvaguardia della salute degli operatori (come ad esempio sensori per il monitoraggio della temperatura, umidità, CO₂, Luminosità, PM2,5, PM10, VOC, Ossigeno, Formaldeide, Presenza di fiamme, Sensori effetto hall, Pressione e frequenza sonora).

Con riferimento alla piattaforma per il monitoraggio e la virtualizzazione degli impianti industriali, si prevede la realizzazione un sistema integrato capace di acquisire i dati dai sensori installati sugli impianti e una piattaforma di virtualizzazione che permetta agli utenti di accedere a aggregazioni di tali dati (grafici, serie temporali storiche) al fine di effettuare un monitoraggio continuo degli impianti sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista del loro funzionamento. Ciò consente di identificare eventuali azioni di manutenzione predittiva e favorire il risparmio energetico mediante la virtualizzazione della componentistica in uso.

In particolare nel seguito del documento le tematiche trattate sono le seguenti:

- Scenario applicativo con la descrizione delle motivazioni che stanno alla base della realizzazione di Sistemi IoT per l'Industria 4.0
- Stato dell'arte della sensoristica per il risparmio energetico in cui viene riportata i seguenti item
 - Classificazione e Tipologie di Sensori per il Risparmio Energetico
 - Sensori di Luce (Luxometri)
 - Sensori di Corrente
 - Sensori di vibrazione (Accelerometri)
 - Sensori di Temperatura e di umidità

- Stato dell'arte della sensoristica per la qualità dell'ambiente di lavoro e per la salvaguardia della salute degli operatori
 - Monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti di lavoro
 - Tecnologie di sensori di gas
 - Sensori di temperatura e di umidità
- Panoramica commerciale di sensori per la rilevazione di gas
- Panoramica commerciale di sensori di temperatura ed umidità
- Panoramica commerciale di sensori di corrente
- Panoramica commerciale di sensori di luce
- Panoramica commerciale di sensori di vibrazione (accelerometri)
- Identificazione dei sensori
 - Selezione della Sensoristica per il risparmio energetico
 - Selezione della Sensoristica per Qualità dell'ambiente di lavoro per la salvaguardia della salute

Sudetta attività risulta completata con successo. Durante l'esecuzione di tale attività non si sono riscontrate anomalie o criticità.

2. Scenario applicativo

Il progetto “**Smart Work Platform**” si inserisce in uno scenario industriale in forte evoluzione, dove l’integrazione di tecnologie intelligenti e l’adozione di pratiche avanzate come l’**Industria 4.0** sono elementi chiave per aumentare la competitività e la sostenibilità. Gli impianti produttivi tradizionali, basati su sistemi di automazione e controllo convenzionali, presentano spesso inefficienze dovute alla mancanza di un monitoraggio continuo e dettagliato delle risorse, sia umane che tecnologiche. La transizione verso modelli più avanzati richiede l’introduzione di dispositivi **IoT** (Internet of Things) capaci di monitorare in tempo reale l’operatività delle macchine, le condizioni ambientali e lo stato di salute degli operatori.

Il progetto prevede l’implementazione di un dispositivo IoT dotato di una piattaforma di virtualizzazione e monitoraggio, capace di raccogliere dati da sensori e macchinari già esistenti per analizzarli attraverso algoritmi di **manutenzione predittiva**, ottimizzare il consumo energetico e migliorare le condizioni di **benessere e sicurezza dei lavoratori**. Questa soluzione contribuisce all’efficienza dell’intero processo produttivo, consentendo di trasformare impianti industriali tradizionali in sistemi **Industria 4.0** moderni e intelligenti.

2.1. Motivazioni alla Realizzazione di Sistemi IoT per l’Industria 4.0

Le ragioni per cui molti developpers sono impegnati allo sviluppo di sistemi IoT per l’industria 4.0 sono i seguenti:

1. **Ottimizzazione dell’efficienza energetica:** Uno dei principali fattori che spinge le aziende a implementare sistemi IoT è l’ottimizzazione del consumo energetico. Le macchine industriali spesso operano in modo non ottimale, causando sprechi di energia. Attraverso sensori e dispositivi IoT che monitorano i consumi in tempo reale, è possibile identificare le inefficienze e implementare strategie di risparmio, riducendo i costi operativi e migliorando la sostenibilità ambientale dell’impianto.
2. **Manutenzione predittiva:** La manutenzione dei macchinari industriali è tradizionalmente eseguita in modo reattivo (quando si verifica un guasto) o programmato (manutenzione preventiva). Tuttavia, queste pratiche possono portare a ferme non pianificate, costi elevati di riparazione e perdita di produttività. L’introduzione della **manutenzione predittiva** permette di rilevare anomalie nel funzionamento delle macchine in fase precoce, prevenendo guasti e migliorando la longevità delle attrezzature. Questo è possibile grazie alla raccolta e all’analisi di dati sui parametri di funzionamento (temperature, vibrazioni, corrente elettrica, ecc.), utilizzando algoritmi di intelligenza artificiale per prevedere le condizioni di usura e la necessità di interventi.
3. **Miglioramento del benessere e sicurezza dei lavoratori:** La sicurezza e il benessere degli operatori in ambienti industriali è una priorità crescente. I sistemi IoT permettono di monitorare le condizioni ambientali (temperatura, umidità, qualità dell’aria, rumore) e lo stato di salute degli operatori (posizione, movimenti ripetitivi, esposizione a rischi). Grazie a questi dati, è possibile ottimizzare i turni di lavoro, rilevare condizioni potenzialmente dannose e prevenire incidenti, contribuendo a un ambiente di lavoro più sicuro e confortevole.

4. **Digitalizzazione e automazione dei processi:** Le aziende che adottano soluzioni Industria 4.0 stanno modernizzando i loro processi produttivi attraverso la digitalizzazione e l'automazione. La **virtualizzazione** degli impianti, cioè la creazione di copie digitali (gemelli digitali) dei macchinari fisici, permette di simulare i processi, ottimizzarli e migliorarne le prestazioni. Questo approccio consente non solo un monitoraggio remoto in tempo reale, ma anche una gestione più efficiente delle risorse e dei processi, con un impatto positivo sulla produttività complessiva.
5. **Sostenibilità e conformità normativa:** L'adozione di tecnologie per l'efficienza energetica e la riduzione dei rischi ambientali è spesso spinta da normative governative sempre più stringenti e dall'esigenza di adottare pratiche sostenibili. I sistemi IoT aiutano le aziende a conformarsi a queste normative, monitorando le emissioni, il consumo di energia e l'uso delle risorse in modo da ridurre l'impatto ambientale e migliorare la reputazione dell'azienda sul mercato.

In altri termini, la realizzazione della piattaforma IoT **Smart Work Platform** risponde alle esigenze attuali dell'industria di modernizzare gli impianti produttivi, rendendoli più efficienti, sicuri e sostenibili. La combinazione di tecnologie IoT, algoritmi di manutenzione predittiva e soluzioni per il miglioramento del benessere lavorativo offre vantaggi significativi sia in termini economici che operativi. Implementare sistemi di questo tipo non solo consente di ridurre i costi, ma aumenta anche la competitività dell'azienda e favorisce la transizione verso un modello produttivo più sostenibile e digitale.

3. Stato dell'arte della sensoristica per il risparmio energetico

La sensoristica impiegata per il risparmio energetico è fondamentale per monitorare e ottimizzare il consumo di energia negli impianti industriali, nei sistemi di automazione e negli edifici. Questi sensori raccolgono dati in tempo reale su diversi parametri energetici e ambientali, permettendo di identificare inefficienze e di regolare l'utilizzo delle risorse in modo più intelligente.

3.1. Classificazione e Tipologie di Sensori per il Risparmio Energetico

3.1.1. Sensori di Luce (Luxometri)

I sensori di luce misurano l'intensità luminosa in un ambiente. Possono essere utilizzati per ottimizzare l'illuminazione artificiale in funzione della luce naturale disponibile, riducendo i consumi energetici.

Principio di funzionamento:

Fotodiоди: Convertiscono la luce in corrente elettrica. La quantità di corrente generata è proporzionale all'intensità luminosa che colpisce il fotodiodo. I fotodiodi hanno una risposta molto veloce e sono ampiamente usati in applicazioni di illuminazione intelligente.

Fototransistor: Funzionano come i fotodiodi ma con una maggiore sensibilità alla luce. Forniscono un segnale amplificato e sono utilizzati in applicazioni dove è necessaria una rilevazione più precisa.

LDR (Light Dependent Resistor): Sono resistori la cui resistenza diminuisce all'aumentare dell'intensità luminosa. Vengono spesso utilizzati per controllare l'accensione e lo spegnimento automatico delle luci.

Applicazione:

Sistemi di illuminazione intelligente: Regolano l'illuminazione artificiale in base alla luce naturale presente, contribuendo a ridurre il consumo energetico negli edifici, soprattutto in uffici, scuole e ambienti commerciali.

3.1.2. Sensori di Corrente

Questi sensori monitorano il consumo elettrico in tempo reale e aiutano a identificare potenziali sprechi o anomalie nel consumo di energia. Possono essere utilizzati per ottimizzare il carico elettrico e ridurre il consumo energetico complessivo.

Principio di funzionamento:

Trasformatori di corrente: Rilevano la corrente elettrica che scorre attraverso un cavo conduttore e generano un segnale proporzionale alla corrente. Possono essere utilizzati per monitorare carichi elettrici di macchinari e impianti.

Sensori Hall: Utilizzano l'effetto Hall per misurare la corrente senza contatto fisico. La corrente che scorre attraverso un conduttore crea un campo magnetico che viene rilevato dal sensore.

Sensori shunt: Misurano la corrente attraverso una piccola resistenza posta in serie con il carico. Il voltaggio misurato ai capi della resistenza è proporzionale alla corrente che scorre nel circuito.

Applicazione:

Monitoraggio del consumo energetico: Questi sensori vengono utilizzati per ottimizzare i consumi di energia elettrica nei processi industriali, identificando macchinari che consumano più energia del necessario o per bilanciare carichi tra diverse sezioni dell'impianto.

3.1.3. Sensori di vibrazione (Accelerometri)

Un accelerometro è uno strumento di misura in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione. In effetti esso misura la forza specifica (forza per unità di massa), ma grazie alla seconda legge della dinamica di Newton le due affermazioni sono sostanzialmente equivalenti. Negli ultimi anni l'importanza di questi sensori è notevolmente accresciuta, questo perché, accanto alle tradizionali applicazioni in ambito scientifico e aerospaziale, si è sviluppato il loro uso in molti campi civili (automobilistico, testing, analisi meccanica, ludico, eccetera). Con il moltiplicarsi delle applicazioni, sono accresciute anche le tipologie di questi strumenti, e oggi se ne possono contare decine di tipi, ognuno con caratteristiche funzionali e costruttive differenti.

Principio di funzionamento

Nella maggior parte degli accelerometri, il principio di funzionamento è il medesimo: si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad un'accelerazione.

La massa viene sospesa ad un elemento elastico, mentre un qualche tipo di sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo. In presenza di un'accelerazione, la massa (che è dotata di una propria inerzia) si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata. Il sensore trasforma questo spostamento in un segnale elettrico acquisibile dai moderni sistemi di misura.

Una prima classificazione si può così fare suddividendo questi strumenti a seconda del principio di funzionamento del sensore di posizione.

Accelerometro estensimetrico

L'accelerometro a ponte estensimetrico sfrutta come principio di rilevazione lo stesso delle celle di carico, cioè la variazione di resistenza di un estensimetro dovuta alla variazione della sua lunghezza. Un estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche. Un estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico. L'estensimetro viene applicato sulla superficie del corpo di cui si vuole rilevare le deformazioni. Tale filo si allunga e si accorcia a seconda di come la superficie del corpo si deforma causando una variazione della resistenza elettrica del filo. Solitamente si utilizza un ponte di Wheatstone per rilevare tali variazioni e quindi risalire all'entità della deformazione che le ha causate.

La massa inerziale viene sospesa su due lamierini, su questi ultimi sono fissati degli estensimetri: se la massa mobile subisce una accelerazione i lamierini vengono di conseguenza deformati. La deformazione dei lamierini, proporzionale all'accelerazione, è quindi rilevata dagli estensimetri e convertita in un opportuno segnale elettrico.

In altre parole in questi dispositivi una massa viene sospesa su dei sottili lamierini, su quest'ultimi sono fissati degli estensimetri collegati a ponte di Wheatstone. In presenza di un'accelerazione la massa si sposta, flettendo i lamierini e conseguentemente gli estensimetri subiscono un allungamento. Con un voltmetro è possibile leggere una tensione di sbilanciamento del ponte di Wheatstone proporzionale all'accelerazione.

Accelerometro piezoresistivo

L'accelerometro a ponte piezoresistivo è una variante dell'accelerometro a ponte estensimetrico, dove al posto degli estensimetri sono utilizzati sensori piezoresistivi. Questi sensori si comportano in modo analogo agli estensimetri, ma permettono allungamenti e sensibilità superiori, pur avendo qualche problema di stabilità con la variazione di temperatura. Spesso, in questi strumenti la massa viene sospesa su una membrana plastica, sulla quale sono stati attaccati gli elementi piezoresistivi.

Accelerometro LVDT

L'accelerometro LVDT sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, un sensore LVDT (Linear Variable Differential Transformer) integrato nella struttura dell'accelerometro stesso. In questi dispositivi, la massa stessa costituisce il nucleo ferromagnetico del sensore LVDT, e scorre (sospesa su molle o altri elementi elastici) all'interno di un canale, attorno al quale sono avvolte le bobine destinate alla rilevazione della posizione della massa. Un apposito circuito rileva la posizione del nucleo rispetto alle bobine e genera un segnale elettrico proporzionale allo spostamento rispetto alla posizione di riposo.

Accelerometro capacitivo

L'accelerometro capacitivo sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, la variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le sue armature. In questi accelerometri, la massa (realizzata con materiale conduttivo) costituisce un'armatura, mentre l'altra è realizzata sulla struttura fissa del dispositivo, nell'immediata prossimità della massa. La massa viene sospesa su un elemento elastico relativamente rigido (tipicamente una membrana). Un apposito circuito rileva la capacità del condensatore così realizzato e genera un segnale elettrico proporzionale alla posizione della massa.

Accelerometro piezoelettrico

L'accelerometro piezoelettrico sfrutta, come principio di funzionamento la piezoelettricità. La piezoelettricità è la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri. Il funzionamento di un cristallo piezoelettrico è abbastanza semplice: quando viene applicata una pressione (o decompressione) esterna, si posizionano, sulle facce opposte, cariche di segno opposto. Il cristallo si comporta come un condensatore al quale è stata applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate ad un circuito elettrico esterno, viene quindi generata una corrente elettrica detta corrente piezoelettrica. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae.

L'elemento piezoelettrico è disposto in modo che quando viene fatto vibrare la massa "m" applica all'elemento piezoelettrico una forza proporzionale all'accelerazione di vibrazione. Dunque, la carica a capi del condensatore in uscita dall'accelerometro è proporzionale all'accelerazione del corpo da misurare:

$$Q = d_{ij} m \ddot{y}$$

La costante di proporzionalità, detta sensibilità del trasduttore, è dipendente linearmente dalla costante di proporzionalità del materiale piezoelettrico e dall'entità della massa sismica.

L'elemento piezoelettrico è usualmente una ceramica ferroelettrica polarizzata artificialmente (come il Titanato di bario, BaTiO₃, o lo Zirconato Titanato di Piombo, PZT). L'accelerometro può essere realizzato, per misurare le vibrazioni solo lungo un'asse (solitamente individuato dall'asse del cilindro, se il trasduttore ha forma cilindrica, o indicato da una freccia applicata ad una delle facce del trasduttore, se questo ha forma cubica). L'elemento piezoelettrico può essere sollecitato a compressione o a taglio. Esistono anche accelerometri triassiali al cui interno vengono disposti più cristalli sollecitati lungo tre direzioni mutuamente ortogonali.

L'accelerometro piezoelettrico offre molteplici vantaggiose caratteristiche, quali:

- ha una ampia banda passante (1-30000 Hz) come meglio spiegato in seguito;
- è robusto e affidabile, con caratteristiche stabili per lunghi periodi di tempo;
- può resistere a sollecitazioni di shock molto elevate;
- non contiene parti mobili soggette ad usura.

Di contro presenta alcune limitazioni di utilizzo, quali:

- impossibilità nel misurare accelerazioni statiche;
- difficoltà nelle misure a frequenza inferiore a 1 Hz (solo alcuni tipi riescono ad arrivare con specifico condizionamento a frequenze di 0.1-0.2 Hz);
- nei tipi convenzionali con uscita in carica, i cavi di collegamento sono un elemento critico della catena di misura.

Accelerometro laser

L'accelerometro laser è un tipo particolare d'accelerometro, usato quando è necessario effettuare misure estremamente precise, non ottenibili con altri tipi di strumenti. Il principio di funzionamento è concettualmente differente rispetto a quelli sopra esposti, e si basa sul principio fisico che l'accelerazione è una derivata della velocità nel tempo. In questo dispositivo un interferometro laser misura istante per istante lo spostamento dell'oggetto in moto, un computer ad esso collegato effettua la derivata seconda rispetto al tempo, ottenendo così direttamente il valore d'accelerazione. I problemi di questi dispositivi è che sono costosi, piuttosto ingombranti, richiedono che l'interferometro sia montato a terra (o su un luogo da considerarsi fisso) e il laser deve essere costantemente puntato verso l'oggetto in moto.

3.1.4. Sensori di Temperatura e di umidità

I sensori di temperatura sono dispositivi che rilevano la temperatura di un oggetto o di un ambiente e convertono queste informazioni in un segnale elettrico. In sistemi di risparmio energetico, vengono utilizzati per regolare il funzionamento di impianti HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning), macchine industriali e altri dispositivi che consumano energia in base alla temperatura.

I sensori di umidità misurano il contenuto di vapore acqueo nell'aria, un parametro cruciale per la regolazione dei sistemi di climatizzazione e per migliorare l'efficienza energetica. L'umidità relativa influenza sul comfort ambientale e sulla quantità di energia necessaria per riscaldare o raffreddare un ambiente.

Tali sensori verranno descritti in modo più dettagliato nella seguente sezione.

4. Stato dell'arte della sensoristica per la qualità dell'ambiente di lavoro e per la salvaguardia della salute degli operatori

4.1. Monitoraggio della qualità dell'aria in ambienti di lavoro

La fuoriuscita di gas pericolosi e vapori chimici è considerata uno degli incidenti pericolosi che possono verificarsi in officine, magazzini e siti industriali che utilizzano o immagazzinano queste sostanze. Il rilevamento tempestivo e l'allarme di gas pericolosi e sostanze chimiche volatili sono importanti per mantenere le condizioni di sicurezza per le persone e le forme di vita che lavorano e vivono in questi luoghi. In questo documento esaminiamo i sistemi mobili di rilevamento e allarme disponibili per gas tossici e pericolosi e sostanze chimiche volatili, soprattutto in ambiente di laboratorio. Abbiamo incluso documenti da gennaio 2010 ad agosto 2021 che potrebbero contenere le più recenti tecnologie di sensori e componenti di sistema utilizzati. Il termine gas pericolosi si riferisce al comportamento tossico/reattivo e può essere conformato a una delle seguenti definizioni: nocivo per gli esseri viventi, pericolosamente reattivo, acutamente tossico, infiammabile, corrosivo o gas ossidanti [1, 2, 3]. L'urgente necessità di dispositivi di rilevamento e allarme di gas e vapori inodori, nocivi e tossici nei luoghi esposti a ciò, ha spinto l'uso di metodi primitivi che possono essere duri per proteggere la vita del pubblico in questi luoghi. Fino agli anni ottanta del secolo scorso, i minatori utilizzavano canarini tenuti in una speciale gabbia di vetro per rilevare la presenza di gas tossici (in particolare monossido di carbonio) quando entravano nelle miniere (figura in basso). Poiché l'effetto dei gas nocivi è maggiore e più rapido sui canarini che sugli esseri umani, i lavoratori sono stati avvisati di ogni possibile pericolo dai "sensori per uccelli". Il sistema includeva una camera di ossigeno per salvare la vita dell'uccello dopo aver affrontato i gas tossici [4].

Recentemente, il notevole sviluppo delle infrastrutture e delle industrie di laboratorio aumenta l'uso di robot, droni, quadricotteri e sistemi di trasporto automatizzati utilizzati oltre agli esseri umani nei processi chimici, biologici e biotecnologici. Inoltre, numerosi gas e vapori chimici pericolosi si trovano in luoghi urbani, come laboratori universitari, centri di ricerca aziendali e grandi fabbriche che possono avere magazzini per gas/composti chimici e possono essere soggetti a perdite accidentali di gas o vapori pericolosi. Sono quindi necessari sistemi sensibili per rilevare e allarmare eventuali perdite pericolose che potrebbero compromettere il personale del laboratorio o l'ambiente in generale. Molti gas pericolosi e tossici richiedono condizioni speciali per la loro manipolazione poiché possono causare una serie di rischi per la salute, come morte o lesioni permanenti. I tipici composti/gas inorganici includono ammoniaca, arsina, monossido di carbonio, acido bromidrico, acido cloridrico, acido cianidrico, idrogeno solforato, ossido nitrico, biossido di azoto, ozono, fosgene, fosfina o biossido di zolfo. Di crescente interesse sono i composti organici come idrocarburi saturi, insaturi e aromatici, composti organo clorurati, ammine organiche, silani organici, alcoli, esteri, aldeidi e chetoni. I composti con una pressione di vapore molto elevata sono riassunti sotto il termine composti organici volatili (COV) e rappresentano il pericolo maggiore per l'uomo a causa della loro facile evaporazione [5, 6, 7]. La National Fire Protection Association (NFPA) ha creato un sistema numerico da 0 a 4 per classificare la valutazione del rischio gas sulla base dello standard di comunicazione dei rischi OSHA (Occupational Safety and Health Administration), dove 0-4 si riferisce a minimo, leggero, moderato, grave e rischio grave rispettivamente [8]. È necessario sviluppare sistemi di sensori adeguati per consentire un rilevamento semplice, riproducibile e affidabile di possibili pericoli chimici nell'ambiente di lavoro.

4.2. Tecnologie di sensori di gas

I sensori di gas hanno visto negli ultimi anni un notevole incremento nella produzione, nello sviluppo e nella ricerca, soprattutto a causa dell'aumento di problemi ambientali dovuti a gas inquinanti e all'ottimizzazione e la messa in sicurezza di svariati processi chimici, che rendono necessario monitorare la presenza di molti composti chimici gassosi e volatili. Un sensore di gas può essere considerato un sensore chimico, definito come segue dalla IUPAC: "Un sensore chimico è un dispositivo che trasforma un segnale chimico in un segnale analiticamente significativo. Il segnale chimico può essere dovuto ad una reazione dell'analita oppure ad una variazione delle proprietà fisiche del sistema investigato" [1]. Metodi di misura molto precisi erano già disponibili da tempo, come per esempio la gascromatografia o la spettrometria di massa, ma essi sono molto dispendiosi in termini di tempo e costi e generalmente non possono essere impiegati per monitoraggi in tempo reale in continuo, per questo si stanno studiando dei sensori di gas allo stato solido che riescano a fornire prestazioni abbastanza elevate pur mantenendo costi contenuti e che riescano a fornire misure in tempi relativamente brevi. Un sensore è generalmente costituito da due componenti principali: un ricettore, in grado di trasformare un segnale chimico in un'energia misurabile e un trasduttore, ovvero un componente che trasforma quest'energia in un segnale analizzabile. In base al principio di funzionamento del trasduttore si possono identificare diversi tipi di sensore di gas, ma i principali sono i sensori elettrici e quelli ottici. I sensori che vengono più comunemente prodotti sono quelli elettrici, che in base al segnale elettrico misurato possono essere classificati come potenziometrici, amperometrici, impedimetrici o conduttometrici, per quanto riguarda i sensori ottici, oggetto di questo lavoro di tesi, essi possono essere suddivisi in due principali categorie: i sensori ottici diretti, che monitorano specifiche bande di assorbimento del gas obiettivo dell'analisi, e i sensori mediati da reagenti, nei quali il gas interagisce con il materiale del sensore, influenzando alcune delle sue proprietà ottiche, come l'assorbanza o la luminescenza. [2] I sensori ottici, rispetto a quelli elettrici, hanno il vantaggio di essere più resistenti e flessibili, di non necessitare di collegamenti elettrici per il funzionamento e di non essere influenzati da disturbi elettromagnetici, oltre ad avere ottimi tempi di risposta e costi contenuti. Inoltre tali sensori sono meno suscettibili da inquinamento da altre sostanze che vi possono entrare in contatto impedendone il normale funzionamento. [2] L'uso delle fibre ottiche per trasmettere le radiazioni elettromagnetiche verso la zona in cui è posizionato il sensore e per portare il segnale generato ad un terminale per le analisi fornisce anche enormi vantaggi in termini di miniaturizzazione dei dispositivi e del loro costo, permettendo misure anche a lunghe distanze o permettendone l'attuazione in luoghi di difficile accesso.[3] Un sensore è caratterizzato da diversi parametri, tra i quali si possono individuare la sensibilità, la selettività e la stabilità. Per sensibilità si intende la variazione di segnale misurato dal sensore al variare della concentrazione dell'analita, ed essa può essere considerata pari alla pendenza del diagramma intensità vs. concentrazione dell'analita (assumendolo come lineare). La selettività è la capacità del sensore di rispondere a specifici analiti o a specifiche famiglie di analiti. Nei sensori di gas allo stato solido questa rappresenta una delle maggiori criticità perché presentano una selettività molto carente dato che i meccanismi responsabili della generazione di un segnale rilevabile sono molto spesso gli stessi o comunque molto simili per una moltitudine di composti gassosi. Il problema nasce dal fatto che le proprietà del sensore che generano il segnale rilevabile non variano solamente in presenza dell'analita di interesse, ma anche in presenza di molecole di gas che presentano caratteristiche fisico-chimiche equivalenti ed entrano in competizione negli stessi siti. Esistono diversi metodi per ottenere un aumento della selettività, come agire sulla temperatura di lavoro per modificare il comportamento del

materiale (anche se l'ideale sarebbe un'alta sensibilità a temperatura ambiente), utilizzare dei catalizzatori da incorporare nel sensore in grado di convertire le molecole delle sostanze che possono interferire con la generazione del segnale, eliminando il meccanismo di competizione; oppure filtrare l'atmosfera che deve essere monitorata, per esempio attraverso membrane porose, in modo da permettere il raggiungimento del sensore soltanto al gas di interesse per l'analisi. La stabilità è definita invece come la capacità di un sensore di fornire dei risultati riproducibili nel tempo ed è legata alla possibilità del sensore di interagire con l'analita stesso, o con altre sostanze contaminanti a causa di un'insufficiente stabilità strutturale e micro strutturale. [4] Vi sono poi anche altre caratteristiche importanti dei sensori, come il limite di rilevabilità, ovvero la più bassa concentrazione di analita rilevabile dal sensore, la sua risoluzione, ovvero la più bassa differenza di concentrazione rilevabile e per ultimi, ma non meno importanti i tempi di risposta e di recupero.

Una classificazione univoca e condivisa dei sensori di gas, come quella di altre tipologie, non è chiaramente delineabile, infatti, a seconda del parametro su cui si basa la divisione un dispositivo può rientrare, ed essere definito, in diverse categorie. È possibile scegliere una suddivisione in base al materiale sensibile al gas target oppure preferire come metro di classificazione il principio operativo: cioè su che tipo di trasduzione si basa il sistema. Di entrambe queste opzioni vediamo un esempio nelle figure riportate in seguito.

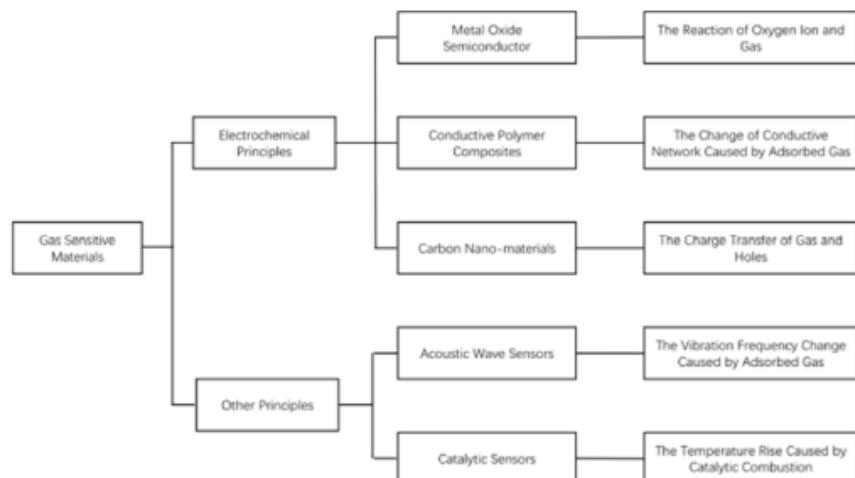


Figura 1: Classificazione dei sensori secondo la tipologia di materiale sensibile al gas target

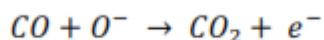
Type of Sensor	Principle of Operation
Optical	
Fluorescence	Evanescence field excitation or fluorescence enhancement
Reflective	Changes in thickness of polymer sensing layer when exposed to VOC
Absorption	Absorption of VOCs by porphyrins
Thermal	
Pellistor	Change in temperature of catalytic material
Gravimetric	
Quartz crystal microbalances (QCM)	Change in frequency of oscillating crystal in proportion to mass
Surface acoustic wave	Change in frequency of oscillating crystal in proportion to mass
Flexural acoustic wave	Change in frequency of oscillating crystal in proportion to mass
Electrochemical: Chemiresistive	
Metal oxide semiconductors	Change in resistance
Conducting Polymers	Change in resistance
Electrochemical: Potentiometric	
Metal oxide field effect transistor	Change in voltage measurements
Amperometric	Change in current measurements

Figura 2: Classificazione dei sensori secondo il principio operativo

Nella seguente trattazione si è scelto di suddividere, e approfondire, 4 tipologie di sensori per gas che si differenziano per il loro principio operativo in quest'ordine: a semiconduttore, ottici, catalitici ed elettrochimici.

4.3. Sensori di gas a semiconduttore – MOS type sensors

Con il termine sensori a semiconduttore nella maggior parte dei casi si fa riferimento a sensori a semiconduttore a ossido metallico (Metal Oxide Semiconductors, MOS). In queste tipologie di dispositivi la grandezza elettrica che varia, e consente quindi la misura della concentrazione del gas target, è la resistenza, per questo è possibile classificare questi strumenti come sensori resistivi o chemiresistivi. Il meccanismo di rilevamento dei sensori MOS si basa sulle reazioni che avvengono tra le specie di ossigeno adsorbite e il gas rilevato sulla superficie del sensore (Sberveglieri, 1992). Gli elettroni del semiconduttore sono attratti dall'ossigeno presente in aria, che viene adsorbito sulla superficie catturando gli elettroni, questo provoca l'aumento della barriera di potenziale e la diminuzione del flusso di corrente (cioè un aumento della resistenza). Quando è presente in aria un gas riducente come, ad esempio, il monossido di carbonio CO, la densità dell'ossigeno adsorbito alla superficie del sensore diminuisce a causa della reazione che avviene tra il gas riducente e l'ossigeno presente sulla superficie del semiconduttore, che è possibile descrivere tramite la formula:



Gli elettroni, tornati nella banda di conduzione, sono liberi di muoversi permettendo alla corrente di fluire (cioè una diminuzione della resistenza). Nella Figura in basso vengono raffigurati i due stadi in cui può trovarsi il sensore e come ciò influisce sulla barriera di potenziale.

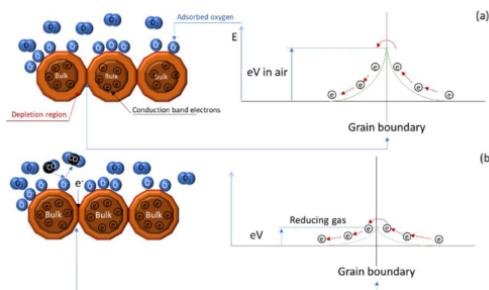


Figura 3: funzionamento del rilevamento dei gas su substrato MOS di tipo n con gas riducenti

La variazione della resistenza (aumento o diminuzione) dipende dalla tipologia del semiconduttore (n-type o p-type) e dal gas a cui viene esposto il sensore (ossidante o riducente). Dalla teoria segue l'equazione che descrive come il sensore a ossido metallico cambi la sua resistenza a seconda della composizione dell'atmosfera che lo circonda; la corrispondenza tra variazione della resistenza e concentrazione del gas target non è lineare e viene descritta come segue:

$$R_S = R_b + R_g \sum_{i \in G} f_i(a_i([G_i]), T_a, T_h) + R_{err}$$

Dove con G_i si indica il gas target e con $[G_i]$ la sua concentrazione, mentre a_i è una funzione che indica il rapporto tra la quantità del gas target adsorbita sulla superficie del sensore e l'intera superficie del semiconduttore, T_a è la temperatura atmosferica e T_h è la temperatura dell'elemento sensibile, mentre le resistenze R_b e R_g sono quella di base e quella dovuta alla sensibilità al gas, infine R_{err} indica i possibili errori. Infine, f è una funzione non lineare specifica per ogni gas in atmosfera. [3] La sensibilità di queste tipologie di sensori è fortemente influenzata dalle caratteristiche e dalla struttura del layer di ossido metallico semiconduttore, ma anche dalla temperatura operativa (caratteristica che va a influenzare anche il costo, in termini energetici, dell'utilizzo del sensore) che è necessario mantenere elevata perché possa manifestarsi il fenomeno di adsorbimento e il successivo deadsorbimento. Inoltre, è stato provato che la sensibilità e il tempo di risposta vengono notevolmente migliorate quando il materiale utilizzato è nanostrutturato (ad esempio sfruttando nanofili semiconduttori). La temperatura operativa influenza anche la selettività: ad esempio in un sensore a base di ossido di stagno (SnO_2) per rilevare il metano (CH_4) la temperatura ottimale è di 400° mentre per rilevare il monossido di carbonio (CO) è di 90° . Nonostante l'esempio appena riportato, per molte applicazioni, la selettività di questa tipologia di device rimane bassa. Per migliorare questo parametro è possibile effettuare un droggaggio della superficie con un adeguato materiale catalitico, oppure utilizzare un array di sensori costituiti da materiali sensibili diversi a cui si pospone un circuito di riconoscimento.

La figura che segue mostra un esempio di architettura di un circuito di misura con sensore resistivo integrato in un partitore di tensione, per applicazioni con ridotte variazioni di temperatura. Quando si utilizzano sensori resistivi, come i sensori MOS, le topologie per il sistema di misura utilizzate più di frequente sono il partitore di tensione, adeguato per ridotte variazioni di resistenza, e il ponte di Wheatstone, quasi sempre preferito grazie alla sua capacità di fornire un output lineare indipendente dall'entità della variazione misurata.

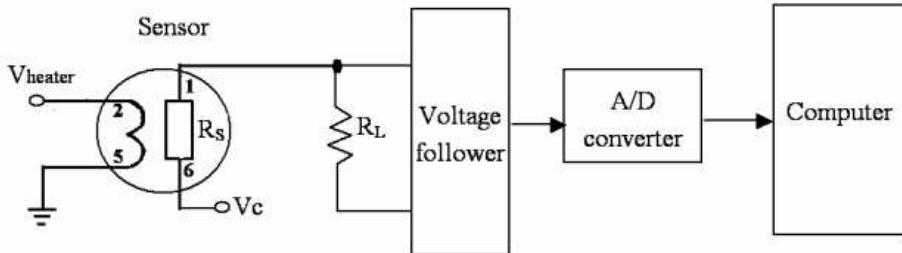


Figura 4: circuito

Essa è caratterizzata innanzitutto dalla presenza dell'elemento necessario a portare il sensore alla temperatura operativa. Una volta raggiunta tale temperatura, il sensore, posto all'interno di un partitore di tensione, viene ad un capo alimentato con V_C , una tensione fissa e nota, così misurando la tensione ai capi della resistenza R_L , posta in serie a R_S , è possibile ricavare la resistenza (e la sua variazione) del sensore invertendo la seguente formula del partitore di tensione:

$$V_M = V_C \frac{R_L}{R_S + R_L}$$

tra il partitore di tensione e il convertitore analogico-digitale viene interposto un inseguitore di tensione al fine di separare la parte circuitale dove è presente il sensore dai blocchi successivi, prevenendo possibili interferenze.

4.4. Sensori di gas ottici – optical gas sensors

I sensori ottici sono una delle tipologie più diffuse per il rilevamento dei gas; sono una classe ampia con diversi principi di funzionamento che tuttavia si basa essenzialmente sull'interazione tra onde elettromagnetiche e materia. L'autore Robert Bogue ha elencato nella tabella riportata in Figura 7 le tecniche ottiche per il rilevamento dei gas [4].

Principle	Specific techniques
Absorption	Non-dispersive infra-red (NDIR) UV absorption Fourier transform infra-red (FTIR) Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) Photoacoustic spectroscopy (PAS) Cavity ring-down spectroscopy (CRDS) Tuneable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) Differential absorption LIDAR* (DIAL) Gas cloud imaging
Luminescence/fluorescence	Chemiluminescence (CL) UV fluorescence (UWF)
Ionisation	Photoionisation detection/detector (PID)

Note: * LIDAR – light detection and ranging

Figura 5: Tecnologie ottiche di rilevamento dei gas

È evidente che il principio di assorbimento sia il più utile e utilizzato tra le tecnologie ottiche per il rilevamento dei gas, anche, più in generale, rispetto ad altre tipologie di sensing in quanto ha il vantaggio di poter sfruttare le proprietà di assorbimento uniche e distinguibili delle specie gassose. [5]. Il principio fondamentale che sta alla base di queste misurazioni è la spettroscopia di assorbimento molecolare che permette di trarre informazioni su molte specie chimiche in base al loro assorbimento nelle regioni dell'UV/visibile e nel vicino o medio infrarosso dello spettro elettromagnetico. L'origine degli spettri di assorbimento nelle diverse regioni dello spettro elettromagnetico ha cause differenti come hanno schematizzato Hodgkinson e Tatam nella seguente tabella.

Tabella 1

Spectral region	Cause of absorption
UV (200–400 nm)	Electronic transitions
Near IR (700 nm–2.5 μm)	Molecular vibration and rotation, first harmonic
Mid IR (2.5–14 μm)	Molecular vibration and rotation, fundamental

La non-dispersive infra-red (NDIR) è la tecnica di assorbimento più semplice e più utilizzata

ed è stata la prima ad essere sviluppata, da Luft nel 1943 [4]. Il forte interesse e sviluppo di tecnologie che sfruttano la regione spettrale dell'infrarosso (e più in particolare del medio infrarosso) è giustificata dal fatto che è proprio in questa regione che molti dei gas che siamo interessati a rilevare presentano un forte assorbimento con bande strette e perlopiù non completamente sovrapposte tra loro.

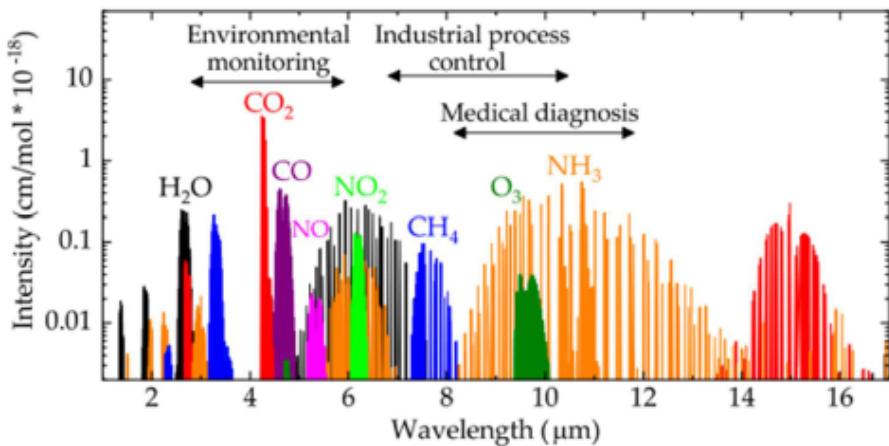


Figura 6: Spettri di assorbimento nel medio infrarosso di molecole selezionate con le loro intensità relative

Tuttavia, va segnalato che la luce IR solitamente non è in grado di eccitare le molecole simmetriche (come, ad esempio, i gas biatomici) perché non presentano un dipolo al loro interno; quindi, questa tecnica di sensing non è applicabile a queste tipologie di gas. La luce (più ampiamente la radiazione) assorbita dal gas viene posta in relazione con la concentrazione del gas stesso facendo uso della legge di Beer-Lambert:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)cl}$$

dove $I(\lambda)$ è l'intensità della radiazione rilevata alla particolare lunghezza d'onda λ mentre $I_0(\lambda)$ è l'intensità della radiazione emessa alla particolare lunghezza d'onda λ . Mentre con $\alpha(\lambda)$ si indica il coefficiente di assorbimento molare del gas, con c la concentrazione del gas e con l la lunghezza del percorso ottico.

In spettroscopia si usa definire la trasmittanza (T) come

$$T = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

Usando la definizione di trasmittanza elaboriamo come segue la legge di Beer-Lambert:

$$T = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda)cl}$$

Applicando ambo i membri l'operatore logaritmo si ottiene

$$\ln \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = -\alpha(\lambda)cl$$

da cui è possibile ricavare la concentrazione.

Il set-up di questi sensori (un esempio è raffigurato in Figura 9) comprende i seguenti elementi fondamentali: un emettitore che andrà a costituire la sorgente della radiazione (infrarossa nel caso di sensori NDIR) di intensità $I_0(\lambda)$, la cella di gas ovvero un percorso di lunghezza caratteristica l che fornisce lo spazio in cui la radiazione può interagire con il gas, un filtro ottico per selezionare la gamma di lunghezze d'onda caratteristiche del gas bersaglio, un rilevatore per acquisire il dato sull'intensità della radiazione dopo aver interagito con il gas cioè $I(\lambda)$.

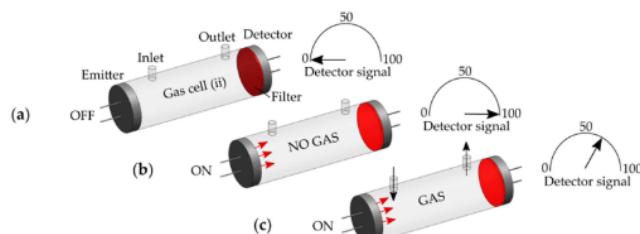


Figura 7: Sensore ottico di gas basato sulla legge di Beer-Lambert. (a) Non è percepito nessun segnale quando l'emettitore è spento
(b) Il segnale rilevato è al suo massimo quando l'emettitore è acceso e non è presente nessun gas e (c) diminuisce con la concentrazione c del gas quando esso è presente

Per quanto riguarda i rilevatori per i sensori di gas NDIR ne esistono di diverse tipologie come [5]:

- termopila
- piroelettrico
- fotodiodo
- bolometro

I rilevatori a termopila convertono l'energia termica in energia elettrica sfruttando l'effetto Seebeck. Quest'ultimo si manifesta quando in un circuito costituito da conduttori metallici (o semiconduttori), una differenza di temperatura genera una differenza di potenziale. Usiamo il circuito in basso per introdurre la formulazione matematica di cui si fa uso:

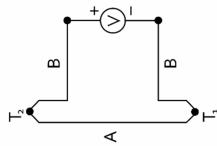


Figura 8: Configurazione circuitale esemplificativa dove con A e B si indicano due materiali metallici diversi

La tensione che ne risulta matematicamente può essere espressa come segue

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

dove S_A e S_B sono i coefficienti di Seebeck dei relativi due metalli mentre T_1 e T_2 sono le temperature delle due giunzioni. I coefficienti di Seebeck sono degli indici che riflettono la propensione di un materiale a manifestare l'effetto omonimo. Questi dipendono dalla temperatura ma se si sceglie un intervallo di temperature in cui è possibile ritenerli costanti la formula in forma integrale viene approssimata come segue:

$$V = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1)$$

Da quest'ultima formula risulta evidente come l'effetto Seebeck possa essere sfruttato per misurare una differenza di temperature attraverso una differenza di potenziale generata in un circuito composto da fili di materiale diverso. Un dispositivo di questo genere prende il nome di termocoppia e può essere rappresentato come in basso.

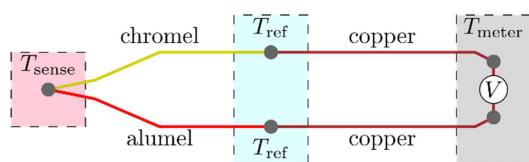


Figura 9: Rappresentazione circuitale di una termocoppia

Nell'esempio riportato i due conduttori sono cromo e alluminio, e la giunzione utilizzata per la misurazione viene chiamata giunzione calda mentre l'altra giunzione fredda. Quest'ultima deve essere ad una temperatura di riferimento nota perché dalla misurazione di differenza di potenziale possa essere ricavata la temperatura oggetto di misura. Una termopila (Figura in basso) è composta da numerose termocoppie poste in serie (tra le 20 e le 120) questo perché l'utilizzo di un'unica termocoppia darebbe origine ad una tensione in uscita molto bassa da misurare mentre l'utilizzo di più termocoppie aumenta l'ampiezza della tensione d'uscita.

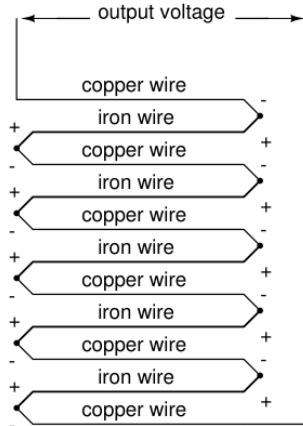


Figura 10:Schematizzazione di una termopila composta da termocoppie in serie.

I rilevatori a termopila vengono utilizzati per rilevare le radiazioni annerendo una delle giunzioni in modo che essa possa assorbire la radiazione termica e quindi riscaldarsi rispetto all'altra giunzione non irradiata e di conseguenza, secondo il citato effetto Seebeck, generare una tensione. In basso vediamo la rappresentazione di una termopila a disco.

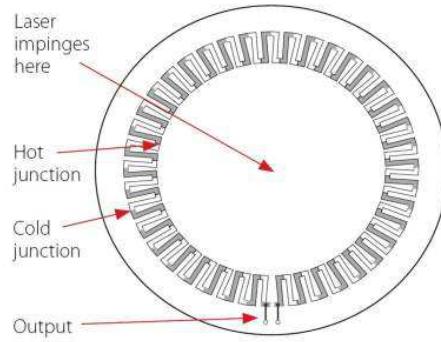


Figura 11: Diagramma di una termopila a disco

I rilevatori a termopila hanno un tempo di risposta rapido; tuttavia, i livelli di rumore in uscita sono elevati. I rilevatori piroelettrici basano il loro funzionamento sull'omonimo effetto. Ovvero il comportamento che alcuni cristalli manifestano quando subiscono un cambiamento di temperatura cioè la polarizzazione elettrica. Questi materiali manifestano una spontanea differenza di potenziale per accumulo di cariche elettriche di segno opposto sulle facce parallele, vedi immagine.

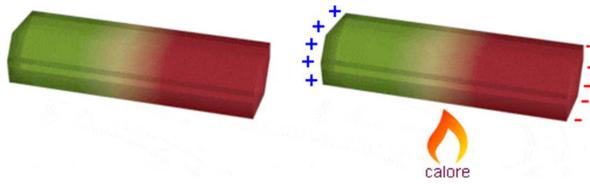


Figura 12: Rappresentazione schematica del fenomeno della piroelettricità

La polarizzazione e la variazione di temperatura sono legate dalla seguente equazione

$$\Delta \vec{P} = \vec{p}_T \cdot \Delta T$$

dove con P' è la polarizzazione elettrica, p_T è il coefficiente piroelettrico e T è la temperatura assoluta.

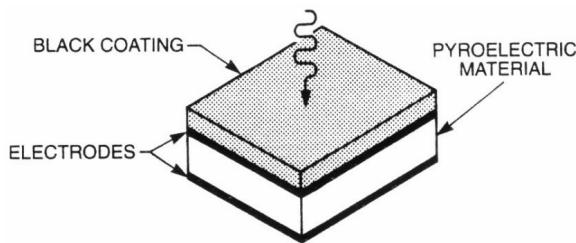


Figura 13: Schematizzazione di un sensore piroelettrico

I rilevatori a fotodiode sono dei diodi, quindi quei componenti passivi che idealmente permettono il flusso di corrente elettrica in un verso mentre la bloccano quasi totalmente nell'altro. Essi sono in grado di sfruttare l'effetto fotovoltaico per riconoscere una determinata lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica incidente e trasformare questo in un segnale elettrico.



Figura 14: Simbolo elettrico del fotodiodo

L'effetto fotovoltaico è il fenomeno fisico di interazione radiazione-materia che si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza di un materiale (generalmente semiconduttore) passa alla banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico sul materiale [8].

La caratteristica tensione-corrente di un fotodiodo è la medesima di un diodo a meno dell'apporto della corrente fotogenerata dalla radiazione elettromagnetica e può essere espressa come segue

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) - I_{ph}$$

dove I_0 è la corrente di leakage del diodo, V_D la tensione applicata ai capi del diodo e V_T la tensione termica. Mentre I_{ph} è la corrente fotogenerata che risulta proporzionale alla potenza luminosa incidente, cioè al flusso di fotoni che colpiscono il dispositivo [9]. L'utilizzo dei fotodiodi fornisce alcuni vantaggi come la capacità di funzionare senza una tensione di riferimento aggiuntiva e la riduzione del consumo energetico complessivo del dispositivo [5]. I bolometri sono in grado di rilevare le lunghezze d'onda dell'infrarosso tra gli $8\mu\text{m}$ e i $12\mu\text{m}$. Il loro principio di funzionamento può essere rappresentato dal seguente diagramma.

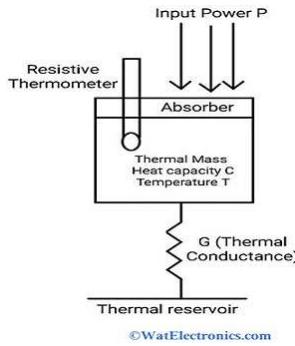


Figura 15: Diagramma di un bolometro

Lo strumento risulta quindi composto da un serbatoio termico (cioè un corpo a temperatura costante) e da un elemento assorbitore (che può essere un sottile strato di metallo). Questi due elementi sono collegati termicamente. Quando una radiazione incide sull'elemento assorbitore provoca un innalzamento della temperatura dell'elemento rispetto alla riserva: questo cambiamento può essere misurato con un termometro resistivo.

4.5. Sensori di gas catalitici - catalytic gas sensor

I sensori catalitici sono spesso attribuiti alla categoria dei metodi di sensing a natura calorimetrica. Storicamente il primo tipo di sensore a combustione catalitica è stato sviluppato da Jonson nel 1923 e utilizzato per la rilevazione del metano nelle miniere. Ancora oggi questa tipologia viene utilizzata per il rilevamento di gas combustibili [10]. Come in parte lascia intuire il nome, questa tipologia di sensori è basata sul fenomeno della combustione catalitica per cui in presenza di determinate sostanze chimiche (dette catalizzatori) le miscele di gas combustibili iniziano a bruciare ad una temperatura inferiore a quella di innesco [11]. Tra i materiali che presentano questa proprietà catalitica ci sono gli ossidi metallici e i loro composti, il platino, il palladio, il torio e i loro composti. Quindi quello che avviene sulla superficie catalizzata del sensore è l'ossidazione delle molecole del gas target con conseguente liberazione di energia soprattutto sotto forma di calore, quest'ultimo provoca un aumento di temperatura che in un materiale elettricamente conduttivo provoca una variazione della condutività e può essere registrato misurando la variazione in termini di resistenza. Yanusa et al. [10] suddividono i sensori catalitici in due tipologie: pellistore e termoelettrico. I pellistori costituiscono la classe più importante tra i sensori di gas a natura calorimetrica. Il termine pellistore deriva dalla combinazione di pellet e resistore, descrittivo dell'elemento sensibile che risulta essere una perla (dall'inglese bead) di un ossido metallico trattato cataliticamente al cui interno viene posta una bobina tipicamente in platino, come rappresentato in basso.

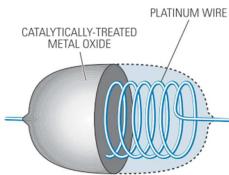


Figura 16: Rappresentazione di un pellistore

Questa particolare struttura è giustificata dal fatto che se, come in passato, si utilizza come elemento sensibile la sola bobina il platino per renderla un buon rilevatore per gli idrocarburi la si deve portare ad una temperatura tra i 900° e i 1000°. Tuttavia, raggiunte queste temperature il metallo comincia a rammollirsi e ad evaporare provocando un drastico peggioramento delle sue proprietà di resistenza meccanica e delle sue qualità come elemento sensibile. A questo problema si è posto rimedio ricoprendo la bobina con altri ossidi metallici trattati con un catalizzatore, ciò rende il pellistore più stabile e resistente alle sollecitazioni meccaniche. Il set-up completo dei sensori catalitici si basa su due elementi: l'elemento rilevatore, costituito da una bead che presenta un materiale catalitico che promuove l'ossidazione dei gas combustibili sulla sua superficie, e l'elemento compensatore costituito da una bead inerte ai gas target. Quindi la presenza del gas combustibile nell'elemento rilevatore provocherà un aumento di temperatura mentre non provocherà alterazione nell'elemento compensatore. Il circuito elettrico di cui si fa uso per misurare l'output di questa tipologia di sensori è il ponte di Wheatstone, elemento che consente di misurare una resistenza ignota comparandola con resistenze note. La topologia del circuito è la seguente

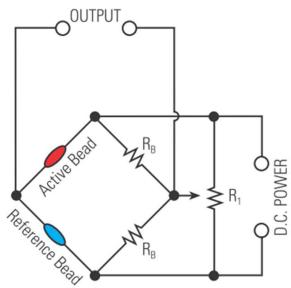


Figura 17: Ponte di Wheatstone con l'inserimento dell'elemento rilevatore (contrassegnato in figura come Active Bead) e l'elemento compensatore (contrassegnato in figura come Reference Bead)

È noto che un ponte bilanciato ha segnale di uscita nullo, situazione che nel caso in esame si realizza quando la resistenza della Reference Bead equivale quella dell'Active Bead. Indicando la tensione di uscita con V_{output} , la tensione di alimentazione con V_{supply} , la resistenza dell'elemento rilevatore come R_{active} e la resistenza dell'elemento compensatore come R_{ref} ; avvalendosi delle formule del partitore di tensione è possibile scrivere la tensione di uscita come segue:

$$V_{output} = \left(\frac{R_{ref}}{R_{ref} + R_{active}} - \frac{R_B}{R_B + R_B} \right) V_{supply}$$

In cui è evidente ricavare che quando R_{ref} e R_{active} si equivalgono il ponte è bilanciato e V_{output} si azzera. Viceversa, quando il gas target si ossida sulla superficie dell'elemento rilevatore provoca una

variazione nella resistenza R_{active} facendo in modo che si discosti da R_{ref} generando così un segnale in uscita. L'output del sensore è proporzionale al tasso di ossidazione, tuttavia non lo è sempre in modo lineare. Assumendo come esempio il metano il segnale in uscita sarà linearmente proporzionale alla concentrazione del gas quando quest'ultima sarà compresa tra 0-5% [11]. Inoltre, il calore che viene prodotto dall'ossidazione del gas sulla superficie del sensore dipende dal potere calorifero della sostanza stessa. Per questo motivo le letture possono variare tra concentrazioni equivalenti di gas combustibili diversi. Il sensore fornisce un unico segnale che si basa sull'effetto calorifero totale di tutti i gas presenti e in grado di essere ossidati nelle vicinanze del sensore [12]. Un importante vantaggio di questo set-up è che può lavorare correttamente in un ampio range di condizioni ambientali (variazioni di temperatura, umidità e pressione) perché queste ultime influenzano sia l'Active Bead che il Reference Bead in egual misura.

4.6. Sensori di gas elettrochimici - electrochemical gas sensor

In generale un sensore chimico, riprendendo la definizione fornita dall'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), viene descritto come "un dispositivo che trasforma informazioni chimiche, dalla concentrazione di uno specifico componente del campione all'analisi della composizione totale, in un segnale analitico utile [13]. I sensori appena definiti sono caratterizzati da due unità funzionali essenziali:

- un recettore
- un trasduttore fisico-chimico

Il recettore adempie alla funzione di interazione diretta con l'analita di interesse, mentre il trasduttore converte il segnale generato dall'interazione analita-recettore in un valore leggibile. È di interesse puntualizzare un'altra definizione; ovvero nel caso in cui il recettore sia di origine biologica (come DNA, anticorpi ed enzimi) il nome utilizzato per identificare il dispositivo è biosensore [14]. Sempre secondo la classificazione IUPAC i dispositivi elettrochimici sono quelli in grado di trasformare l'effetto dell'interazione elettrochimica analita-elettrodo in un segnale utile [13]. Per i sensori elettrochimici è condivisa la loro suddivisione in funzione dell'approccio alla misura nelle seguenti classi:

- potenziometrici
- amperometrici (di cui un caso particolare sono i voltammetrici)
- impedimetrici

Sensori potenziometrici

Questa tipologia di sensori si basa sulla misura di una differenza di potenziale tra un elettrodo definito elettrodo di lavoro (Working Electrode, WE) e un altro elettrodo definito elettrodo di riferimento (Reference Electrode, RE) nella condizione di assenza di passaggio di corrente. Il potenziale dell'elettrodo di lavoro dovrà dipendere dalla concentrazione di analita di interesse, mentre l'elettrodo di riferimento avrà il compito di fornire un potenziale noto, e costante, in modo tale che ogni variazione di potenziale rilevata dal voltmetro potrà essere imputabile in modo esclusivo all'elettrodo di lavoro. La configurazione di questa tipologia di dispositivo è quella di una cella elettrochimica, che come noto è un dispositivo in grado di convertire l'energia chimica in energia elettrica e viceversa, ed è composta da due semi-elementi, chiamati anche semi-celle (vedi Figura in basso).

Questi due elementi possono essere disposti in contenitori separati posti in collegamento da un ponte salino (che permette di mantenere l'elettroneutralità) oppure da una membrana semipermeabile [15].

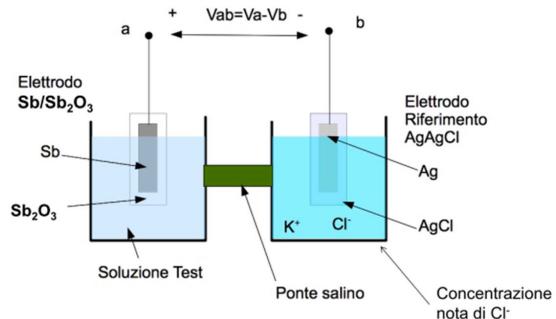


Figura 18: Come esempio di sensore potenziometrico si è scelto uno strumento per la misura di pH con elettrodo di lavoro in antimonio/ossido di antimonio

La relazione in grado di descrivere la dipendenza del potenziale di elettrodo all'equilibrio rispetto all'attività chimica delle sostanze che prendono parte alla reazione di ossidoriduzione viene descritta dall'equazione di Nernst:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{OX}}{a_{RED}}$$

Come precedentemente accennato l'interesse in questi dispositivi è quello di ricavare la concentrazione, questo è possibile sapendo che l'attività chimica è legata alla concentrazione (C) attraverso il coefficiente di attività come segue

$$a = \gamma C$$

I sensori potenziometrici più estensivamente utilizzati sono quelli a elettrodo pH; questi giocano un ruolo fondamentale sia nel monitoraggio dell'acqua ma spesso trovano spazio in applicazioni mediche [14]. Tuttavia, i sensori elettrochimici vengono utilizzati anche in alcune applicazioni come sensori di sostanze gassose.

Il gas da rilevare viene convertito nel componente mobile di un elettrolita solido, che separa un elettrodo di riferimento e un elettrodo di lavoro. Tra i due lati dell'elettrolita solido si instaura una differenza di potenziale che dipende dalla differenza di attività tra le due zone.

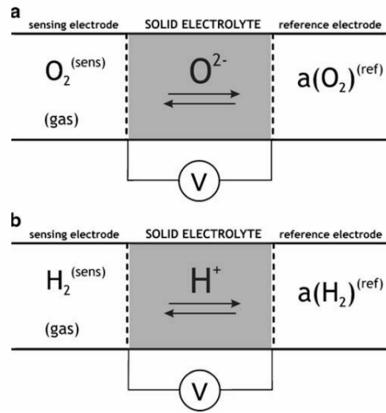


Figura 19: Rappresentazione schematica di sensori di gas potenziometrici di tipo I

Pasierb e Rekas in [16] approfondiscono lo stato corrente e le possibili tendenze future nell'uso di sensori potenziometrici per la misurazione dei gas ambientali, in particolare sensori potenziometrici di anidride carbonica, degli ossidi d'azoto, degli ossidi di zolfo, del monossido di carbonio e di idrocarburi.

Sensori amperometrici

I sensori amperometrici pur essendo sensori elettrochimici come i potenziometrici hanno un principio di funzionamento differente. Infatti, in questi dispositivi la differenza di potenziale tra un elettrodo di lavoro e un elettrodo di riferimento viene applicata, mentre quello che si misura è una corrente, quest'ultima raggiunge un valore che è limitato/saturato dalla concentrazione dell'analita (questi dispositivi si trovano anche sotto il nome di limiting-currenttype sensors). Solitamente questo tipo di sensori al fine di un corretto funzionamento incorporano 3 elettrodi:

- l'elettrodo di lavoro, quello in cui avvengono le reazioni di ossidazione o di riduzione a seconda di come il sistema interagisce con le specie di gas osservate
- il contro-elettrodo o elettrodo ausiliario, che a seguito delle reazioni avvenute sulla superficie dell'elettrodo di lavoro cerca di bilanciare la variazione di potenziale
- l'elettrodo di riferimento infine ha lo scopo di mantenere fisso il potenziale dell'elettrodo di lavoro.

In Figura è possibile vedere come i 3 elettrodi vengono inseriti in un circuito: in particolare il segnale da cui si traggono informazioni riguardo all'analita target si ottiene monitorando dinamicamente la corrente che fluisce tra il contro-elettrodo e l'elettrodo di lavoro [17].

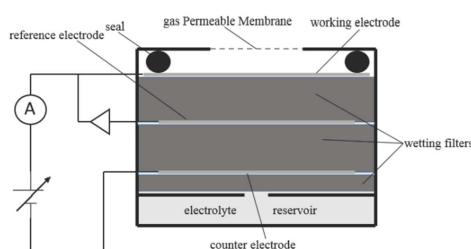


Figura 20: Rappresentazione schematica di un sensore amperometrico

Come già accennato, all'elettrodo di lavoro possono avvenire sia reazioni di ossidazione che di riduzione; l'ossidazione (corrispondente ad una perdita di elettroni) avviene per gas come CO, H₂S, SO₂ e NO mentre la riduzione (acquisizione di elettroni) avviene per gas come O₂, NO₂ e Cl₂. Se l'ossidazione avviene sull'elettrodo di lavoro (WE), la reazione complementare (riduzione) avviene sul contro-elettrodo (CE). Vediamo in Figura 23 due esempi di sensori amperometrici in cui viene indicato come, per mantenere la carica costante nell'elettrolita, avvenga un flusso di elettroni attraverso la parte circuitale che connette l'elettrodo di lavoro con il contro-elettrodo [18].

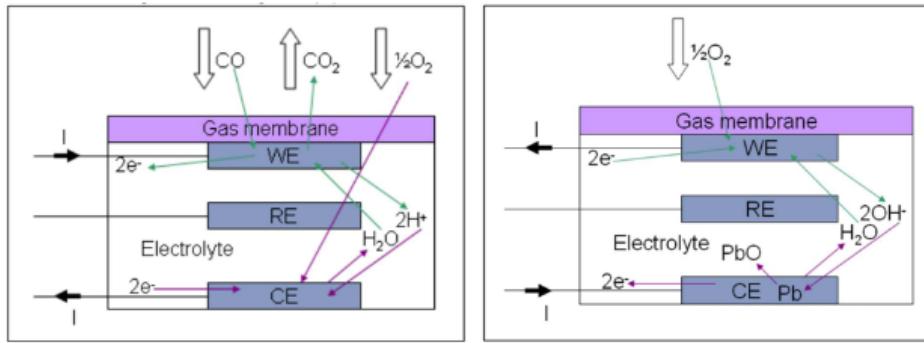


Figura 21: A sinistra un sensore elettrochimico amperometrico di CO a destra un sensore elettrochimico amperometrico di O₂

Tra i sensori amperometrici vi è la sottoclasse dei sensori voltammetrici, nei quali si misura la corrente derivante da reazioni di ossidazione o riduzione sulla superficie dell'elettrodo di lavoro quando viene imposta una variazione di potenziale controllata. Per quanto riguarda l'applicazione dei sensori amperometrici per il monitoraggio della qualità dell'aria, Baron e Staffell, dopo averne fornito una revisione in [19], li ritengono le tecnologie più promettenti per la misurazione di gas inorganici.

Sensori impedimetrici

I sensori impedimetrici basano il loro funzionamento sulla diretta correlazione tra le variazioni di impedenza e un cambiamento nella concentrazione dell'analita target [20]. Viene applicata una tensione alternata ai due elettrodi, più precisamente l'elettrodo di lavoro viene stimolato con un segnale alternato in tensione che cambia la sua polarità da positiva a negativa in modo periodico secondo un definito range di frequenze mentre il contro-elettrodo mantiene una polarità uguale e opposta rispetto all'elettrodo di lavoro, la corrente alternata risultante viene misurata e di seguito si ricava l'impedenza complessiva Z che è correlata alla concentrazione dell'analita [21]. L'impedenza Z è il rapporto tra la tensione e la corrente

$$Z = \frac{V(\omega)}{i(\omega)}$$

Sappiamo che l'impedenza di un circuito è la combinazione vettoriale degli effetti resistivi di tutti gli elementi dello stesso. Quindi se si va ad applicare questo modello ad un sistema elettrochimico (metodo che prende il nome di spettroscopia ad impedenza elettrochimica) il valore dell'impedenza Z sarà legato ad una serie di molteplici meccanismi che il sistema elettrochimico esercita per ostacolare il passaggio di corrente. Questi meccanismi possono essere modellizzati come elementi o combinazione di elementi di un circuito elettrico in modo tale da poter ricavare da ciascuno di essi

preziose informazioni. Il processo attraverso cui discriminare all'interno dell'impedenza complessiva ciascun contributo e individuarne un modello circuitale che ne sia corrispondente è molto complesso. Senza scendere nel dettaglio e senza voler essere esaustivi i fenomeni elettrochimici e fisici da modellizzare sono la resistenza dell'elettrolita, il doppio strato che si forma quando gli ioni della soluzione vengono assorbiti sulla superficie dell'elettrodo (modellizzato come una capacità), la resistenza di polarizzazione, il trasferimento di cariche, la diffusione e la capacità di rivestimento [22] [23]. Anche questa tipologia di sensori ha delle applicazioni per sensori di gas, in questi casi generalmente si fa uso di un elettrolita allo stato solido (spesso zirconia stabilizzata con ittrio) [24].

4.7. Sensori di particolato

Per valutare la qualità dell'aria è importante misurare il particolato (Particulate Matter, PM). Quest'ultimo è uno degli agenti inquinanti presenti in atmosfera e sotto questa definizione ricadono particelle solide, liquide o una combinazione di particelle solide e liquide in sospensione nell'aria, classificate in base alle dimensioni del diametro delle particelle (misurate in micrometri) [25]. Con particolato si intendono solitamente le particelle che vanno da 0.1 a 10 micrometri, la loro dimensione è rilevante in quanto influenza direttamente quanto queste particelle penetrino nel sistema respiratorio dell'uomo tanto che nelle policy regolatorie viene fatto uso della nomenclatura PM_x, dove con x viene definito il diametro massimo della particella di interesse. Ad esempio, gli standard di esposizione di sicurezza sono differenti per il PM10 rispetto al PM2.5 come è possibile appurare nella tabella seguente:

Tabella 2: Attuali standard di esposizione al PM10 e al PM 2,5 nei Paesi occidentali e orientali.

	Averaging Time	EU ^a	U.S. ^b	China ^c	Hong Kong ^d	Japan ^e	Taiwan ^f	Australia ^g	WHO Guideline Values ^h
PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 h	50	150	150	100	100	125	50	50
	Annual	40	-	70	50	-	65	25	20
PM2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 h	-	35	75	75	35	35	25	25
	Annual	25	12	35	35	15	15	8	10

Vediamo come i valori di PM siano misurati in concentrazione massica, in particolare l'unità di misura usata è $\mu\text{g}/\text{m}^3$: L'uso di questa unità deriva dal metodo tradizionale e più accurato per misurare il particolato: il metodo gravimetrico [26]. Questo metodo è caratterizzato da un periodo di campionamento che solitamente è di 24 ore, nelle quali un filtro precedentemente pesato viene utilizzato per raccogliere le particelle, pesandolo al termine del campionamento è possibile determinare la massa totale di particolato accumulato. Questo metodo ancora oggi è il più accurato, ma pecca in diversi aspetti di cui il più rilevante è l'impossibilità di ottenere risultati in tempo reale. Per sopperire a ciò, si è fatto uso di altri principi di misura come, ad esempio, quello ottico; di questo sono un esempio gli OPCs ovvero i real-time Optical Particle Counters, strumenti che sfruttano la diffusione della luce da parte di singole particelle per estrarre informazione. In particolare, nei dispositivi low-cost la tecnica più utilizzata è proprio lo scattering della luce [25]. Lo scattering è quel fenomeno che ha luogo quando una particella passa attraverso un fascio di luce provocandone una deviazione dal percorso originario, ed è il risultato della somma di riflessione, rifrazione e diffrazione. Grazie al fisico Gustav Mie oggi abbiamo a disposizione una teoria, appunto teoria di Mie, che descrive l'interazione tra la luce e delle particelle sferiche fornendo delle equazioni che

descrivono come l'intensità della luce diffusa sia funzione della lunghezza d'onda della luce, l'angolo di dispersione, la dimensione della particella e l'indice di rifrazione relativo.

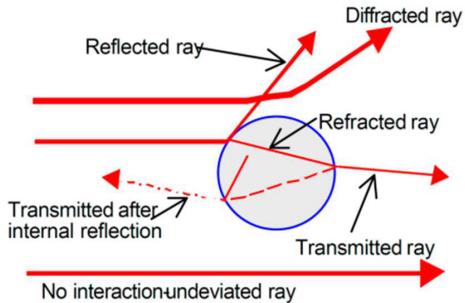


Figura 22:Schematizzazione delle possibili interazioni tra un raggio di luce e la materia

Per sfruttare queste teorie si usa un set-up che, in generale, per i vari device è rappresentabile come segue [26]

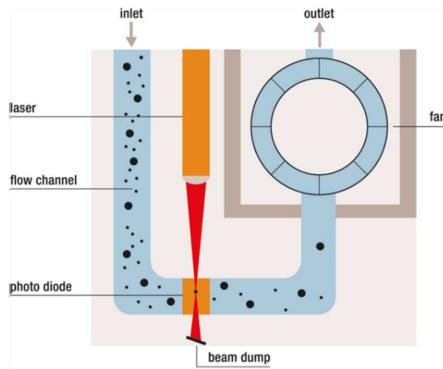


Figura 23: Set-up del sensore ottico per il sensing del particolato

Un flusso d'aria viene creato e controllato da una ventola, questo flusso trasporta il particolato verso la zona illuminata da un fascio laser focalizzato mentre la luce soggetta a scattering viene rilevata da un fotodiodo. Le intensità luminose rilevate dal fotodiodo, generate dal passaggio di particelle nell'area illuminata dal laser, vengono confrontate con le intensità luminose di una curva standard che viene calibrata utilizzando come campione delle particelle con diametro noto ottenendo così la distribuzione delle dimensioni delle particelle. Il vantaggio degli OPCs risiede nella possibilità di poter contemporaneamente contare e stabilire la dimensione delle particelle. [27] Tuttavia particelle al di sotto del diametro di 100nm non sono rilevabili poiché la loro interazione con la luce non è sufficiente per essere rilevata. Per questo sono stati sviluppati i Condensation Particle Counters (CPCs) dove le dimensioni delle particelle vengono aumentate attraverso la condensazione sulla loro superficie del vapore prodotto da un fluido di lavoro prima di introdurle all'interno di un meccanismo di sensing molto simile a quello degli OCPs. Va comunque sottolineata la complessità insita nello sviluppo della tecnica di condensazione del vapore sulle particelle. Il metodo light scattering è il più conosciuto ma come precedentemente illustrato non fornisce in modo diretto la concentrazione massica del particolato, per questo vale la pena di soffermarsi anche su altre tecniche che vengono attualmente utilizzate. I metodi di microbilanciamento in cui delle microbilance, da intendersi come degli elementi oscillatori, subiscono un'alterazione della loro frequenza di risonanza a causa del

depositarsi del particolato sulla loro superficie. Da questa variazione è possibile ricavare informazione sul particolato stesso. A questa categoria appartiene il Quarts crystal microbalance (QCM), ovvero il cristallo di quarzo che grazie alle sue proprietà piezoelettriche cambia la sua frequenza di risonanza quando sulla sua superficie viene aggiunta una piccola quantità di massa [27]. Altra categoria promettente di sensori che possono essere applicati nell'analisi del particolato atmosferico sono i sensori di onde acustiche di superficie, spesso in letteratura si usa l'acronimo SAW che deriva dal termine inglese Surface Acoustic Waves. Questi sono una classe di sistemi microelettromeccanici (MEMS) in grado di rilevare un fenomeno fisico basandosi sulla modulazione delle onde acustiche. Tutti i dispositivi ad onde acustiche si basano sull'effetto piezoelettrico per trasdurre il segnale elettrico in un'onda meccanica [28]. Il layout che accomuna queste tipologie di dispositivi può essere rappresentato come segue

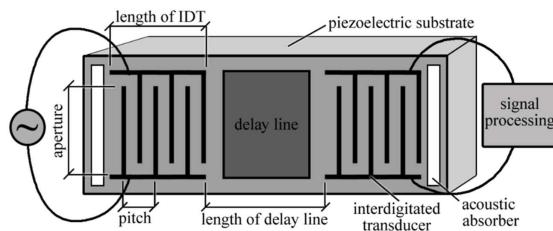


Figura 24: Diagramma di un Surface Acoustic Wave Sensor

Vediamo come il dispositivo sia costituito da un substrato in materiale piezoelettrico e da due IDTs, ovvero interdigitated transducer, in cui uno può essere considerato d'ingresso e uno d'uscita. Questi trasduttori interdigitati sono costituiti da due schiere di elettrodi metallici (si può arrivare fino a mille elettrodi) disposti a pettine e incastriati l'uno sull'altro. La loro funzione può essere quella di convertire il segnale elettrico in onda acustica di superficie oppure al contrario di convertire un'onda acustica di superficie in un segnale elettrico. Gli IDTs possono lavorare sia come emettitori che come ricevitori. Come da figura lo spazio tra i due IDTs attraverso cui l'onda ha la possibilità di propagarsi viene definito delay line. La tipologia di trasduttori sopra menzionati si basano sull'effetto piezoelettrico, caratteristico di alcuni materiali cristallini anisotropi; esso consiste nel caso diretto nella polarizzazione elettrica del materiale dovuta alla differenza di potenziale causata dalla separazione delle cariche all'interno del materiale sottoposto a uno sforzo meccanico mentre nel caso inverso il materiale sottoposto ad una tensione elettrica mostra una deformazione meccanica. L'effetto piezoelettrico inverso viene applicato nell'IDT d'ingresso con lo scopo di generare le onde acustiche di superficie. In pratica si stimola il trasduttore con un segnale elettrico alternato che, entrando nell'array di elettrodi a pettine, crea delle regioni alternate di campo elettrico e provoca nel substrato piezoelettrico delle regioni in cui si alternano tensione e rilassamento, dunque un'onda meccanica.

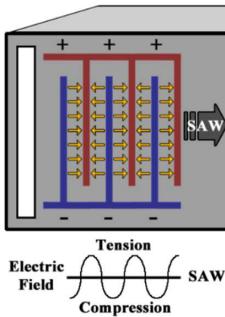


Figura 25:Schematizzazione di un interdigitated transducer

Soltamente si ha interesse nel generare e sfruttare le onde Rayleigh, onde trasversali per cui la direzione di propagazione è perpendicolare a quella di perturbazione, in particolare per la loro caratteristica di avere massima la loro energia sulla superficie del materiale in cui si propagano. Questo è di grande interesse per i dispositivi in questione perché così l'onda risulterà particolarmente sensibili alle proprietà della superficie del dispositivo. Dopo aver oltrepassato la zona chiamata delay line l'onda acustica interagisce con l>IDT d'uscita. In questa situazione si sfrutta l'effetto piezoelettrico diretto tale per cui l'onda acustica genera un segnale elettrico alternato all'uscita delle due schiere di elettrodi. Di seguito è possibile effettuare un confronto tra il segnale elettrico dato in ingresso e quello ottenuto in uscita. Quando una certa massa si deposita sulla superficie del dispositivo, in particolare nella zona del delay line, essa influenzza la modalità di propagazione dell'onda nel mezzo. Questo andrà ad influenzare la velocità dell'onda, infatti, è noto che questo

valore quando un'onda meccanica viaggia su un mezzo solido risulta proporzionale a $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ dove E è il modulo di Young (valore che esprime la propensione dei materiali ad allungarsi o ad accorciarsi a seguito di una sollecitazione) mentre ρ è la densità. I sensori SAW ad alte frequenze sono molto sensibili al carico di massa in particolare se confrontati con i dispositivi QCM citati precedentemente [29]. Dall'altro lato per essere usati sul campo sono ancora dei dispositivi che subiscono particolarmente l'influenza dell'ambiente circostante, per questo alcuni gruppi di ricercatori stanno lavorando per ottimizzare il design di questi sensori, vedi [29]. Una proposta è quella di aggiungere al setup un sensore SAW di riferimento in un sistema come quello mostrato in figura

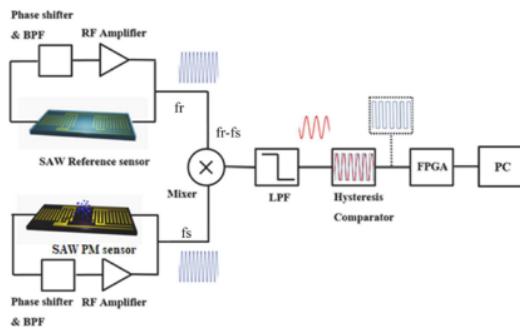


Figura 26:Circuito di un sensore di particolato composto da un sensore SAW sensibile al particolato e uno di riferimento

Sottraendo i segnali in uscita dal dispositivo usato come rilevatore del particolato da quelli in uscita dal sensore di riferimento è possibile eliminare le interferenze dovute a fattori ambientali a cui

entrambi i dispositivi sono esposti e da cui sono in egual misura influenzati. All'uscita del mixer (che effettua la differenza tra le frequenze dei due segnali dati in ingresso) si effettua un'analisi dello spettro del segnale e con un filtro passa basso si eliminano le frequenze superiori a 1 MHz e poi un comparatore converte il segnale sinusoidale in un'onda quadra che può poi essere elaborata digitalmente.

4.8. Sensori Ottici di Gas basati sulla Risonanza Plasmonica di Superficie

Ci si vuole ora focalizzare in particolare sui sensori ottici che utilizzano la risonanza plasmonica di superficie (SPR dall'inglese Surface Plasmon Resonance) come meccanismo di rilevazione per l'analita, dato che sarà il meccanismo utilizzato per la realizzazione del progetto di tesi. La SPR è la propagazione di un'oscillazione coerente degli elettroni di conduzione superficiali, che genera quindi un'oscillazione della densità di carica, detta per l'appunto "plasmone", di un materiale metallico quando esso viene colpito da una radiazione elettromagnetica ed esso si trova a contatto con un materiale avente costante dielettrica di segno opposto (ovvero un dielettrico) [30]. I plasmoni di superficie possono essere eccitati anche in interfacce metallo-dielettrico con dimensioni molto maggiori della lunghezza d'onda della luce incidente, come per esempio nel caso di sottili film metallici a contatto con un substrato dielettrico. Questo fenomeno include sia l'oscillazione delle cariche nel metallo (ossia il vero e proprio plasmone), sia quello delle onde elettromagnetiche nel dielettrico, prendendo il nome di Polaritono plasmonico di Superficie (SPP dall'inglese Surface Plasmon Polariton), come evidenziato nella figura in basso.

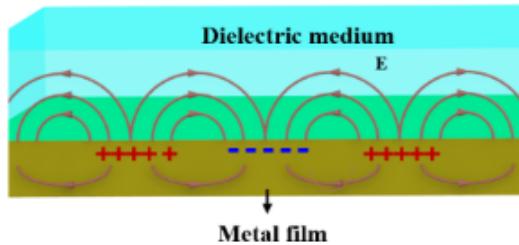


Figura 27: Rappresentazione di un SPR

Data l'elevata sensibilità che le oscillazioni coerenti degli elettroni di superficie dei metalli dimostrano alle variazioni nelle proprietà dielettriche dell'ossido a cui sono interfacciati, come per esempio l'indice di rifrazione n , queste possono essere sfruttate per creare dei sensori di gas con elevata sensibilità. [31,32,33]. L'esistenza di tale fenomeno venne dimostrata teoricamente da Ritchie nel 1957 [34]. Le condizioni di propagazione per il SPP dipendono dalle proprietà del film metallico, dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e dall'indice di rifrazione nel mezzo sia nel film metallico che nel dielettrico. La costante di propagazione β del SPP che si propaga all'interfaccia tra il film metallico e il dielettrico, utilizzando il modello di dielettrico semi-infinito, è dato dall' Eq.(1.1):

$$\beta = k \sqrt{\frac{\epsilon_m \cdot n_s^2}{\epsilon_m + n_s^2}} \quad (\text{Eq.1.1})$$

dove k indica il numero d'onda dello spazio libero, ϵ_m è la costante dielettrica del metallo, un numero complesso tale che $\epsilon_m = \epsilon_{mr} + i \epsilon_{mi}$, e n_s è l'indice di rifrazione del dielettrico. Da questo ne consegue che l'SPP viene generata solo se viene soddisfatta la condizione $\epsilon_{mr} < -n_s^2$. Alcuni metalli che soddisfano questa condizione sono, per esempio, metalli nobili come l'oro, l'argento, il platino, il palladio e il rame, ma anche non nobili, come alluminio, ferro, indio e piombo. [35] Dato che alcuni metalli come l'indio sono particolarmente costosi, o che altri come rame e alluminio presentano un broadening troppo accentuato nel picco di SPR come risposta, i preferibili sono l'oro e l'argento. Quest'ultimo sembra essere il metallo che offre la maggiore sensibilità in termini di SPR sensing, ma data la sua elevata tendenza ad ossidarsi non è in grado di fornire una risposta stabile nel lungo periodo, anche con l'utilizzo di metodi per prevenirne l'ossidazione. Al contrario l'oro, pur presentando una sensibilità minore rispetto all'argento, si dimostra molto più resistente e stabile nella risposta in termini di tempo, rappresentando un optimum nella combinazione delle due proprietà. Tuttavia, nonostante la grande sensibilità, i sensori di gas basati sulla propagazione dei plasmoni sono intrinsecamente non selettivi, poiché qualsiasi gas analita in grado di causare un'alterazione delle proprietà elettriche e dielettriche all'interfaccia fra layer di metallo e substrato è teoricamente in grado di alterare la propagazione del plasmone; quindi, la selettività può essere raggiunta modificando la superficie del metallo con un layer funzionalizzato in modo che esso garantisca l'interazione soltanto con uno specifico analita. Queste tecniche sono state adottate nel caso di bio sensori e hanno dimostrato di essere molto valide, come riportato da Ince et al. [36] I sensori basati sulla propagazione dell'SPP funzionano in modo efficiente in condizioni ambientali normali, ma la necessità di produrre sensori che possano garantire un certo livello di efficienza anche in condizioni ambientali più severe ha spinto verso un'ulteriore ricerca per superare la tecnologia sopravvissuta. L'aspetto di maggiore criticità è che i sensori di gas basati sull'SPR presentano una carenza di rilevamento nel volume localizzato e soprattutto ottengono una buona efficienza soltanto a temperature elevate [37]. Per ovviare a questi inconvenienti si è pensato di combinare la caratteristica elevata stabilità alle alte temperature degli ossidi metallici con la capacità di inserire delle nanoparticelle metalliche all'interno di strati sottili. Quando l'SPR viene confinato in strutture di dimensione comparabile con quella della radiazione incidente, come per esempio in nanoparticelle metalliche, gli elettroni liberi del metallo partecipano collettivamente all'oscillazione, generando l'eccitazione di un SPR localizzato (LSPR) che risulta in un intenso scattering della luce, che appare come un'intensa banda di assorbimento del LSPR e in un incremento del campo elettrico localizzato (Figura in basso). Inoltre le nanoparticelle metalliche di alcuni materiali (come oro e platino) presentano anche elevate proprietà catalitiche che incrementano la sensibilità e la stabilità termica.

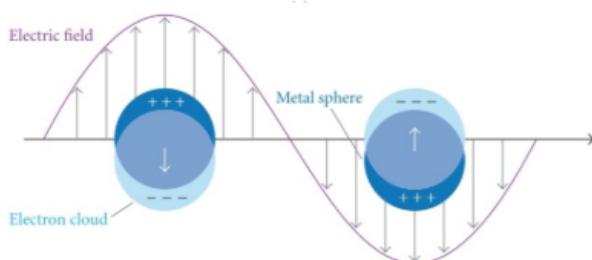


Figura 28: Rappresentazione di un LSPR

Si può notare come i picchi di LSPR di nanoparticelle di oro (AuNPs) utilizzate in questo progetto mostrino sensibilità sia ai cambi di costante dielettrica nella matrice di ossido su cui esse sono supportate, sia ai cambiamenti di densità elettronica nelle nanoparticelle stesse, ed entrambi questi effetti sono stati studiati per l'utilizzo nei sensori di gas. Sensori di gas basati sui plasmoni localizzati possono essere prodotti agevolmente inserendo le nanostrutture responsabili della generazione dei plasmoni localizzati, come per esempio nanoparticelle metalliche, nanorods e simili, all'interno di film sottili di ossidi ottenuti tramite metodi sol-gel. Le strategie per sviluppare tali strutture sono principalmente due:

- 1) Includere un precursore per le nanoparticelle metalliche all'interno della soluzione sol-gel ed utilizzare l'effetto della nucleazione durante la deposizione e il trattamento del film sol-gel;
- 2) Sintetizzare le nanostrutture responsabili dei plasmoni localizzati separatamente ed inserirle solamente successivamente nella matrice sol-gel.

Nonostante il primo approccio risulti decisamente più semplice e lineare nella realizzazione, esso presenta svariate limitazioni: innanzitutto per quanto riguarda il controllo di forma e dimensioni delle nanoparticelle metalliche, della loro composizione e della loro distribuzione omogenea in tutto il layer di ossido in cui si vogliono posizionare, inoltre è necessario anche un accurato controllo della temperatura di riduzione del precursore e di nucleazione delle nanoparticelle. Il secondo approccio permette di ottenere un maggiore controllo dei parametri sopracitati, con lo svantaggio di una maggiore difficoltà tecnica e consumo di tempo nella realizzazione degli strati di ossido [30].

4.9. Sensori di temperatura e di umidità

Il sensore di temperatura è un dispositivo elettronico e viene utilizzato per misurare la temperatura dell'ambiente. I sensori di temperatura misurano la quantità di energia di calore o anche di freddo che viene creata da un oggetto o da un quadro, permettendoci di "sentire" o riconoscere qualsiasi cambiamento effettivo a quella temperatura.

In generale, sono dispositivi per quantificare le letture della temperatura attraverso segnali elettrici. Il sensore è composto da due metalli, che producono una tensione elettrica o una resistenza una volta che vedono una regolazione della temperatura.

Si differenziano in sensori di temperatura a contatto o senza contatto. Tra i sensori di temperatura a contatto, i più comuni sono le termocoppie e i termometri a resistenza, che comprendono a loro volta le termoresistenze o RFD – Resistance Temperature Detector e i resistori termosensibili o Thermistor. Non a contatto sono invece i termometri a infrarossi o pirometri ottici, le termocamere a infrarossi e il datalogger wireless.

Le termocoppie

Una termocoppia è formata da due conduttori metallici uniti in un punto ("giunto caldo", dove viene effettuata la misura) e collegati agli altri due estremi a un morsettiero elettrico ("giunto freddo"), legato a sua volta allo strumento di misurazione.



Figura 29: termocoppie

Si basa sull'effetto Seebeck, un effetto termoelettrico per il quale, dato un circuito formato da materiali metallici conduttori o semiconduttori, una differenza di temperatura genera elettricità. Aprendo il circuito, se nel giunto freddo si manterrà temperatura costante, nel giunto caldo sarà generata tensione elettrica.

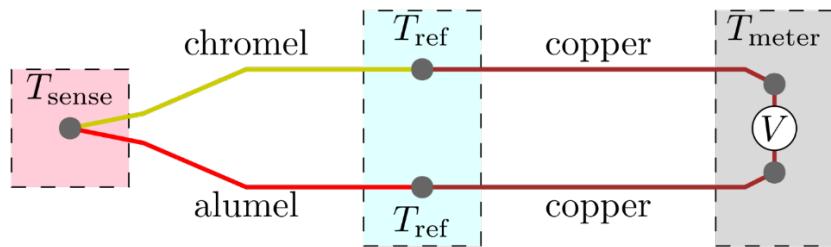


Figura 30: Effetto Seebeck

Le termocoppie rilevano temperature molto elevate (fino a 1750°C), non richiedono alimentatori esterni, sono economiche e ampiamente utilizzate in campo industriale, anche se sensibili al rumore elettrico e non prive di errori sistematici. Generalmente sono isolate in ossido minerale e rivestite da una guaina esterna (anche doppia o tripla) in acciaio inossidabile per le alte temperature. Possono avere un connettore compensato, una bassetta in ceramica, fili liberi, cavi di estensione.

Termometri a resistenza

I termometri a resistenza più comuni sono le termoresistenze o RTD – Resistance Temperature Detector e i termistori o resistori termosensibili. Le termoresistenze, come suggerisce la stessa parola, rilevano la variazione del valore di resistenza del metallo al variare della temperatura quando sottoposto a corrente elettrica. Il valore della resistività è correlato alla lunghezza e alla sezione del conduttore utilizzato, che generalmente è in rame, nichel ma, soprattutto, platino. La variazione della resistenza in un RTD è lineare e il sensore si trova all'estremità del filo. Più aumenterà la temperatura, più aumenterà la resistenza elettrica del metallo all'interno del sensore, che acquisirà la variazione del dato.

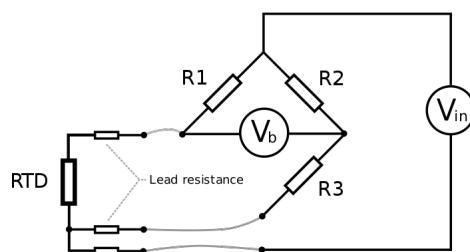


Figura 31: RTD

Tipicamente un RTD contiene fili di platino avvolti in supporto isolante e in una guaina di protezione esterne in acciaio inossidabile per alte temperature. Può avere connettori compensati, basette in ceramica, teste di collegamento.

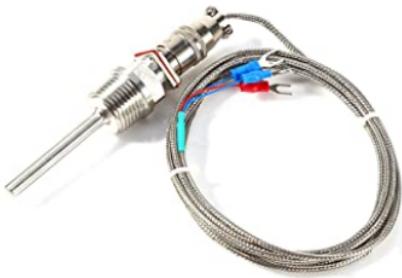


Figura 32: Sensore di temperatura

Tra le termoresistenze più utilizzate in campo industriale, la Pt 100 e la Pt 1000, entrambe al platino. La Pt 100 ha un valore resistivo di 100 Ohm a 0°C e di 375 Ohm a 800°C.

Altamente stabile e precisa, raramente sensibile al rumore elettrico, la RTD è più costosa della termocoppia, ha un range di rilevazione diverso (-200 a 650°C) e tempi di risposta più lenti, richiede un'alimentazione esterna ed è soggetta a fenomeni di autoriscaldamento.

I termistori o resistori termosensibili

I termistori o resistori termosensibili derivano dall'inglese Thermistor, a sua volta contrazione di Thermal Resistor. Sono composti da metalli o materiali a base di ossido di metallo semiconduttori sinterizzati, ovvero ottenuti da lavorazione ad alta temperatura a partire da polveri. Si presentano a disco o a perla, rivestita di resina epossidica o vetro. Anche in questo caso, l'estremità del sensore viene sollecitata con un generatore di tensione e viene misurato il flusso di carica che lo attraversa per stabilire la variazione di temperatura. Il range di misurazione va da -100° a 325°C.



Figura 33: Termistore



Figura 34: termistore

I termistori possono essere NTC – Negative Temperature Coefficient, a coefficiente negativo, o PTC – Positive Temperature Coefficient, a coefficiente positivo. Il coefficiente riguarda la resistenza: all'aumentare di temperatura, nei NTC diminuisce, nei PTC aumenta. Gli NTC sono più usati perché hanno una variazione non lineare: la resistenza viene meno in modo non proporzionale rispetto all'aumento di temperatura. Sono consigliati nei casi in cui la linearità tra le grandezze è trascurabile o dove il range di temperatura da misurare è ridotto: i termistori sono tra i più precisi sensori esistenti ma hanno un range limitato. Hanno un segnale potente e una risposta veloce ma sono particolarmente fragili.

Gli elementi termistori possono essere inseriti in sonde di temperatura, ovvero rivestiti di tubi di metallo.



Figura 35: sonda di temperatura

Sensori di temperatura non a contatto

I sensori di temperatura non a contatto funzionano a infrarossi, e misurano la temperatura attraverso la radiazione infrarossa emessa dal target. Il principio è lo stesso dei sensori PIR: ogni corpo sopra lo zero assoluto emette radiazioni elettromagnetiche che non vengono rilevate dall'occhio umano al di sopra dei 700 nanometri, la frequenza del colore rosso. I sensori a infrarossi captano invece proprio la banda di frequenza che va dai 700 nanometri a un millimetro, “sotto il rosso”. Questi sensori si utilizzano per misurazioni in movimento o nelle condizioni in cui non è possibile il contatto con l'oggetto. Si dividono in pirometri ottici, termocamere, datalogger wireless.

I termometri a infrarossi o pirometri ottici

I termometri a infrarossi vengono anche chiamati anche pirometri ottici o pistole a infrarossi, se possiedono la caratteristica forma.



Figura 36: termometro ad infrarossi

“Pirometro”, letteralmente, significa, dal greco “misuratore del fuoco”: un pirometro ottico misura la variazione di temperatura di un oggetto rilevandone la radiazione, che viene convogliata grazie ad apposite lenti. Più precisamente, un pirometro ottico contiene una lente che direziona la radiazione dell'oggetto su un ricevitore, che la converte a sua volta in segnale elettrico prima e in temperatura poi. Il segnale elettrico viene quindi elaborato, convertito e inviato a un display per essere visualizzato. Alcuni pirometri ottici sono dotati di memoria integrata e/o memoria Flash per l'archiviazione delle misure effettuate.

In pratica, il valore ottenuto dal sensore a infrarossi viene trasmesso a un microcontrollore grazie alla comunicazione I2C- Inter Integrated Circuit : è il microcontrollore a trasmettere lo stesso valore al display e, eventualmente, a memorizzarlo.

Altamente precisi, misurano la temperatura tra 600 °C e 2500 °C.

Le termocamere a infrarossi



Figura 37: Termocamera

Le termocamere a infrarossi riescono a rilevare la distribuzione termica di un'area elaborando una matrice di punti attraverso l'elaborazione digitale delle immagini.

Generano quindi un'immagine termica che rappresenta la distribuzione del calore dell'oggetto di riferimento. Si dividono in **radiometriche e non radiometriche**: le radiometriche misurano anche la temperatura superficiale di ogni pixel del sensore, quindi di verificare eventuali anomalie tecniche. Le termocamere sono composte da una videocamera digitale, un obiettivo a infrarossi, un pulsante di messa a fuoco anche automatica e uno per lo scatto, un misuratore laser della distanza, un display anche touchscreen, uscite USB, slot per schede di memoria, microfono e speaker. Generalmente sono alimentate da batterie al litio. Le più comuni sono le **termocamere a pistola**. I modelli più avanzati sono dotati di microfono, speaker e software che consentono di acquisire in contemporanea l'immagine visibile e quella a infrarossi e di inserire nel display dei puntatori per una misurazione ancora più accurata.

Costose ma molto precise, misurano la temperatura da **-20°C a 1500°C**.

I data logger wireless



Figura 38: data logger di temperatura

Un data logger è un registratore di dati, un raccoglitore autonomo composto da uno o più ricevitori elettronici collegati a un elaboratore che memorizza le misure di temperatura in tempo reale e in precisi intervalli di tempo. Consente quindi un'analisi in tempo reale dei dati, una possibilità di archiviazione maggiore, un monitoraggio costante delle variabili. I dati possono essere scaricati tramite collegamento USB, Ethernet o Wireless. In quest'ultimo caso, non serve alcun tipo di cavo e vengono eliminati i costi di installazione, con i dati inviati direttamente al cloud. Alcuni data logger sono dotati di protezione stagna per le alte temperature e applicazioni industriali.

I sensori di temperatura wireless con data logger non sono molto costosi, hanno dimensioni ridotte, un range di trasmissione fino a 300 metri e di temperatura che va da -10 a 60° C o da -50 a 150 °C.

Sensori di umidità

I sensori di umidità rappresentano uno dei dispositivi maggiormente utilizzati per la misura e il monitoraggio dell’umidità nelle applicazioni industriali, biomediche, ambientali e nell’elettronica di consumo. L’umidità, definita come la percentuale di acqua presente in un determinato volume di aria, è un fattore che influenza enormemente la sensazione di benessere e vivibilità percepita dall’uomo. L’umidità è un aspetto molto importante anche per il funzionamento di dispositivi sensibili, come le apparecchiature elettroniche, industriali, i dispositivi sensibili alle scariche elettrostatiche e quelli che operano con alte tensioni. Dispositivi di questo tipo devono operare in ambienti in cui il livello di umidità deve mantenersi compatibile con i valori sopportati dagli stessi.

I sensori di umidità sono dei dispositivi in grado di misurare l’umidità presente nell’ambiente circostante. Da un punto di vista tecnico, un sensore di questo tipo è anche noto con il termine di igrometro. Considerando il tipo di grandezza misurata possono essere classificati in sensori di umidità assoluta (AH) e in sensori di umidità relativa (RH).

Dal punto di vista elettrico, i sensori di umidità possono invece essere classificati in:

- sensori capacitivi
- oppure resistivi.

Sensori capacitivi

Questo tipo di sensori (progettati per misurare l’umidità relativa, o RH) viene utilizzato soprattutto in applicazioni in cui costo, ingombro e robustezza sono dei requisiti obbligatori. Il principio su cui basano è la variazione della permittività elettrica di un materiale dielettrico al variare dell’umidità. Da un punto di vista costruttivo, un sensore di umidità capacitivo è costituito da un condensatore, tra le cui armature viene inserito un opportuno materiale dielettrico la cui costante dielettrica varia con l’umidità. Il metodo più comunemente utilizzato per la fabbricazione di questo sensore consiste nell’utilizzo di una pellicola di polimero igroscopico (impiegato come dielettrico) alle cui estremità vengono depositati gli elettrodi delle armature.

I vantaggi dei sensori di umidità capacitivi sono numerosi; tra questi possiamo citare i seguenti: tensione di uscita pressoché lineare, elevata stabilità di funzionamento nel tempo, ampia gamma di misura RH e costo contenuto. Occorre comunque tenere che il sensore di umidità capacitivo, per sua natura, non deve essere posizionato troppo distante dal circuito elettronico di controllo. Le applicazioni dei sensori di umidità capacitivi sono numerose: impianti di riscaldamento e condizionamento, stampanti e fax, stazioni meteorologiche, settore automotive, industria alimentare, congelatori, forni e asciugatrici.

Sensori resistivi

Un’altra importante classe di sensori di umidità è rappresentata dai sensori di tipo resistivo, i quali, anziché la capacità, misurano la resistenza (impedenza) oppure la conduttività elettrica. Il principio su cui si basano questi sensori è che la conduttività nei materiali conduttori non metallici dipende dall’umidità (o, in altre parole, dal contenuto di acqua presente). Dal punto di vista costruttivo, un sensore di umidità resistivo è solitamente realizzato utilizzando dei materiali con resistività relativamente bassa, in modo tale da apprezzare ogni variazione della stessa in base all’umidità presente. La relazione tra resistenza e umidità è inversamente proporzionale. Il materiale a bassa resistività viene depositato sopra i due elettrodi, i quali vengono disposti seguendo uno schema interlacciato (a pettine) in modo tale da incrementare il più possibile l’area di contatto. La resistività tra gli elettrodi cambia quando lo strato superiore assorbe umidità; questa variazione può poi essere misurata e convertita in valore numerico tramite l’aiuto di un semplice circuito elettrico.

Come materiale a bassa resistività si possono utilizzare particolari tipi di sale, polielettroliti solidi, oppure polimeri conduttori. I più moderni sensori di umidità resistivi sono protetti esternamente da

uno strato ceramico che garantisce una protezione addizionale. Gli elettrodi del sensore sono invece realizzati con metalli nobili come oro, argento o platino. Tra i principali vantaggi offerti dai sensori di umidità resistivi possiamo citare: costo ridotto, dimensioni compatte, elevata intercambiabilità (i sensori non richiedono alcuna calibrazione), possibilità di collocare i sensori anche ad elevate distanze rispetto al circuito elettrico di controllo e misura. Il limite di questi sensori è la loro sensibilità ai vapori chimici e ad altre sostanze contaminanti. I sensori di umidità resistivi sono ampiamente utilizzati in numerose applicazioni industriali, domestiche, commerciali e per il controllo ambientale.

5. Panoramica commerciale di sensori per la rilevazione di gas

5.1. Process Sensig TechnologiesPST

Sensore di gas a infrarossi di anidride carbonica - serie Dynament Platinum

PST offre una gamma di sensori a infrarossi ad anidride carbonica progettati con tecnologia a infrarossi non dispersivi e che rispondono all'anidride carbonica in tutta la gamma da 500 ppm al 100% in volume. I sensori della serie Platinum contengono tutta l'ottica, l'elettronica e il firmware necessari per fornire un'uscita linearizzata e compensata in temperatura. All'interno della serie Platinum ci sono opzioni a bassa potenza e sensore a doppio gas, metano / anidride carbonica ad alta risoluzione che offre la capacità di monitorare contemporaneamente metano e anidride carbonica in un unico pacchetto di sensori, consumando la potenza di un singolo sensore a infrarossi. Gamme di sensori:

- Volume di CO₂ a basso raggio dello 0-5%, compresi intervalli di ppm da 500 ppm fino a 10.000 ppm
- CO₂ media 0-10% volume
- CO₂ ad alto raggio 0-100% volume

I sensori sono disponibili nelle versioni Industrial Ex d IIC Certified, Mining M1 Certified, UL Approved e Non-Certified. Le versioni software a bassa potenza e certificate EN50271 / SIL1 sono disponibili anche nella maggior parte delle combinazioni.



Certified (Ex'd)



Low Power Certified (Ex'd)



Non-Certified



Low Power Non-Certified



SIL1 Certified (Ex'd)



Low Power SIL1 Certified (Ex'd)



SIL1 Non-Certified



Low Power SIL1 Non-Certified

Figura 39: sensori di gas serie Dynament Platinum

Di seguito le specifiche tecniche del sensore SIL1 Certified

Tabella 3: specifiche tecniche serie Dynament Platinum SIL1 Certified

SPECIFICATION @ 20°C (68°F) ambient temperature	
Operating Voltage Range:	3.0 – 5.0 V d.c.
Operating Current:	Constant current operation, current range 75 – 85mA
Programmable Output Voltage Ranges:	Voltage Output Types – 0.1V to 2.7V d.c. Bridge Output Types – 0v to Bridge Supply Voltage
Volume measuring ranges:	0 - 5%, 0-4%, 0-3%, 0-2%, 0-1% volume CO ₂
Parts per million measuring ranges:	0-500ppm up to 0-10000ppm CO ₂
	0.01% for volume readings.
Resolution:	10ppm for parts per million readings. Output voltage resolution 42.7 µV.
Accuracy: <small>At 20°C, 1 bar atmospheric pressure, calibration gas applied</small>	± 2%
Pressure	Accuracy limits are maintained at pressures within ± 5% of the calibration pressure.
Linearity:	The output is linear within ± 10% of the gas reading
Warm up time:	To final zero ± 2% full-scale: approximately 1 minute, some sensors may take longer.
Response Time T₅₀:	<15s
Response Time T₉₀:	<30s
Zero Repeatability:	± 2% of full scale
Span Repeatability:	± 2% of full scale
Long term zero drift:	± 1% of full scale / month
Operating temperature range:	-20°C to +50°C (-4°F to 122°F)
Temperature performance over the range -20°C to +50°C (-4°F to 122°F):	± 10% of reading up to 50% full scale and ± 15% of reading from 50% to 100% full scale
Storage temperature range:	-20°C to +50°C (-4°F to 122°F)
Humidity range:	0 to 95% RH non-condensing.
Digital signal format:	8 data bits, 1 stop bit, no parity. 2.8V logic level
Standard baud rates:	38,400, 19,200, 9600, 4800
User configurable parameters and functions:	Zero output voltage Full-scale output voltage Positive or negative going output Sensor 'zero' function Sensor 'span' function Over-range value
MTBF:	> 5 years
Weight:	15 grams

Sensori infrarossi Dual-Gas per metano/ossido di carbonio

I nostri sensori Dual-Gas Metano (CH₄) / Anidride Carbonica (CO₂) sono dispositivi rivoluzionari per la misurazione simultanea di metano e anidride carbonica in un unico pacchetto di sensori. Questo risultato è ottenuto consumando solo la potenza di un singolo sensore a infrarossi. I sensori hanno anche il vantaggio aggiuntivo di un intervallo di misurazione dello 0-2% di propano pre-caratterizzato incluso come standard.

I sensori forniscono una misura accurata dei livelli di gas utilizzando tecniche di rilevamento dei gas a infrarossi. Sono disponibili varie versioni con combinazioni di portate fino al 100% di volume di metano e al 5% di volume di anidride carbonica. Consumano la potenza di un singolo sensore a infrarossi e quindi garantiscono una durata prolungata della batteria quando vengono utilizzati nei rilevatori di gas portatili.

Il canale idrocarburi fornisce letture simultanee di metano e propano ad alta risoluzione.

- Risoluzione del canale idrocarburi - 0,01% per l'intervallo da 0 a 10% Vol. e 0,1% per l'intervallo da 10% a 100% Vol. (CH4)
- Risoluzione del canale dell'anidride carbonica - 0,01% Vol. (CO2)

I sensori fanno parte della serie "Platinum" e sono disponibili nelle versioni con certificazione industriale Ex d IIC, con certificazione Mining M1 e senza certificazione. Sono inoltre omologati UL. In tutte le combinazioni sono disponibili anche versioni software a bassa potenza e certificate EN50271 / SIL1.

In basso una immagine del sensore



Figura 40: Sensore ad infrarossi Dual-Gas per metano/ossido di carbonio

Le specifiche tecniche sono riportate in basso.

Tabella 4: specifiche tecniche Sensori infrarossi Dual-Gas per metano/ossido di carbonio

HYDROCARBON SPECIFICATION		CARBON DIOXIDE SPECIFICATION			
Methane measuring range:	0-5%, 0-100% volume or both	Measuring range for low CO₂:	0 - 1%, 0-2%, 0-5% volume CO ₂		
Hydrocarbon measuring range	0-100% LEL equivalent	Measuring range for high CO₂:	0-100% volume CO ₂		
Resolution:	0.01% for readings up to 5% volume methane 0.1% for readings from 5% up to 100% volume methane 0.01% propane for all readings	Resolution:	0.01% for all readings up to 5% volume 0.1% for all readings 5%-100% volume		
Accuracy:	± 10% of the reading @ 20°C (68°F), 1 bar pressure, applied gas.	Accuracy:	± 10% of the reading @ 20°C (68°F), 1 bar pressure, applied gas.		
Response Time T₉₀:	<30s @ 20°C (68°F) ambient	Response Time T₉₀:	<30s @ 20°C (68°F) ambient		
Zero Repeatability:	± 1% of full scale @ 20°C (68°F) ambient	Zero Repeatability:	± 500ppm @ 20°C (68°F) ambient		
Span Repeatability:	± 2% of full scale @ 20°C (68°F) ambient	Span Repeatability:	± 500ppm @ 20°C (68°F) ambient		
Long term zero drift:	± 1% of full scale per month @ 20°C (68°F) ambient, (max ± 3% of full scale per year)	Long term zero drift:	± 500ppm / month @ 20°C (68°F) ambient		
Temperature performance: <small>* May not be applicable when using gas cross-reference factors</small>	± 0.1% volume or ± 10% of reading up to 50% of full scale, ± 15% of reading from 50% to 100% of full scale, or 2% of full scale whichever is greater over the range -20°C to +50°C (-4°F to 122°F)	Temperature performance:	± 10% of reading up to 50% of full scale and ± 15% of reading from 50% to 100% of full scale over the range -20°C to +50°C (-4°F to 122°F)		
GENERAL SPECIFICATION		MECHANICAL DETAIL			
Operating Voltage Range:	3.0 – 5.0 V d.c.				
Operating temperature range:	-20°C to +50°C (-4°F to 122°F) (-40°C to +75°C (-40°F to 167°F) for XTR)				
Warm up time:	To final zero ± 2% full scale : Approximately 1 minute @ 20°C (68°F) ambient, some sensors may take longer				
Storage temperature range:	-20°C to +50°C (-4°F to 122°F)				
Humidity range:	0 to 95% RH non-condensing.				
Digital signal format:	8 data bits, 1 stop bit, no parity. 2.8V logic level				
Warranty:	5 years				
Weight:	15 grams				
Pressure	± 5% of the calibration pressure to maintain the accuracy limits				
COMPLIANCE AND REGULATIONS					

Sensori infrarossi per idrocarburi - Dynament serie standard

PST offre una gamma di sensori a infrarossi idrocarburici che misurano il metano o il gas propano in un intervallo da 0 a 100% in volume. I sensori sono progettati con tecnologia a infrarossi non dispersivi e rispondono a molti gas idrocarburi, tra cui metano e propano.

I sensori della serie Standard forniscono un'uscita di segnale "grezza" che richiede all'utente di fornire la propria elettronica di azionamento e il software per derivare la concentrazione di gas, applicare la linearizzazione e la compensazione della temperatura. Questo può essere ottenuto utilizzando le note dell'applicazione nella scheda download. I sensori sono disponibili nelle versioni Industrial Ex d IIC Certified, Mining M1 Certified, UL Approved e Non-Certified. Il modulo OEM-1 è disponibile per i produttori di apparecchiature originali che non desiderano sviluppare la propria elettronica e software. Il modulo ha un display integrato e include un'uscita 4-20mA. Il microcontrollore contiene tutto il

software necessario e gli algoritmi di elaborazione del segnale per consentire all'utente di ridurre al minimo il time-to-market.



Figura 41: Sensori infrarossi per idrocarburi - Dynament serie standard

Sensore di CO₂ miniaturizzato a basso consumo energetico - SST CozIR-Blink

Il sensore di CO₂ miniaturizzato CozIR®-Blink di SST Sensing Ltd è il nostro sensore di CO₂ a più basso consumo energetico finora ed è il sensore di CO₂ NDIR a più basso consumo energetico disponibile sul mercato. Progettato e prodotto in Scozia, questo sensore di CO₂ miniaturizzato a bassissimo consumo consente all'utente di gestire il consumo energetico. La modalità Blink (l'ispirazione dietro il nome del prodotto), consente agli utenti di personalizzare quanta energia viene spesa per ogni misurazione, consentendo di avere il pieno controllo dei compromessi energetici per applicazioni a bassissimo consumo. Il sensore può essere acceso per registrare una lettura e quindi spento completamente quando non è in uso. Questa non è una modalità sleep - il sensore non utilizza energia durante questa fase. Il basso consumo energetico lo rende leader a livello mondiale ideale anche per i sistemi alimentati a batteria, comprese le applicazioni IoT e la tecnologia intelligente in quanto richiede solo 3,3 V. La CO₂ miniatura CozIR®-Blink fa parte della nostra gamma di sensori di CO₂ CozIR che sono stati progettati per ambienti a bassa concentrazione di anidride carbonica. Offriamo intervalli di misura di 0-2000ppm, 0-5000ppm e 0-1%. Il sensore è facile da usare e viene fornito con interfaccia I2C e UART, offrendo ai clienti la scelta. Il sensore di CO₂ CozIR®-Blink è già un sensore molto popolare tra i nostri clienti. Le applicazioni in cui questo sensore è già stato utilizzato con successo includono riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC), monitoraggio ambientale, ventilazione controllata dalla domanda (DCV) e qualità dell'aria interna (IAQ).

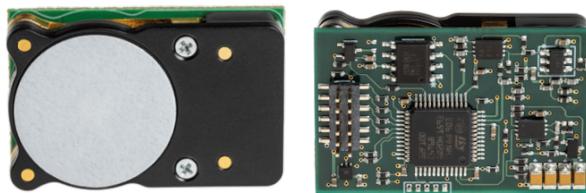


Figura 42: sensore CO₂ miniaturizzato CozIR®-Blink

Le principali caratteristiche sono:

- Sensore CO₂ a basso consumo energetico
- Accuratezza della misura 30 ppm (tipico)

- Tecnologia ottica LED a stato solido
- Interfaccia di controllo e dati UART o I2C
- Compatibile con power cycling
- Calibrazione automatica integrata
- California Building Standards Code, conforme al Titolo 24

Di seguito, l'immagine mostra altre versioni di sensori di CO₂.



Figura 43: Sensore di CO₂ miniaturizzato a basso consumo energetico - SST CozIR-Blink

Alcune applicazioni di rilevamento CO₂ richiedono l'esposizione ad ambienti difficili, da pressioni estreme e temperature estese a un ambiente instabile con urti e vibrazioni improvvisi. La gamma di sensori ExplorIR® NDIR CO₂ è costruita per resistere a cambiamenti estremi nell'ambiente come pressione e temperatura. È possibile misurare sia i livelli bassi che alti di CO₂ da 0-100%. Il sensore NDIR CO₂ è resistente agli urti, il che significa che possono fornire una lettura accurata in ambienti instabili. Con la gamma ExplorIR® di sensori CO₂ non c'è compromesso sul consumo energetico e sono la soluzione ideale per le applicazioni con alimentazione a batteria. La gamma ExplorIR® di sensori CO₂ si basa sulla nostra piattaforma tecnologica SprintIR®, portando i vantaggi dell'elettronica a stato solido ai sensori NDIR CO₂. Il sensore ExplorIR® CO₂ utilizza i LED per fornire prestazioni a bassissimo consumo e resistenti alle vibrazioni alla piattaforma industriale, offrendo un sensore in grado di misurare facilmente il 100% delle concentrazioni di CO₂. In funzionamento continuo ExplorIR® sensore NDIR CO₂ eroga due campioni al secondo e consuma solo 3,5 mW in funzionamento continuo. Anche con due misurazioni di anidride carbonica al secondo, che forniscono bassa latenza e risultati accurati, il consumo di energia è in genere 50 volte inferiore rispetto ai sensori NDIR standard. La combinazione di un consumo energetico estremamente basso e di un riscaldamento istantaneo del sensore ExplorIR® NDIR CO₂, risponde direttamente alla crescente domanda di sensori che possono essere integrati in sistemi wireless a batteria o

autoalimentati, consentendo un monitoraggio economico in tempo reale dei livelli di concentrazione di CO₂. Inoltre, il piccolo diametro di 20 mm del sensore ExplorIR® lo rende il sensore ideale per l'uso in applicazioni a sonda, portatili e alimentate a batteria.

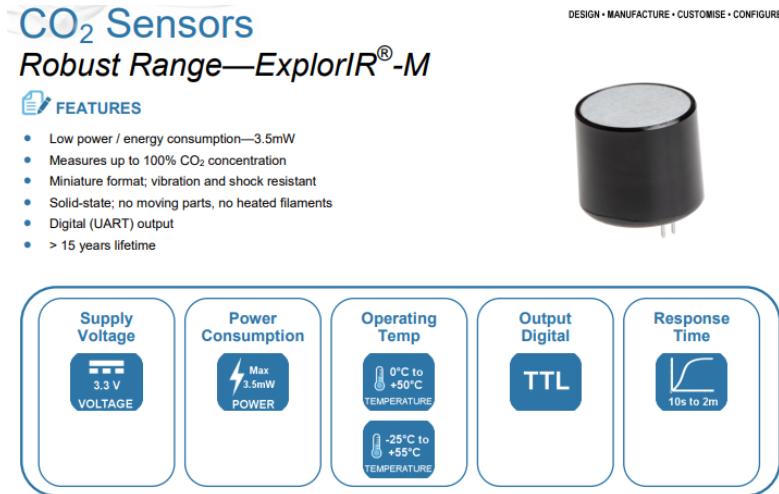


Figura 44: Sensore di CO₂ versione ExplorIR- M

In basso le dimensioni.

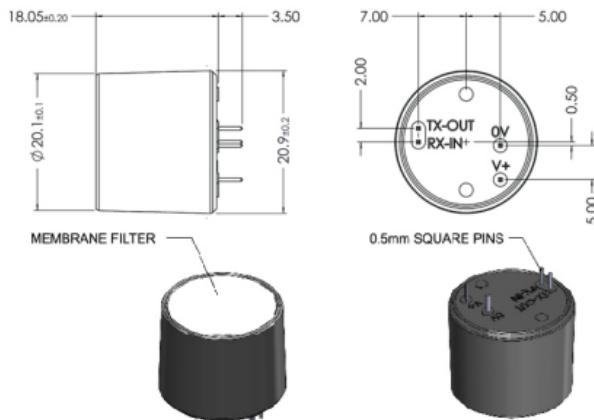


Figura 45: dimensioni Sensore di CO₂ versione ExplorIR- M

Le specifiche sono riportate nella seguente tabella.

Tabella 5: specifiche tecniche Sensore di CO₂ versione ExploIR- M

 TECHNICAL SPECIFICATIONS	
Supply voltage	3.25—5.5V _{DC} (3.3V recommended)
Current ^a	Peak Current 33mA Average Current <1.5mA
Power consumption ^b	3.5mW
Output type	3.3V TTL level UART
Temperature	
Operating:	0°C to +50°C (standard) -25°C to +55°C (extended)
Storage:	-30°C to +70°C
Humidity ^b	0—95% Rh, non-condensing
Start-up time ^c	1.2s
Connector	4 x 0.5mm sq pins
 CO ₂ MEASUREMENT SPECIFICATIONS	
Sensing method	Non-dispersive infrared (NDIR) absorption
Sample method	Diffusion
Measurement range	0—5%, 0—20%, 0—100%
Accuracy ^d	± (70ppm+5% of reading) (100% range ± (300ppm+ 5% of reading ^b)
Pressure dependence ^e	0.15% of reading per mbar in normal atmospheric conditions
Operating pressure range ^f	500mbar to 2bar
Response time, T90 ^g	10sec—2mins (configurable via filter and application)+ Reading refreshed twice per sec.

Sensori di gas a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie standard

I sensori della serie Standard forniscono un'uscita di segnale "raw" che richiede all'utente di fornire la propria elettronica di azionamento e il software per derivare la concentrazione di gas, applicare la linearizzazione e la compensazione della temperatura. Questo può essere ottenuto utilizzando le note dell'applicazione nella scheda download.

I sensori sono disponibili nelle versioni Industrial Ex d IIC Certified, Mining M1 Certified, UL Approved e Non-Certified.

Il modulo OEM-1 è disponibile per i produttori di apparecchiature originali che non desiderano sviluppare la propria elettronica e software. Il modulo ha un display integrato e include un'uscita 4-20mA. Il microcontrollore contiene tutto il software necessario e gli algoritmi di elaborazione del segnale per consentire all'utente di ridurre al minimo il time-to-market.



Figura 46: Sensori di gas a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie standard

Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie Platinum

PST offre una gamma di protossido di azoto (N_2O) progettati con tecnologia a infrarossi non dispersiva e rispondono al gas di protossido di azoto nell'intervallo 0-1000 ppm o 0-1% volume. I sensori serie platinum contengono tutte le ottiche, l'elettronica e il firmware necessari per fornire un'uscita linearizzata e compensata in temperatura.



Figura 47: Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie Platinum

Gamme di sensori:

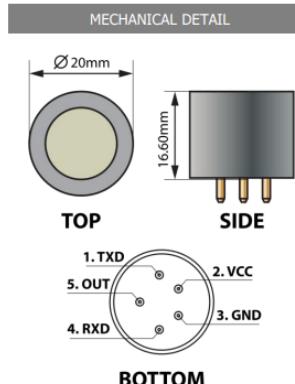
- Volumi N_2O 0-1% a basso intervallo
- PPM N_2O 0-1000ppm

I sensori sono disponibili nelle versioni Industrial Ex d IIC Certified, Mining M1 Certified, UL Approved e Non-Certified.

Tabella 6: Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie Platinum

SPECIFICATION @ 20°C (68°F) ambient temperature		Nitrous Oxide Ranges		
Gas type	Range	Resolution		
N_2O	0-1000 ppm	20ppm		
N_2O	0-1% vol	0.01%		
Operating Voltage Range:	3.0-5.0 VDC			
Volume ranges:	0-1% volume			
PPM range:	0-1000ppm (± 100 ppm zero suppression)			
Resolution:	0.01% for volume readings. 20ppm for parts per million readings.			
Linearity:	$\pm 10\%$ of the applied gas, or $\pm 0.05\%$ volume, whichever is greater.			
Accuracy: <small>At 20°C, 1 bar atmospheric pressure, calibration gas applied</small>	$\pm 5\%$			
Pressure:	$\pm 5\%$ of the calibration pressure to maintain the accuracy limits			
Warm up time:	To final zero $\pm 2\%$ full scale: approximately 10 minutes, some sensors may take longer.			
Response Time T50:	<10s			
Response Time T90:	<30s			
Zero Repeatability:	$\pm 2\%$ of full scale			
Span Repeatability:	$\pm 2\%$ of full scale			
Long term zero drift:	$\pm 1\%$ of full scale/month			
Operating temperature range:	-20°C to +50°C (-4°F to 122°F)			
Temperature performance -40°C to +75°C (-40°F to 167°F):	$\pm 10\%$ of reading up to 50% full scale & $\pm 15\%$ of reading from 50% to 100% full scale			
Storage temperature range:	-20°C to +50°C (-4°F to 122°F)			
Humidity range:	0 to 95% RH non-condensing.			
Digital signal format:	8 data bits, 1 stop bit, no parity, 2.8V logic level			
Standard baud rates:	38,400, 19,200, 9600, 4800			
Warranty:	5 years.			
Weight:	15 grams			

COMPLIANCE AND REGULATIONS	



Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynament serie Platinum

PST offre una gamma di protossido di azoto (N_2O) progettati con tecnologia a infrarossi non dispersiva e rispondono al gas di protossido di azoto nell'intervallo 0-1000 ppm o 0-1% volume. I sensori serie platinum contengono tutte le ottiche, l'elettronica e il firmware necessari per fornire un'uscita linearizzata e compensata in temperatura. Gamma di sensori:

- Volumi N_2O 0-1% a basso intervallo

- PPM N₂O 0-1000ppm

I sensori sono disponibili nelle versioni Industrial Ex d IIC Certified, Mining M1 Certified, UL Approved e Non-Certified.



Figura 48: Sensori a infrarossi di protossido di azoto - Dynamant serie Platinum

Le caratteristiche principali sono le seguenti:

- Funzionalità plug-and-play: contiene tutte le ottiche, l'elettronica e il firmware necessari per fornire un protossido di azoto in uscita linearizzato e compensato in temperatura, accelerando il time-to-market
- Ampio intervallo di temperatura di funzionamento da -20 a +50°C. Disponibile intervallo di temperatura esteso da -40 a +75°C
- Sensori disponibili per coprire l'intervallo da 0-1000 ppm o 0-1% di volume
- Disponibile nelle versioni Industriali Ex d IIC Certified, Mining M1 Certified, UL Approved e Non-Certified

5.2. ABB

Prodotti:

EL3060: Rilevatori di gas a sicurezza intrinseca per ambienti pericolosi.



Figura 49: Rilevatore di gas EL3060

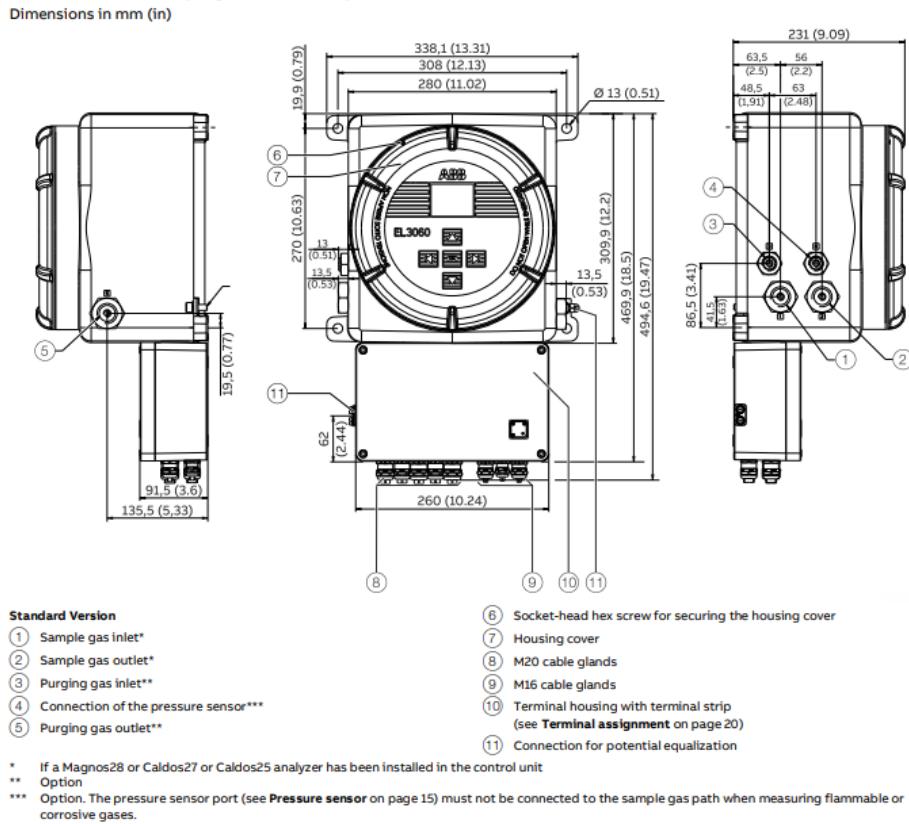


Figura 50: dimensioni EL3060

Il rilevatore EL3060 della ABB è un dispositivo avanzato per il monitoraggio di gas e vapori infiammabili utilizzato principalmente nell'industria per garantire la sicurezza degli ambienti di lavoro. Ecco una descrizione approfondita delle sue caratteristiche e funzionalità:

Caratteristiche Principali Tecnologia di Rilevamento

- **Principio di funzionamento:** Il rilevatore EL3060 utilizza una tecnologia di rilevamento infrarossa non dispersiva (NDIR) per rilevare la presenza di gas infiammabili nell'aria. Questa tecnologia è nota per la sua alta sensibilità e precisione nelle misurazioni.
- **Gamma di gas rilevati:** È progettato principalmente per rilevare gas infiammabili come metano (CH₄), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀), idrocarburi a catena lunga e vapori di solventi, che sono comuni nelle industrie chimiche, petrolchimiche e di produzione.

Robustezza e Affidabilità

- **Design robusto:** Costruito con materiali resistenti agli agenti chimici e alle condizioni ambientali severe tipiche degli ambienti industriali. Questo garantisce la durabilità del dispositivo anche in ambienti corrosivi o con elevate temperature e umidità.
- **Certificazioni di sicurezza:** Il rilevatore EL3060 è conforme alle normative e agli standard di sicurezza internazionali, garantendo la sicurezza degli operatori e la conformità normativa nelle installazioni industriali.

Facilità d'Uso

- **Interfaccia utente intuitiva:** Dotato di un display o di indicatori LED che forniscono informazioni chiare sulle condizioni di rilevamento dei gas. Gli allarmi visivi e sonori avvisano immediatamente gli operatori in caso di superamento dei limiti critici di sicurezza.
- **Calibrazione e manutenzione:** Il rilevatore EL3060 è progettato per una facile calibrazione e manutenzione, consentendo agli utenti di eseguire procedure di manutenzione regolari senza interrompere significativamente le operazioni industriali.

Connattività e Integrazione

- **Interfaccia di comunicazione:** Supporta protocolli di comunicazione standard come HART® e Modbus®, facilitando l'integrazione con sistemi di controllo e monitoraggio centralizzati. Questa caratteristica permette il monitoraggio remoto delle condizioni dell'ambiente e la gestione centralizzata degli allarmi.
- **Compatibilità con sistemi di gestione:** È compatibile con software di gestione avanzati che consentono la raccolta dei dati, l'analisi delle tendenze e la generazione di report, migliorando l'efficienza operativa e la capacità di risposta agli eventi critici.

Applicazioni

Il rilevatore EL3060 trova applicazione in una vasta gamma di settori industriali, inclusi:

- **Industria chimica e petrolchimica:** Monitoraggio dei gas infiammabili durante le fasi di produzione, stoccaggio e trasporto di sostanze chimiche e petrolifere.
- **Industria manifatturiera:** Utilizzato nelle linee di produzione per garantire un ambiente di lavoro sicuro e conforme agli standard di sicurezza.
- **Settore dell'energia:** Impiegato nelle centrali elettriche, nelle raffinerie e nelle installazioni di distribuzione per monitorare la presenza di gas infiammabili.
- **Servizi di emergenza:** Utilizzato da squadre di soccorso e vigili del fuoco per il monitoraggio e la gestione di emergenze riguardanti gas infiammabili.

Vantaggi

- **Miglioramento della sicurezza:** Garantisce una protezione efficace contro i rischi associati alla presenza di gas infiammabili, contribuendo a ridurre i rischi per la sicurezza degli operatori e delle infrastrutture.
- **Riduzione dei costi operativi:** Grazie alla sua robustezza e alla facilità di gestione, riduce i costi di manutenzione e aumenta l'efficienza operativa nelle installazioni industriali.
- **Conformità normativa:** Aiuta le aziende a rispettare le normative e gli standard di sicurezza pertinenti, evitando sanzioni e migliorando la reputazione aziendale.

In sintesi, il rilevatore EL3060 della ABB rappresenta una soluzione affidabile e avanzata per il monitoraggio dei gas infiammabili in ambienti industriali critici. Con le sue caratteristiche di precisione, robustezza e facilità d'uso, è progettato per migliorare la sicurezza degli operatori, proteggere le infrastrutture e ottimizzare le operazioni industriali.

LGR-ICOS: Analizzatori di gas con tecnologia di spettroscopia laser per rilevamento di tracce di gas.

Settori: Petrochimico, ambientale, industriale.

Gli analizzatori LGR-ICOS (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) della ABB sono dispositivi avanzati utilizzati per il monitoraggio preciso e continuo dei gas in vari contesti ambientali e industriali. Questi strumenti si distinguono per la loro capacità di misurare gas traccia con estrema sensibilità e precisione, utilizzando una tecnologia basata sulla spettroscopia di emissione a cavità integrata (ICOS).



Figura 51: LGR-ICOS

Gli analizzatori laser di processo LGR-ICOS GLA531 (in precedenza serie 950) misurano accuratamente le concentrazioni di gas con una sensibilità straordinariamente elevata, una risposta rapida e un ampio intervallo dinamico in miscele semplici e complesse. Senza materiali di consumo o necessità di calibrazioni frequenti, gli analizzatori laser di processo LGR-ICOS possono migliorare significativamente il monitoraggio e il controllo dei processi nelle applicazioni di raffinazione e petrolchimiche, oltre a misurare accuratamente i gas in traccia nei syngas, nell'idrogeno di rigenerazione e nei gas inerti.

La serie GLA531 offre:

- misura di più gas - risposta rapida (secondi)
- elevata sensibilità (livelli ppb)
- elevata precisione in matrici di gas complesse Basso costo totale di proprietà
- Bassi costi operativi (nessun materiale di consumo) - Elevata affidabilità (poche parti mobili)
- Facilità di manutenzione Semplicità di funzionamento
- Facile da configurare
- Funzionamento tramite display LCD touchscreen
- Diagnistica contestuale del sistema
- Manutenzione ridotta Approvazioni globali per la protezione dalle esplosioni

Specifiche tecniche:

- Misurazione continua in tempo reale in linea di diversi gas contemporaneamente
- I gas misurati includono CH₄, C₂H₂, CO, CO₂, H₂O, H₂S, HCl, HF, NH₃, O₂ e altri
- Velocità di trasmissione dati selezionabile dall'utente
- Comunicazioni standard del settore, tra cui analogico da 4 a 20 mA e digitale Modbus
- Accesso al portale USB approvato da Hazloc per scaricare i file di dati e semplificare l'assistenza sul campo

Ecco una descrizione approfondita delle caratteristiche e delle funzionalità degli analizzatori LGR-ICOS della ABB:

Tecnologia ICOS

- **Principio di funzionamento:** L'ICOS è una tecnica avanzata che sfrutta una cavità ottica per aumentare la lunghezza del percorso ottico attraverso il campione di gas, migliorando così la sensibilità delle misurazioni. Questo metodo permette di rilevare gas traccia a concentrazioni molto basse, fino a parte per miliardo (ppb) o anche parte per trilione (ppt).
- **Alta sensibilità e precisione:** Gli analizzatori LGR-ICOS sono noti per la loro capacità di misurare con elevata precisione anche le concentrazioni più basse di gas traccia, rendendoli ideali per applicazioni dove la precisione è critica.

Caratteristiche Principali

Versatilità e Gamma di Gas

- **Gamma di gas misurati:** Gli analizzatori LGR-ICOS della ABB possono essere configurati per misurare una vasta gamma di gas, inclusi gas ad effetto serra come CO₂, CH₄ (metano), N₂O (protossido di azoto) e CO (monossido di carbonio), nonché altri gas industriali e ambientali.
- **Configurazioni personalizzabili:** Sono disponibili diverse configurazioni per adattarsi alle esigenze specifiche dell'applicazione, come ad esempio il monitoraggio in continuo delle emissioni, la misurazione della qualità dell'aria o il controllo dei processi industriali.

Robustezza e Affidabilità

- **Design robusto:** Costruiti per resistere a condizioni ambientali difficili, gli analizzatori LGR-ICOS sono adatti sia per ambienti indoor che outdoor, garantendo una lunga durata e prestazioni affidabili anche in ambienti industriali aggressivi.
- **Manutenzione ridotta:** Grazie alla tecnologia ICOS, che non richiede parti mobili e offre una stabilità a lungo termine delle misurazioni, gli analizzatori richiedono una manutenzione minima rispetto ad altre tecnologie di rilevamento.

Facilità d'Uso e Connattività

- **Interfaccia utente intuitiva:** Dotati di display grafico ad alta risoluzione e controlli semplici, gli analizzatori sono progettati per una facile configurazione e operatività da parte degli utenti.

- **Connettività avanzata:** Integrano opzioni di comunicazione come Ethernet, Modbus e altre interfacce standard per la connessione a sistemi di monitoraggio e controllo centralizzati, facilitando la gestione remota dei dati e la generazione di report.

Applicazioni

Gli analizzatori LGR-ICOS della ABB trovano impiego in una vasta gamma di applicazioni, tra cui:

- **Monitoraggio delle emissioni:** Utilizzati per il monitoraggio continuo delle emissioni di gas serra e inquinanti atmosferici in impianti industriali, centrali elettriche, e inceneritori.
- **Controllo dei processi industriali:** Impiegati per monitorare e ottimizzare i processi di produzione industriale, garantendo la conformità alle normative ambientali e migliorando l'efficienza operativa.
- **Ricerca scientifica:** Utilizzati in laboratori di ricerca per studi ambientali, monitoraggio della qualità dell'aria e studi sull'effetto serra.

Vantaggi

- **Precisione e sensibilità elevate:** Offrono misurazioni precise anche a concentrazioni estremamente basse di gas traccia, garantendo dati affidabili e accurati per le decisioni operative e di conformità normativa.
- **Riduzione dei costi operativi:** Minimizzano i costi di manutenzione grazie alla robustezza della tecnologia ICOS e alla ridotta necessità di interventi correttivi.
- **Conformità normativa:** Aiutano le aziende a rispettare gli standard e le regolamentazioni ambientali, evitando sanzioni e migliorando la sostenibilità delle operazioni industriali.

In sintesi, gli analizzatori LGR-ICOS della ABB rappresentano una soluzione avanzata per il monitoraggio preciso dei gas in ambienti industriali e applicazioni di ricerca. Con la loro tecnologia ICOS, offrono una combinazione di alta sensibilità, robustezza e facilità d'uso, rispondendo alle esigenze critiche di misurazione e controllo in vari settori.

5.3. Mattler Toledo

Mettler Toledo è nota per la sua gamma di sensori di gas che sono progettati principalmente per il monitoraggio continuo e preciso dei gas in vari ambienti industriali. Ecco una panoramica delle caratteristiche e delle applicazioni dei sensori di gas di Mettler Toledo:

Caratteristiche Principali Tecnologie di Rilevamento

- **Tecnologie sensoriali:** Mettler Toledo utilizza diverse tecnologie per i suoi sensori di gas, tra cui celle elettrochimiche, sensori MOS (Metal Oxide Semiconductor), sensori a infrarossi e altre tecnologie avanzate a seconda del tipo di gas da rilevare e delle specifiche dell'applicazione.
- **Gamma di gas rilevati:** I sensori di gas Mettler Toledo possono rilevare una vasta gamma di gas, inclusi gas tossici come monossido di carbonio (CO), idrogeno sulfidrico (H₂S),

ammoniaca (NH₃) e gas combustibili come metano (CH₄), propano (C₃H₈), e altri gas specifici per le esigenze dell'industria.

Robustezza e Affidabilità

- **Design resistente:** I sensori sono costruiti per resistere a condizioni ambientali severe e a contaminanti presenti nell'aria, garantendo prestazioni affidabili anche in ambienti industriali critici.
- **Certificazioni di sicurezza:** Mettler Toledo assicura che i suoi sensori di gas siano conformi alle normative e agli standard di sicurezza internazionali, garantendo la sicurezza degli operatori e la conformità normativa.

Facilità d'Uso e Integrazione

- **Interfaccia utente:** Sono dotati di interfaccia utente intuitiva che consente una facile configurazione, monitoraggio e gestione delle letture dei gas.
- **Connettività:** Molti modelli di sensori supportano opzioni di connettività come Ethernet, Modbus e altre interfacce standard, consentendo l'integrazione con sistemi di monitoraggio centralizzati e il controllo remoto.

Applicazioni

I sensori di gas di Mettler Toledo sono ampiamente utilizzati in diverse applicazioni industriali, inclusi:

- **Industria chimica e petrolchimica:** Monitoraggio dei gas tossici e combustibili durante le operazioni di produzione, stoccaggio e trasporto.
- **Industria manifatturiera:** Monitoraggio delle emissioni e dei gas per garantire un ambiente di lavoro sicuro e conforme agli standard di sicurezza.
- **Monitoraggio ambientale:** Utilizzo in sistemi di monitoraggio della qualità dell'aria e del suolo per il rilevamento e il controllo delle emissioni.
- **Applicazioni di ricerca:** Utilizzo in laboratori e istituti di ricerca per studi e analisi ambientali, monitoraggio dell'aria e delle emissioni.

Vantaggi

- **Precisione e sensibilità:** Offrono misurazioni accurate e sensibili dei gas, consentendo una risposta rapida agli eventi critici e migliorando la sicurezza degli ambienti industriali.
- **Conformità normativa:** Aiutano le aziende a rispettare le normative ambientali e di sicurezza, riducendo il rischio di sanzioni e migliorando la reputazione aziendale.
- **Efficienza operativa:** Grazie alla loro affidabilità e facilità d'uso, i sensori di gas Mettler Toledo contribuiscono a ottimizzare le operazioni industriali, riducendo i costi di manutenzione e migliorando la gestione dei processi.

Analizzatore per fase gas intervallo di CO₂%: GPro 500

L'analizzatore per fase gas di anidride carbonica CO2% GPro 500 è un esclusivo spettrometro laser a diodi modulabili, progettato per la misura di CO2 in un flusso di gas ad alte temperature. Sfrutta un fascio laser compatto per una semplice installazione e misurazione della CO2%.

GPro 500 è un analizzatore di CO2% per applicazioni complesse che fornisce misure affidabili in unità FCC e nella produzione di PTA, stirene e gas di sintesi.

Questo analizzatore di CO2% per fase gas è progettato per funzionare ad alte temperature in situ senza sistema di condizionamento, con un minor costo totale di proprietà.

Il GPro 500 è un analizzatore per fase gas con TDL che non richiede allineamento, con conseguenti minori problemi di installazione e allineamento del TDL.



Figura 52: Analizzatore per fase gas intervallo di CO2%: GPro 500

Tabella 7: Specifiche - Analizzatore per fase gas intervallo di CO2%

Gas misurato	Anidride carbonica (CO2%)
Limite di rilevazione inferiore	1.000 ppm-v
Intervallo di misura	0-100%
Accuratezza	2% della lettura o 1000 ppm (il valore maggiore tra i due)
Linearità	Superiore all'1%
Risoluzione	1.000 ppm-v
Deriva del segnale	Trascurabile (<2% del range di misura tra gli intervalli di manutenzione)
Velocità di campionamento	1 secondo
Tempo di risposta (T90)	CO2 in N2 300 ppm-v fino a 0% in <4 secondi
Ripetibilità	±0,25% della lettura o 0,75-v CO2 (il valore più alto fra i due)
Intervallo di pressione di processo	0,8 bar - 2 bar (abs)/11,6 psi - 29 psi (abs)
Intervallo di temperatura di processo	0-250 °C (23-482 °F); opzionale (per installazione sonda) >0-600 °C (0-1.112 °F) con barriera termica aggiuntiva
Lunghezza cammino ottico effettiva	50 mm - 10 m, in base alla connessione
Connessione a processo	Sensore o sensore

Analizzatore di ossigeno in fase gas: GPro 500

L'analizzatore di ossigeno in fase gas GPro® 500 è un esclusivo spettrometro laser a diodi modulabili, progettato per applicazioni di sicurezza. Sfrutta un fascio laser compatto per una semplice installazione e misurazione.

L'analizzatore di ossigeno in fase gas GPro 500 per applicazioni di sicurezza fornisce un tempo di risposta rapido nel controllo della combustione e in applicazioni di inertizzazione.

Questo analizzatore di ossigeno in fase gas è progettato per funzionare in situ senza sistema di condizionamento soggetto a manutenzione, con un minor costo totale di proprietà.

GPro 500 è un analizzatore per fase gas con TDL che non richiede allineamento, con conseguenti minori problemi di installazione e allineamento del TDL.



Figura 53: analizzatore di ossigeno in fase gas GPro® 500

Tabella 8: Specifiche analizzatore di ossigeno in fase gas

Gas misurato	Ossigeno
Limite di rilevazione inferiore	100 ppm-v
Intervallo di misura	0-100%
Accuratezza	2% della lettura o 100 ppm di O ₂ , il valore più alto tra i due
Linearità	Superiore all'1%
Risoluzione	<0...01% vol O ₂ (100 ppm-v)
Deriva del segnale	Trascurabile (<2% del range di misura tra gli intervalli di manutenzione)
Velocità di campionamento	1 secondo
Tempo di risposta (T90)	O ₂ in N ₂ 21%=>0% in <2 secondi
Ripetibilità	± 0,25% della lettura o 0,05% di O ₂ (il valore più alto tra i due)
Intervallo di pressione di processo	0,8 bar - 5 bar (abs)/11,6 psi - 72,52 psi (abs)
Intervallo di temperatura di processo	0-250 °C (23-482 °F); opzionale (per installazione sonda) 0-600 °C (0-1.112 °F) con barriera termica aggiuntiva
Lunghezza cammino ottico effettiva	50 mm - 10 m, in base alla connessione
Connessione a processo	Sensore o sensore

Analizzatore per fase gas intervallo di CO%: GPro 500

L'analizzatore per fase gas di percentuale di monossido di carbonio GPro 500 è un esclusivo spettrometro laser a diodi modulabili, progettato per la misura diretta del CO in un flusso di gas ad alte temperature. Sfrutta un fascio laser compatto per una semplice installazione e misurazione del CO%. GPro 500 è un analizzatore di CO% per applicazioni complesse che fornisce misurazioni

affidabili in unità FCC, PTA, reforming con vapore e produzione di idrogeno. Questo analizzatore per fase gas di CO% è progettato per funzionare ad alte temperature in situ senza sistema di condizionamento, con un minor costo totale di proprietà. GPro 500 è un analizzatore per fase gas con TDL che non richiede allineamento, con conseguenti minori problemi di installazione e allineamento del TDL.



Figura 54: Analizzatore per fase gas intervallo di CO%: GPro 500

Tabella 9: Specifiche Analizzatore per fase gas intervallo di CO%:

Gas misurato	Monossido di carbonio (CO%)
Limite di rilevazione inferiore	1.500 ppm-v
Intervallo di misura	0-100%
Accuratezza	2% della lettura o 1.500 ppm (il valore più alto fra i due)
Linearità	Superiore all'1%
Risoluzione	1.500 ppm-v
Deriva del segnale	Trascurabile (<2% del range di misura tra gli intervalli di manutenzione)
Velocità di campionamento	1 secondo
Tempo di risposta (T90)	CO in Nz 300 ppm-v fino a 0% in <4 secondi
Ripetibilità	±0,25% della lettura o 0,75-v CO (il valore più alto fra i due)
Intervallo di pressione di processo	0,8 bar - 1,5 bar (abs)/11,6 psi - 21,7 psi (abs)
Intervallo di temperatura di processo	0-250 °C (23-482 °F); opzionale (per installazione sonda) 0-600 °C (0-1.112 °F) con barriera termica aggiuntiva
Lunghezza cammino ottico effettiva	50 mm - 10 m, in base alla connessione
Connessione a processo	Sensore o sensore

In sintesi, i sensori di gas di Mettler Toledo rappresentano una soluzione affidabile e avanzata per il monitoraggio dei gas in vari ambienti industriali e applicazioni di ricerca. Con la loro tecnologia avanzata, sono progettati per migliorare la sicurezza degli operatori, proteggere l'ambiente e garantire la conformità normativa.

5.4. Sensori di gas della TechMaker

Di seguito una panoramica di moduli sensore di gas disponibili.

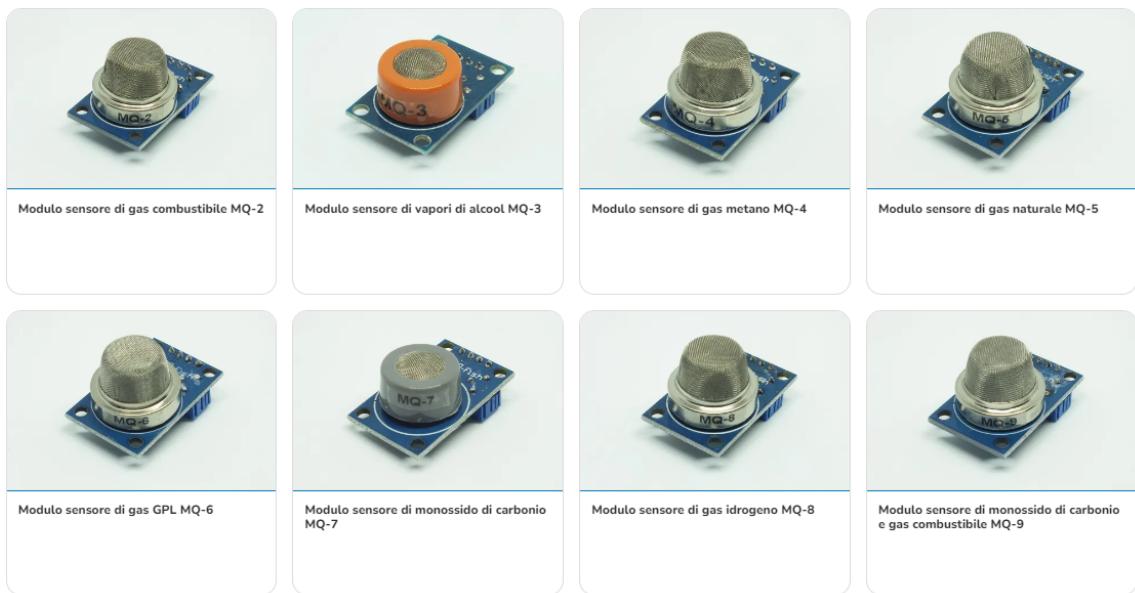


Figura 55: moduli sensori di gas

Modulo sensore di gas MQ-2

Il sensore di gas MQ-2 permette di rilevare la quantità di gas GPL, propano e idrogeno nell'aria. Si può regolare la sensibilità tramite il trimmer integrato.

È in grado di misurare una concentrazione da 300ppm a 10.000ppm.



Figura 56: sensore gas GPL

Tabella 10: dati tecnici sensore MQ-2

SKU	SE482084
Tensione di alimentazione	5 V
Protocollo di comunicazione	analogico e digitale
Gas rilevati	GPL, idrogeno e propano
Concentrazione misurabile	da 300 ppm a 10.000 ppm
Temperatura di funzionamento	da -10 °C a +50 °C

Modulo sensore di gas MQ-8

Il sensore di gas MQ-8 permette di rilevare la quantità di gas idrogeno nell'aria. Si può regolare la sensibilità tramite il trimmer integrato. È in grado di misurare una concentrazione da 100ppm a 10.000ppm.



Figura 57: Sensore MQ-8

Tabella 11: dati tecnici sensore MQ-8

SKU	SE482467
Tensione di alimentazione	5 V
Protocollo di comunicazione	analogico e digitale
Gas rilevati	idrogeno
Concentrazione misurabile	da 100 ppm a 10.000 ppm
Temperatura di funzionamento	da -10 °C a +50 °C

Modulo sensore di monossido di carbonio e gas combustibile MQ-9

Il sensore di gas MQ-9 permette di rilevare la quantità di monossido di carbonio, metano e GPL nell'aria. Si può regolare la sensibilità tramite il trimmer integrato. È in grado di misurare una concentrazione di monossido di carbonio da 10ppm a 1.000ppm e di gas combustibile da 100ppm a 10.000ppm.



Figura 58: Sensore MQ-9

Tabella 12: Dati tecnici sensore MQ-9

SKU	SE482468
Tensione di alimentazione	5 V
Protocollo di comunicazione	analogico e digitale
Gas rilevati	GPL, metano e monossido di carbonio
Concentrazione misurabile (monossido di carbonio)	da 10 ppm a 1.000 ppm
Concentrazione misurabile (gas combustibile)	da 100 ppm a 10.000 ppm
Temperatura di funzionamento	da -10 °C a +50 °C

5.5. Figaro Engineering

Prodotti:

Sensori TGS: Serie di sensori MOX per una vasta gamma di applicazioni domestiche e industriali.

ZS series: Rilevatori di gas avanzati per applicazioni specifiche.

Settori: Automobilistico, domestico, ambientale.

I sensori TGS (Taguchi Gas Sensors) prodotti da Figaro Engineering sono dispositivi utilizzati per il **rilevamento** dei gas in ambienti industriali, domestici e commerciali.

Questi sensori sono noti per la loro sensibilità, affidabilità e capacità di rilevare una vasta gamma di gas, offrendo soluzioni flessibili per diverse applicazioni di monitoraggio ambientale e sicurezza. Ecco una descrizione approfondita dei sensori TGS di Figaro Engineering:

Tecnologia di Rilevamento

- **Principio di funzionamento:** I sensori TGS di Figaro utilizzano tecnologie sensoriali variegate, tra cui celle elettrochimiche, sensori MOS (Metal Oxide Semiconductor) e sensori PID (Photoionization Detector), a seconda del tipo di gas da rilevare e dell'applicazione specifica.
- **Gamma di gas rilevati:** I sensori sono progettati per rilevare una vasta gamma di gas, inclusi gas tossici come monossido di carbonio (CO), idrogeno solfidrico (H₂S), ammoniaca (NH₃), gas combustibili come metano (CH₄) e propano (C₃H₈), e altri gas specifici per le necessità dell'applicazione.

Caratteristiche Principali

Versatilità Applicativa

- **Applicazioni multiple:** I sensori TGS di Figaro sono utilizzati in una varietà di settori e applicazioni, tra cui sicurezza domestica, monitoraggio della qualità dell'aria interna, rilevamento dei gas in ambienti industriali, controllo delle emissioni veicolari e monitoraggio della qualità dell'acqua.
- **Configurazioni personalizzabili:** Sono disponibili diverse configurazioni e modelli di sensori per adattarsi alle specifiche esigenze di rilevamento e alle caratteristiche ambientali dell'installazione.

Robustezza e Affidabilità

- **Design resistente:** Costruiti con materiali robusti e progettati per resistere a condizioni ambientali difficili, i sensori TGS sono adatti per l'uso continuo in ambienti industriali, garantendo una lunga durata e prestazioni affidabili nel tempo.
- **Certificazioni di sicurezza:** I sensori TGS sono conformi alle normative di sicurezza internazionali e ai requisiti normativi applicabili, assicurando la sicurezza degli utenti e la conformità alle normative vigenti.

Facilità d'Uso e Manutenzione

- **Interfaccia utente intuitiva:** Sono progettati per essere facili da installare e operare, con indicatori visivi o digitali che forniscono informazioni chiare sullo stato di rilevamento dei gas.
- **Manutenzione semplice:** Molti modelli di sensori TGS consentono la calibrazione e la manutenzione da parte dell'utente, riducendo i tempi di inattività e i costi associati alla manutenzione preventiva.

Applicazioni

I sensori TGS di Figaro Engineering trovano impiego in una vasta gamma di applicazioni, inclusi:

- **Sicurezza domestica:** Utilizzati per il rilevamento di gas tossici in abitazioni, come monossido di carbonio e gas infiammabili.
- **Monitoraggio ambientale:** Impiegati per il monitoraggio continuo della qualità dell'aria in edifici, uffici e spazi pubblici.
- **Industria automobilistica:** Utilizzati nei sistemi di controllo delle emissioni veicolari per il rilevamento dei gas nocivi provenienti dal motore.
- **Industria chimica e petrolchimica:** Impiegati per il monitoraggio dei gas tossici e combustibili nelle operazioni di produzione e stoccaggio.

Vantaggi

- **Precisione e sensibilità:** Offrono una rilevazione accurata e sensibile dei gas, consentendo una risposta rapida agli eventi critici e migliorando la sicurezza degli ambienti.
- **Flessibilità e adattabilità:** Grazie alla gamma di modelli disponibili, i sensori TGS possono essere personalizzati per rispondere alle esigenze specifiche di rilevamento e applicazione.
- **Conformità normativa:** Contribuiscono al rispetto delle normative ambientali e di sicurezza, aiutando le aziende e gli utenti finali a soddisfare i requisiti normativi applicabili.

Model number	Sensing ^{*1} principle	Features	Target gases	Detection range	Driving ^{*2} conditions	Dimensions ^{*3} Weight
 TGS2616-C00	MOS	- High selectivity to hydrogen	Hydrogen	30 - 3,000 ppm	VH: 5.0V VC: 5.0V (PD: 280mW)	ø9.2x7.8 1.2g approx.
 TGS2616-C01	MOS	- High selectivity to hydrogen - Small interference from acetylene for transformer oil maintenance	Hydrogen	30 - 3,000 ppm	VH: 5.0V VC: 5.0V (PD: 280mW)	ø9.2x7.8 1.2g approx.
 TGS2620	MOS	- High sensitivity to organic solvent vapors	Alcohol Solvent vapors	50 - 5,000 ppm	VH: 5.0V VC: 5.0V (PD: 210mW)	ø9.2x7.8 1.2g approx.
 TGS2630	MOS	- High sensitivity to low-flammable refrigerant gases	Refrigerant gases	1,000 - 10,000 ppm	VH: 5.0V VC: 5.0V (PD: 280mW)	ø9.2x12.4 1.4g approx.
 TGS3830	MOS	- High sensitivity to refrigerant gases - Quick response - Low power consumption	Halocarbon gas	5 - 100 ppm	VH: 0.8V±3% VC: 5.0V (PD: 100mW)	ø9.2x8.5 1.1g approx.
 TGS5042-A00	EC	- High repeatability/selectivity to CO - Sensitivity data bar code on each sensor	CO	0 - 10,000 ppm	(PD: 0mW)	ø14.1x49.7 12g approx.
 TGS6812-D00	CAT	- High accuracy up to high concentration range	Hydrogen Methane Butane Propane	0 - 100 %LEL	VC: 3.0V (PD: 525mW)	ø12.0x13.0 1.5g approx.
 KE-25F3	EC	- Galvanic cell type oxygen sensor - Long life for 5 years - Threaded top ►►► Not Recommended for New Designs	Oxygen	Oxygen 0 - 100 %	(PD: 0mW)	ø23x50 24g approx.
 KE-25	EC	- Galvanic cell type oxygen sensor - Long life for 5 years - Hexagonal top ►►► Not Recommended for New Designs	Oxygen	Oxygen 0 - 100 %	(PD: 0mW)	ø28x47.3 24g approx.
 KE-50	EC	- Galvanic cell type oxygen sensor - Long life for 10 years ►►► Not Recommended for New Designs	Oxygen	Oxygen 0 - 100 %	(PD: 0mW)	ø28x47.3 24g approx.
 KE-12F3LF	EC	- Lead-free galvanic cell type oxygen sensor - Quick response	Oxygen	Oxygen 0 - 30 %	(PD: 0mW)	ø23x50 24g approx.

Figura 59: sensori di gas della Figaro

I suddetti sensori sono da interfacciarsi con l'analizzatore di gas MAX-iR™ FTIR di Thermo Scientific™ progettato per soddisfare gli standard più esigenti in aree quali i processi in linea, il campionamento per lotti, la purezza/certificazione dei gas, la verifica delle emissioni e il monitoraggio dell'aria ambiente.



Figura 60: analizzatore

6. Panoramica commerciale di sensori di temperatura ed umidità

I sensori di temperatura e umidità sono dispositivi fondamentali per monitorare le condizioni ambientali in diverse applicazioni, che vanno dal controllo climatico in ambienti domestici e industriali al monitoraggio meteorologico esterno. Questi sensori si suddividono in versioni indoor (da interno) e outdoor (da esterno), con differenze nelle specifiche tecniche e nei materiali per affrontare le condizioni ambientali a cui sono esposti. Di seguito una descrizione approfondita delle diverse tipologie di sensori in commercio, evidenziando alcuni dei marchi più noti e le caratteristiche tecniche di ogni dispositivo.

6.1. Sensori di temperatura e umidità indoor

I sensori indoor sono utilizzati principalmente per misurare le condizioni ambientali all'interno di abitacoli di auto, camion, convogli dei treni, aerei, edifici, come case, uffici, laboratori e serre. Questi dispositivi sono generalmente meno resistenti rispetto a quelli per esterni, poiché non devono affrontare le intemperie o condizioni estreme. Tuttavia, offrono elevata precisione e sensibilità, soprattutto per il controllo del comfort o per ambienti che richiedono un monitoraggio costante e accurato.

6.2. DHT22 (AM2302) – Adafruit

Il DHT22 (noto anche come AM2302 in alcune versioni) è un sensore di temperatura e umidità molto diffuso, spesso utilizzato per progetti elettronici e di automazione. È prodotto da varie aziende, tra cui Adafruit, e combina precisione e semplicità d'uso. Ecco una panoramica delle sue caratteristiche principali:

Le caratteristiche tecniche sono le seguenti:

1. Misura della temperatura:
 - Range: da -40°C a +80°C
 - Precisione: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
 - Risoluzione: 0.1°C
2. Misura dell'umidità:
 - Range: da 0% a 100% di umidità relativa
 - Precisione: $\pm 2\% - 5\%$ (varia a seconda dell'intervallo)
 - Risoluzione: 0.1%
3. Comunicazione:
 - Protocollo di comunicazione digitale con una linea dati (protocollo a filo singolo)
 - Facilità d'uso con microcontrollori (es. Arduino, Raspberry Pi) grazie al protocollo di comunicazione semplice
 - Tempo di risposta di circa 2 secondi
4. Alimentazione:
 - Voltaggio operativo: 3.3V - 5V
 - Corrente a riposo: 2.5 mA massimo, basso consumo energetico
5. Connessioni:

- 4 pin: alimentazione (VCC), massa (GND), uscita dati (DATA) e un pin non collegato (NC)
- Distanza massima del cavo raccomandata: circa 20 metri (può variare in base alla qualità del cavo e alle condizioni elettriche)

6. Affidabilità:

- Il DHT22 offre una maggiore precisione rispetto al modello più economico DHT11, specialmente per quanto riguarda l'umidità.
- È ben sigillato e protetto dall'umidità e dalla polvere, rendendolo adatto anche per applicazioni outdoor o in ambienti difficili.

L'Adafruit fornisce anche librerie software pronte all'uso per integrare facilmente il DHT22 con schede come Arduino e Raspberry Pi, semplificando il processo di sviluppo.

6.3. Sensirion SHT31 – Sensirion

Il Sensirion SHT31 è un sensore avanzato di temperatura e umidità, prodotto dalla Sensirion, noto per l'elevata precisione e affidabilità nelle misurazioni. È ampiamente utilizzato in applicazioni industriali, mediche e consumer grazie alla sua robustezza e alla capacità di fornire dati accurati in vari ambienti.

Le caratteristiche tecniche sono le seguenti:

1. Misura della temperatura:

- Range: da -40°C a +125°C
- Precisione: $\pm 0.3^\circ\text{C}$ (tipicamente tra 0°C e 90°C)
- Risoluzione: 0.015°C

2. Misura dell'umidità:

- Range: da 0% a 100% di umidità relativa
- Precisione: $\pm 2\%$ (tipica tra 20% e 80% di umidità)
- Risoluzione: 0.01%

3. Comunicazione:

- Interfaccia I²C con indirizzi selezionabili
- Alta velocità di risposta e comunicazione digitale
- Capacità di letture rapide e accurate

4. Alimentazione:

- Voltaggio operativo: 2.4V – 5.5V
- Consumo energetico: estremamente basso, con diverse modalità di risparmio energetico disponibili

5. Affidabilità e robustezza:

- Progettato per operare in ambienti difficili grazie al rivestimento protettivo optional che può essere applicato per proteggerlo da condensa, polvere o sporcizia.
- Autocalibrazione interna per garantire una precisione costante nel tempo senza necessità di interventi esterni.
- Elevata stabilità a lungo termine, che lo rende ideale per applicazioni dove i sensori devono rimanere operativi e accurati per lunghi periodi.

6. Dimensioni e packaging:

- È un sensore molto compatto con dimensioni di circa 2.5 x 2.5 mm.
- Disponibile in vari formati (moduli, sensore singolo) per facilitare l'integrazione in diversi progetti.

7. Tempo di risposta:

- Molto rapido sia per l'umidità che per la temperatura, con tempi di risposta tipici inferiori a 8 secondi per l'umidità (con ventilazione) e meno di 2 secondi per la temperatura.

I vantaggi di tali dispositivi sono di seguito elencati:

- Alta precisione e stabilità a lungo termine
- Facilità d'integrazione con microcontrollori e sistemi basati su I²C
- Basso consumo energetico, ideale per dispositivi a batteria o applicazioni con requisiti energetici ridotti
- Flessibilità d'uso in ambienti difficili o condizioni variabili

Sensirion fornisce ampio supporto per sviluppatori, inclusi driver e librerie software per l'integrazione con piattaforme popolari come Arduino e Raspberry Pi. Il sensore viene spesso utilizzato anche con moduli breakout che ne semplificano ulteriormente l'uso. Il Sensirion SHT31 rappresenta un'ottima scelta per applicazioni che richiedono una misurazione precisa di temperatura e umidità in ambienti dinamici.

6.4. Bosch BME280 – Bosch Sensortec

Il Bosch BME280 è un sensore ambientale avanzato e versatile, progettato per misurare Temperatura, umidità e pressione atmosferica. È prodotto dalla Bosch Sensortec e ampiamente utilizzato in applicazioni come stazioni meteorologiche, dispositivi IoT, droni e automazione domestica. Grazie alla sua precisione e compattezza, è una scelta popolare per progetti che richiedono la misurazione di più parametri ambientali.

Le caratteristiche tecniche sono le seguenti:

1. Misura della temperatura:

- Range: da -40°C a +85°C
- Precisione: ±1°C
- Risoluzione: 0.01°C

2. Misura dell'umidità:

- Range: da 0% a 100% di umidità relativa
- Precisione: ±3% (tipica)
- Risoluzione: 0.008% di umidità relativa

3. Misura della pressione atmosferica:

- Range: da 300 hPa a 1100 hPa (equivalente ad altitudini da -500 metri fino a circa 9000 metri sopra il livello del mare)
- Precisione: ±1 hPa (equivalente a ±8.4 metri in termini di altitudine)

- Risoluzione: 0.18 Pa (molto utile per misurare con precisione l'altitudine)

4. Comunicazione:

- Interfacce supportate: I²C e SPI
- La velocità di comunicazione e la compatibilità con entrambe le interfacce lo rendono facile da integrare con vari microcontrollori (come Arduino, Raspberry Pi, ecc.)

5. Alimentazione:

- Voltaggio operativo: 1.71V – 3.6V (consumo molto basso, ideale per dispositivi a batteria)
- Consumo energetico molto ridotto: in modalità di basso consumo arriva a circa 0.1 µA, ma varia in base alle operazioni svolte.

6. Dimensioni e packaging:

- Il sensore è estremamente compatto, con dimensioni di circa 2.5 x 2.5 x 0.93 mm, facilitando l'integrazione in progetti con spazio limitato.

7. Affidabilità e durata:

- Alta stabilità a lungo termine, con autocalibrazione integrata che mantiene la precisione nel tempo senza la necessità di interventi esterni.
- Progettato per operare in ambienti difficili, con una struttura robusta e resistenza a condensa e condizioni atmosferiche avverse.

I vantaggi di tali dispositivi sono di seguito elencati:

- Misura combinata di temperatura, umidità e pressione in un singolo chip, riducendo i costi e la complessità di progettazione.
- Alta precisione e stabilità, adatto per applicazioni scientifiche e industriali.
- Basso consumo energetico, ideale per dispositivi portatili o alimentati a batteria.
- Facilità d'integrazione con una vasta gamma di piattaforme, grazie al supporto sia di I²C che SPI.

Bosch e la comunità open-source offrono una vasta gamma di librerie software che semplificano l'uso del BME280 con microcontrollori e computer a scheda singola come Arduino, Raspberry Pi e ESP32. Le librerie permettono una lettura e interpretazione rapida dei dati, facilitando l'integrazione in progetti personali o industriali. Il Bosch BME280 è dunque un sensore estremamente versatile, compatto ed efficiente per chiunque abbia bisogno di monitorare variabili ambientali in modo accurato e affidabile.

6.5. Sensori di temperatura e umidità outdoor

I sensori outdoor devono essere progettati per resistere a condizioni ambientali più estreme, inclusi raggi UV, pioggia, vento e temperature estreme.

6.6. SHT75 – Sensirion

Il Sensirion SHT75 è un sensore di temperatura e umidità ad alta precisione, progettato per applicazioni che richiedono affidabilità e accuratezza, sia in ambienti interni che esterni. È uno dei prodotti di punta della linea di sensori della Sensirion, nota per la qualità dei suoi dispositivi di misura.

È noto per offrire eccellenti prestazioni in termini di precisione e affidabilità ed è progettato per applicazioni che richiedono una misurazione accurata e stabile nel tempo. Il SHT75 è basato sulla tecnologia CMOSens® di Sensirion, che integra il sensore e l'elettronica di elaborazione del segnale in un unico chip compatto. Le caratteristiche tecniche sono le seguenti:

1. Misura della temperatura:
 - Range: da -40°C a +123.8°C
 - Precisione: $\pm 0.3^\circ\text{C}$ (tra 25°C e 40°C)
 - Risoluzione: 0.01°C
2. Misura dell'umidità:
 - Range: da 0% a 100% di umidità relativa
 - Precisione: $\pm 1.8\%$ (tra 10% e 90% di umidità relativa)
 - Risoluzione: 0.03% di umidità relativa
3. Comunicazione:
 - Interfaccia digitale con protocollo a 2 fili proprietario simile a I²C.
 - Questo protocollo permette una facile integrazione con microcontrollori e altri sistemi di controllo.
4. Alimentazione:
 - Voltaggio operativo: 2.4V – 5.5V
 - Consumo energetico: estremamente basso, con un massimo di 550 μA durante la misurazione, che lo rende adatto per applicazioni a batteria.
5. Affidabilità e robustezza:
 - Elevata stabilità a lungo termine: il SHT75 è progettato per mantenere la precisione nel tempo senza la necessità di ricalibrazione frequente.
 - Resistenza all'inquinamento ambientale: la capsula protettiva (filter cap) aiuta a proteggere il sensore da polvere, condensa e inquinanti atmosferici, rendendolo adatto per ambienti difficili.
 - Calibrazione di fabbrica: il sensore è pre-calibrato, quindi è pronto per l'uso immediato senza la necessità di ulteriori aggiustamenti.
6. Packaging:
 - Il SHT75 si distingue per il suo formato a capsula che protegge il sensore da fattori ambientali e ne facilita l'installazione.
 - Le dimensioni della capsula sono leggermente più grandi rispetto ad altri sensori della stessa famiglia (come l'SHT31 o SHT21), ma offrono una migliore protezione.
7. Tempo di risposta:
 - Tempo di risposta rapido per l'umidità (tipicamente <8 secondi) e la temperatura (<5 secondi), utile per applicazioni dinamiche in cui le condizioni ambientali cambiano rapidamente.

I vantaggi di tali dispositivi sono di seguito elencati:

- Alta precisione sia nella misurazione della temperatura che dell'umidità, il che lo rende adatto per applicazioni critiche.
- Stabilità a lungo termine, che riduce la necessità di manutenzione e ricalibrazione frequente.

- Protezione ambientale avanzata grazie al suo design con capsula protettiva, che prolunga la durata operativa del sensore in ambienti difficili.
- Basso consumo energetico, rendendolo una scelta ideale per applicazioni a batteria o dispositivi portatili.

Sensirion fornisce un eccellente supporto tecnico e documentazione per l'integrazione del SHT75 con microcontrollori. Sebbene utilizzi un protocollo proprietario, è relativamente facile da usare e può essere integrato in vari sistemi grazie a driver open-source e a librerie disponibili per piattaforme come Arduino e Raspberry Pi. Il Sensirion SHT75 è un sensore di fascia alta per chi cerca massima precisione, stabilità a lungo termine e resistenza ambientale. Grazie al suo design robusto e alla capacità di fornire misurazioni rapide e affidabili, è una scelta eccellente per applicazioni professionali e industriali.

6.7. Decagon Devices VP-4

Il Decagon Devices VP-4 è un sensore avanzato progettato per misurare temperatura, umidità relativa e pressione del vapore in ambienti naturali o artificiali. Questo sensore è comunemente utilizzato in applicazioni ambientali e agricole, dove la misurazione accurata delle condizioni atmosferiche è essenziale per il monitoraggio delle colture, degli ecosistemi o dei sistemi di ventilazione. Le caratteristiche tecniche sono le seguenti:

1. Misura della temperatura:
 - Range: da -40°C a +80°C
 - Precisione: $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (in condizioni normali)
 - Risoluzione: 0.1°C
2. Misura dell'umidità relativa:
 - Range: da 0% a 100% di umidità relativa
 - Precisione: $\pm 2\%$ (tra 0% e 90% di umidità relativa)
 - Risoluzione: 0.1% di umidità relativa
3. Pressione del vapore:
 - Il VP-4 misura indirettamente la pressione del vapore calcolando l'umidità assoluta e relativa, e consente di monitorare i cambiamenti nella pressione del vapore, che è essenziale per la gestione del clima nelle serre o nei sistemi di ventilazione agricoli.
4. Comunicazione:
 - Uscita SDI-12: standard di comunicazione digitale utilizzato principalmente in applicazioni ambientali, che permette la connessione a registratori di dati e sistemi di monitoraggio meteorologico.
 - È compatibile con una vasta gamma di datalogger e sistemi di acquisizione dati ambientali.
5. Alimentazione:
 - Voltaggio operativo: 3.6V – 15V
 - Consumo energetico molto basso, che consente l'uso del sensore in sistemi alimentati a batteria per lunghi periodi.
6. Resistenza e durata:

- Resistenza agli agenti atmosferici: il sensore è progettato per l'uso all'aperto e per resistere a condizioni ambientali difficili, come pioggia, vento e temperature estreme.
- Calibrazione: pre-calibrato in fabbrica, il che significa che il sensore è pronto all'uso senza necessità di taratura iniziale.

7. Dimensioni e installazione:

- Il VP-4 ha una struttura compatta, facile da installare su pali, piattaforme di misurazione o in stazioni meteorologiche.
- I cavi di connessione sono progettati per resistere a condizioni esterne dure, garantendo una lunga durata anche in ambienti difficili.

I vantaggi di tali dispositivi sono di seguito elencati:

- Misura simultanea di temperatura, umidità relativa e pressione del vapore, riducendo il numero di sensori necessari per monitorare le condizioni ambientali.
- Alta precisione e affidabilità anche in ambienti esterni difficili, rendendolo adatto a una vasta gamma di applicazioni ambientali.
- Compatibilità SDI-12, che facilita l'integrazione con sistemi di acquisizione dati e reti di sensori.
- Basso consumo energetico, ideale per operazioni a lungo termine in ambienti remoti o alimentati a batteria.

Il Decagon Devices VP-4 è un sensore robusto, preciso e affidabile, progettato per applicazioni in agricoltura, ecologia e monitoraggio ambientale. La sua capacità di misurare temperatura, umidità relativa e pressione del vapore lo rende una scelta eccellente per chiunque abbia bisogno di monitorare condizioni atmosferiche in tempo reale e con grande precisione. Grazie alla sua compatibilità con sistemi SDI-12 e al basso consumo energetico, è perfetto per operazioni a lungo termine in ambienti esterni.

6.8. Vaisala HMP155

Il Vaisala HMP155 è un sensore avanzato per la misurazione di temperatura e umidità relativa, progettato specificamente per applicazioni meteorologiche, ambientali e industriali. È noto per la sua elevata precisione, affidabilità e resistenza in ambienti difficili, rendendolo ideale per stazioni meteorologiche professionali, sistemi di monitoraggio ambientale e altre applicazioni critiche.

Le caratteristiche principali del Vaisala HMP155 sono:

1. Misura della temperatura:
 - Range: da -80°C a +60°C
 - Precisione: $\pm 0.226^\circ\text{C}$ (tra -80°C e +20°C) e $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (tra -20°C e +40°C)
 - Risoluzione: 0.01°C
 - Questa ampia gamma di misurazione lo rende adatto sia per ambienti estremamente freddi che per climi caldi.
2. Misura dell'umidità relativa:
 - Range: da 0% a 100% di umidità relativa

- Precisione: $\pm 1\%$ (tra 0% e 90% di umidità relativa)
- Risoluzione: 0.1% di umidità relativa
- Sensore HUMICAP®: il HMP155 utilizza la tecnologia HUMICAP® sviluppata da Vaisala, che offre una risposta rapida, alta stabilità e resistenza alla contaminazione.

3. Protezione dal ghiaccio e dalla condensa:

- Il sensore HMP155 può essere dotato di una funzione di riscaldamento, che previene la formazione di ghiaccio o condensa sul sensore, assicurando misurazioni accurate anche in condizioni di congelamento o alta umidità.

4. Interfacce di comunicazione:

- Uscita digitale e analogica: il sensore supporta sia l'uscita RS-485 digitale (MODBUS RTU) che segnali di uscita analogici (tensione o corrente), rendendolo facilmente integrabile in sistemi di acquisizione dati e stazioni meteorologiche.
- Supporta più formati di uscita per adattarsi a diverse piattaforme di monitoraggio.

5. Costruzione robusta:

- Progettato per resistere agli agenti atmosferici, il HMP155 ha una struttura robusta che lo rende adatto per operazioni continue in ambienti esterni difficili. È resistente alla polvere, all'acqua e alle condizioni atmosferiche avverse.
- Design a bassa manutenzione: il sensore è stato progettato per richiedere una manutenzione minima, con una lunga durata e stabilità a lungo termine.

6. Affidabilità e stabilità:

- Il sensore HMP155 offre stabilità a lungo termine grazie alla sua resistenza a contaminanti come polvere, sali e prodotti chimici, rendendolo particolarmente utile in applicazioni industriali e ambientali critiche.
- Autocalibrazione: il sensore si autocalibra durante l'uso, garantendo che le misurazioni rimangano precise nel tempo senza la necessità di frequenti interventi di calibrazione manuale.

7. Accessori e opzioni:

- È possibile dotare il HMP155 di una protezione solare (uno schermo a radiazione solare) per evitare che la luce diretta del sole influenzi le letture, rendendolo perfetto per stazioni meteorologiche all'aperto.
- Disponibili diverse opzioni di cavo e connettori per facilitare l'installazione in una vasta gamma di ambienti.

I vantaggi del dispositivo sono:

- Alta precisione nelle misurazioni di temperatura e umidità.
- Stabilità a lungo termine senza necessità di frequenti ricalibramenti.
- Robusto e resistente agli agenti atmosferici, ideale per ambienti esterni difficili.
- Supporto per uscite digitali e analogiche, che facilita l'integrazione in vari sistemi di monitoraggio.

Il Vaisala HMP155 è un sensore avanzato e affidabile, ideale per il monitoraggio delle condizioni atmosferiche in una vasta gamma di applicazioni professionali. Grazie alla sua elevata precisione, resistenza e versatilità, è la scelta preferita per chi necessita di misurazioni accurate e durature di temperatura e umidità, anche in condizioni climatiche estreme.

6.9. Sensori di temperatura ed umidità della Omni-Sensors

Omni-Sensors è un produttore noto per i suoi sensori di temperatura e umidità, progettati per offrire misurazioni precise e affidabili in una varietà di applicazioni, tra cui monitoraggio ambientale, industriale e scientifico. I loro sensori sono utilizzati in diversi settori, come l'agricoltura, la gestione della qualità dell'aria e la conservazione di beni sensibili. Le caratteristiche principali dei sensori di temperatura e umidità Omni-Sensors sono:

1. Precisione e Accuratezza:
 - I sensori Omni-Sensors offrono misurazioni precise sia della temperatura che dell'umidità, con valori di precisione generalmente nell'ordine di $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ per la temperatura e $\pm 2\%$ RH per l'umidità, a seconda del modello.
 - Sono progettati per fornire letture stabili e ripetibili, anche in ambienti con variazioni rapide di temperatura e umidità.
2. Ampia Gamma di Misurazione:
 - Temperatura: i sensori possono coprire un ampio intervallo di temperature, tipicamente da -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$ o più, a seconda del modello.
 - Umidità: misurano generalmente umidità relativa da 0% a 100% RH, rendendoli ideali per applicazioni in ambienti estremi.
3. Interfaccia di Comunicazione:
 - Molti sensori Omni-Sensors sono dotati di diverse opzioni di comunicazione, tra cui USB, RS-485, e interfacce analogiche (tensione e corrente).
 - Questa versatilità permette di integrare facilmente i sensori in sistemi di monitoraggio esistenti e di acquisire dati in tempo reale.
4. Robustezza e Durabilità:
 - Progettati per resistere a condizioni ambientali difficili, i sensori Omni-Sensors sono spesso dotati di custodie resistenti all'acqua e alla polvere (ad esempio, grado di protezione IP65 o superiore).
 - Sono adatti per applicazioni all'aperto e in ambienti industriali dove le condizioni possono variare drasticamente.
5. Funzionalità di Datalogging:
 - Alcuni modelli includono la capacità di datalogging, consentendo di memorizzare le letture di temperatura e umidità per periodi prolungati, anche quando non sono collegati a un computer.
 - Questa funzionalità è particolarmente utile per il monitoraggio a lungo termine e per la registrazione di eventi specifici.
6. Facilità d'uso:
 - I sensori Omni-Sensors sono progettati per essere facili da installare e utilizzare, con interfacce intuitive e possibilità di plug-and-play.
 - Spesso vengono forniti con software dedicati per l'acquisizione, l'analisi e la visualizzazione dei dati.

Gli esempi di sensori di temperatura e umidità Omni-Sensors sono:

1. Omni-Temp/RH Sensor Model OTHR-1:

- Misurazione della temperatura: da -40°C a +85°C.
 - Misurazione dell'umidità: 0% a 100% RH.
 - Precisione: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ per la temperatura, $\pm 2\%$ RH per l'umidità.
 - Interfaccia: USB e RS-485, per una facile integrazione.
 - Applicazioni: monitoraggio ambientale, gestione della qualità dell'aria e controlli industriali.
2. Omni-Temp/RH Logger Model OTLRH-100:
- Range di temperatura: da -20°C a +60°C.
 - Range di umidità: 0% a 100% RH.
 - Memoria interna: fino a 16.000 letture, con funzionalità di datalogging.
 - Interfaccia: USB per l'alimentazione e il download dei dati.
 - Applicazioni: monitoraggio in celle frigorifere e trasporto di materiali sensibili.
3. Omni-Sensors Industrial Temp/RH Sensor Model OTI-2:
- Range di temperatura: da -30°C a +120°C.
 - Range di umidità: 0% a 100% RH.
 - Precisione: $\pm 0.3^\circ\text{C}$ per la temperatura, $\pm 2\%$ RH per l'umidità.
 - Costruzione: robusta, con grado di protezione IP67.
 - Applicazioni: processi industriali, sistemi HVAC e monitoraggio ambientale.
4. Omni-Sensors High-Precision Temp/RH Sensor Model OTHR-2:
- Range di temperatura: da -50°C a +150°C.
 - Range di umidità: 0% a 100% RH.
 - Precisione: $\pm 0.1^\circ\text{C}$ per la temperatura, $\pm 1\%$ RH per l'umidità.
 - Caratteristiche speciali: progettato per applicazioni di alta precisione in laboratori e industrie chimiche.
 - Interfaccia: USB e analogica.
 - Applicazioni: monitoraggio scientifico e controllo della qualità.

I vantaggi dei sensori Omni-Sensors:

- Versatilità: coprono un'ampia gamma di applicazioni, dai laboratori alle industrie, fino agli ambienti esterni.
- Facilità di integrazione: con diverse opzioni di interfaccia, possono essere facilmente incorporati in sistemi di monitoraggio esistenti.
- Affidabilità: progettati per resistere a condizioni ambientali difficili e garantire misurazioni accurate nel tempo.

I sensori di temperatura e umidità Omni-Sensors offrono soluzioni pratiche e affidabili per monitorare le condizioni ambientali in una varietà di applicazioni. Grazie alla loro precisione, robustezza e facilità d'uso, rappresentano un'ottima scelta per chi cerca di garantire misurazioni accurate e continue in contesti diversi.

I sensori di temperatura e umidità in commercio coprono un'ampia gamma di applicazioni, dai dispositivi di monitoraggio ambientale domestico agli strumenti professionali per condizioni estreme. Per applicazioni indoor, marchi come Adafruit (DHT22) e Sensirion (SHT31) offrono soluzioni affidabili e precise, mentre per ambienti outdoor, sensori come il VP-4 di Decagon Devices o il

Vaisala HMP155 sono progettati per resistere a condizioni climatiche dure. I sensori outdoor tendono ad essere più robusti e costosi, mentre i dispositivi indoor sono generalmente più compatti ed economici, con prestazioni sufficienti per la maggior parte delle esigenze domestiche o semi-professionali.

7. Panoramica commerciale di sensori di corrente

Di seguito alcuni esempi di sensori di corrente presenti in commercio.

7.1. LEM LA 55-P

Il LEM LA 55-P è un sensore di corrente basato sulla tecnologia a effetto Hall, progettato per misurare sia corrente alternata (AC) che continua (DC). È ampiamente utilizzato in sistemi di alimentazione e applicazioni industriali grazie alla sua alta precisione e alla capacità di misurare correnti elevate. Il segnale di uscita è un'onda analogica proporzionale alla corrente che attraversa il circuito primario.



Figura 61: Sensore LEM LA 55 P

Di seguito le specifiche tecniche:

- Corrente nominale: ± 50 A
- Tensione di alimentazione: ± 15 V DC
- Corrente di uscita: 25 mA (a ± 50 A)
- Precisione: $\pm 1\%$ a 25°C
- Banda passante: Da DC a 200 kHz
- Isolamento galvanico: 2,5 kV tra primario e secondario
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a $+85^\circ\text{C}$
- Risposta dinamica: 3 μs
- Applicazioni tipiche: Monitoraggio di corrente in inverter solari, alimentatori switching, protezione dei circuiti elettrici.

7.2. Honeywell CSLA2CD

Il Honeywell CSLA2CD è un trasformatore di corrente a nucleo aperto con rilevamento magnetico, progettato per misurare correnti alternate (AC). Utilizza un'anima magnetica per rilevare la corrente indotta, restituendo un'uscita analogica proporzionale alla corrente primaria. Grazie alla sua sensibilità, è particolarmente adatto per applicazioni di monitoraggio corrente a medio e alto amperaggio.



Figura 62: sensori di corrente Honeywell

Di seguito le specifiche tecniche:

- Corrente nominale: ± 57 A
- Tensione di alimentazione: 12 V DC
- Tensione di uscita: Proporzionale alla corrente, 0-5 V
- Linearità: $\pm 3\%$
- Risposta dinamica: 3 kHz
- Isolamento galvanico: Fino a 2 kV
- Temperatura di funzionamento: Da -25°C a +85°C
- Montaggio: Fornito con fori di montaggio per installazione fissa
- Applicazioni tipiche: Sistemi di controllo motori, monitoraggio corrente per applicazioni industriali, protezione dei circuiti elettrici.

7.3. YHDC SCT013

Il YHDC SCT013 è un trasformatore di corrente a clip, economico e facile da installare, progettato per misurare la corrente alternata (AC) nei circuiti a basso e medio amperaggio. Fornisce un'uscita analogica proporzionale alla corrente misurata e può essere collegato facilmente a dispositivi di monitoraggio, come Arduino o Raspberry Pi, per realizzare sistemi di monitoraggio energetico.



Figura 63: sensore di corrente YHDC SCT013

Di seguito le specifiche tecniche:

- Corrente nominale: 100 A (disponibili modelli da 0 a 100 A)
- Tensione di uscita: 0-1 V (SCT013-000)
- Precisione: $\pm 3\%$

- Banda passante: 50/60 Hz
- Isolamento galvanico: Fino a 3,6 kV
- Temperatura di funzionamento: Da -25°C a +70°C
- Tipo di montaggio: A clip (si aggancia intorno al cavo, senza necessità di scollegare il circuito)
- Applicazioni tipiche: Monitoraggio domestico e industriale del consumo energetico, monitoraggio corrente per elettrodomestici o sistemi HVAC.

7.4. CR Magnetics CR8348

Il CR Magnetics CR8348 è un sensore di corrente analogico progettato per misurare la corrente alternata (AC) tramite un circuito shunt. Converte la corrente AC in una tensione proporzionale per consentire il monitoraggio in tempo reale e il controllo. È spesso utilizzato in applicazioni industriali dove è richiesta un'alta precisione e linearità. Il sensore fornisce un'uscita di tensione standard, facilitando l'integrazione con altri sistemi di monitoraggio.

Di seguito le specifiche tecniche:

- Corrente nominale: 0-30 A (disponibili modelli fino a 50 A)
- Tensione di uscita: 0-10 V AC
- Precisione: $\pm 1\%$ su tutta la gamma
- Risposta dinamica: 50/60 Hz
- Isolamento galvanico: 2 kV
- Temperatura di funzionamento: Da -20°C a +70°C
- Montaggio: Compatto e robusto, adatto per pannelli industriali.
- Applicazioni tipiche: Sistemi HVAC, controllo dei macchinari, monitoraggio dell'energia nei processi industriali.

7.5. Tamura S23P-N

Il Tamura S23P-N è un sensore di corrente alternata basato su un trasformatore di corrente miniaturizzato. È progettato per fornire un'uscita analogica proporzionale alla corrente misurata con elevata precisione. Grazie alla sua costruzione compatta, è ampiamente utilizzato in applicazioni di monitoraggio e protezione nei sistemi industriali ed elettronici.



Figura 64: sensore di corrente Tamura

Di seguito le specifiche tecniche:

- Corrente nominale: 0-30 A
- Tensione di uscita: 0-1 V
- Linearità: $\pm 0,5\%$
- Banda passante: Da 20 Hz a 1 kHz
- Isolamento galvanico: 3 kV
- Temperatura di funzionamento: Da -25°C a +85°C
- Tipo di montaggio: Montaggio su PCB (Printed Circuit Board)
- Applicazioni tipiche: Protezione dei circuiti, monitoraggio dell'energia per inverter e alimentatori switching, applicazioni elettroniche e strumentazione.

Ogni sensore ha specifiche ottimizzate per diverse applicazioni e ambienti, consentendo di scegliere il più adatto in base a precisione, gamma di corrente e tipo di uscita richiesta. La tabella seguente mostra un confronto tra i cinque dispositivi.

Tabella 13: confronto tra i sensori di corrente

Modello	Corrente nominale	Tensione di uscita	Banda passante	Precisione	Isolamento galvanico	Applicazioni principali
LEM LA 55-P	± 50 A	25 mA	DC a 200 kHz	$\pm 1\%$	2,5 kV	Monitoraggio inverter, protezione dei circuiti
Honeywell CSLA2CD	± 57 A	0-5 V	3 kHz	$\pm 3\%$	2 kV	Sistemi di controllo motori, monitoraggio corrente industriale
YHDC SCT013	100 A	0-1 V	50/60 Hz	$\pm 3\%$	3,6 kV	Monitoraggio domestico, sistemi HVAC
CR Magnetics CR8348	0-30 A	0-10 V AC	50/60 Hz	$\pm 1\%$	2 kV	Monitoraggio industriale, controllo macchinari
Tamura S23P-N	0-30 A	0-1 V	20 Hz - 1 kHz	$\pm 0,5\%$	3 kV	Sistemi di protezione, monitoraggio energetico PCB

8. Panoramica commerciale di sensori di luce

Ecco una descrizione approfondita di cinque sensori di luce comunemente presenti sul mercato, con le specifiche tecniche dettagliate e un confronto finale. Ogni sensore utilizza una tecnologia diversa per misurare la luce ambientale o luminosa e fornisce un'uscita analogica o digitale.

8.1. TSL2561 - Sensore di luce digitale

Il TSL2561 è un sensore di luce digitale che misura l'intensità della luce ambientale in unità di lux. Utilizza due fotodiodi interni (uno per luce visibile e uno per infrarossi) per garantire un'alta precisione e compensazione del colore. L'uscita del sensore è in formato digitale I2C, ed è comunemente utilizzato in progetti con microcontrollori e applicazioni di monitoraggio ambientale.

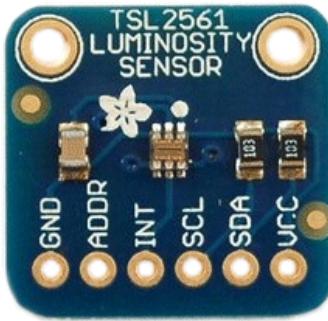


Figura 65: sensore di luce digitale TSL2561

Le specifiche tecniche del dispositivo sono le seguenti:

- Tipo di uscita: Digitale (I2C)
- Gamma di misurazione: Da 0,1 a 40.000 lux
- Precisione: $\pm 10\%$ del valore misurato
- Tensione di alimentazione: 2,7-3,6 V DC
- Sensibilità alla luce: Compensazione per IR e visibile
- Temperatura di funzionamento: Da -30°C a +80°C
- Consumo energetico: Molto basso (da 0,15 mA a 0,6 mA)
- Applicazioni tipiche: Display automatici, monitoraggio della luce ambientale per risparmio energetico, smartphone e dispositivi mobili.

8.2. BH1750FVI - Sensore di luce ambientale digitale

Il BH1750FVI è un sensore di luce ambientale digitale che converte l'intensità luminosa in unità di lux. Comunica tramite interfaccia I2C e ha una risposta molto rapida. È comunemente utilizzato in applicazioni di rilevamento automatico della luce e regolazione della luminosità, come in schermi e sistemi di illuminazione intelligenti.

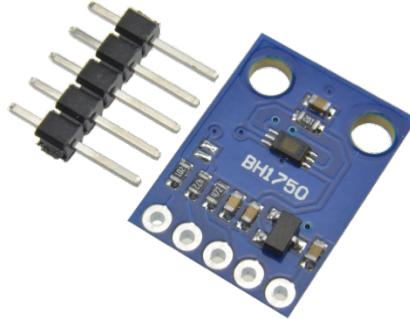


Figura 66: sensore di luce ambientale BH1750FVI

Le specifiche tecniche del dispositivo sono le seguenti:

- Tipo di uscita: Digitale (I2C)
- Gamma di misurazione: Da 1 a 65.535 lux
- Precisione: $\pm 20\%$ del valore misurato
- Tensione di alimentazione: 2,4-3,6 V DC
- Sensibilità alla luce: Alta sensibilità a bassa intensità luminosa
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Consumo energetico: Circa 0,12 mA in modalità attiva
- Applicazioni tipiche: Regolazione della luminosità degli schermi, dispositivi smart home, automazione industriale.

8.3. VEML7700 - Sensore di luce ambientale

Il VEML7700 è un sensore di luce ambientale ad alta sensibilità che fornisce un'uscita digitale tramite interfaccia I2C. È in grado di rilevare livelli di luce molto bassi con un'elevata precisione e include una funzione di compensazione della temperatura per garantire la stabilità della misurazione in ambienti variabili.

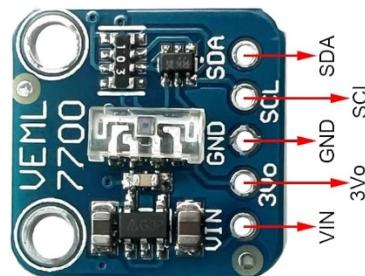


Figura 67: sensore di luce ambientale VEML7700

Le specifiche tecniche del dispositivo sono le seguenti:

- Tipo di uscita: Digitale (I2C)
- Gamma di misurazione: Da 0,01 a 120.000 lux
- Precisione: $\pm 10\%$ del valore misurato
- Tensione di alimentazione: 2,5-3,6 V DC
- Sensibilità alla luce: Alta sensibilità a bassi livelli di luce

- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Consumo energetico: Molto basso, tipicamente 0,17 mA
- Applicazioni tipiche: Sensori ambientali per smart home, fotocamere, illuminazione adattiva per edifici intelligenti.

8.4. OPT3001 - Sensore di luce ambientale

Il OPT3001 è un sensore di luce ambientale ad alta precisione con un'uscita digitale tramite interfaccia I2C. Misura la luce in modo proporzionale all'intensità luminosa percepita dall'occhio umano. È progettato per essere molto preciso anche in condizioni di alta o bassa intensità luminosa e include un filtro integrato che blocca la luce infrarossa.

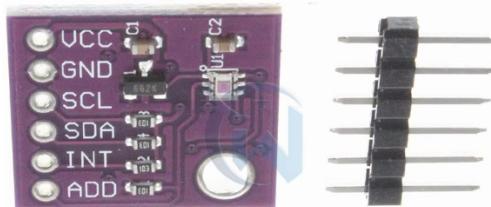


Figura 68: sensore di luce ambientale OPT3001

Le specifiche tecniche del dispositivo sono le seguenti:

- Tipo di uscita: Digitale (I2C)
- Gamma di misurazione: Da 0,01 a 83.000 lux
- Precisione: $\pm 5\%$ del valore misurato
- Tensione di alimentazione: 1,6-3,6 V DC
- Sensibilità alla luce: Rilevamento preciso con filtro IR
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Consumo energetico: Molto basso, circa 2 μ A in modalità stand-by
- Applicazioni tipiche: Sistemi di illuminazione intelligenti, regolazione della luminosità di display, dispositivi portatili.

8.5. TEMT6000 - Sensore di luce ambientale analogico

Il TEMT6000 è un sensore di luce ambientale analogico, che misura l'intensità luminosa e fornisce un'uscita in tensione proporzionale alla luce ambientale. È semplice da utilizzare e non richiede una configurazione digitale, rendendolo una scelta popolare per progetti con microcontrollori o circuiti semplici.



Figura 69: sensore di luce TEMT6000

Le specifiche tecniche del dispositivo sono le seguenti:

- Tipo di uscita: Analogica
- Gamma di misurazione: Fino a 10.000 lux
- Precisione: Proporzionale all'intensità luminosa
- Tensione di alimentazione: 2,7-5,5 V DC
- Sensibilità alla luce: Sensibile alla luce visibile
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Consumo energetico: Basso consumo (tipicamente pochi μ A)
- Applicazioni tipiche: Regolazione automatica della luminosità, dispositivi portatili, sensori ambientali semplici.

La tabella in basso riporta un confronto tra i suddetti sensori.

Tabella 14: confronto tra i sensori di luce

Modello	Tipo di uscita	Gamma di misurazione (lux)	Precisione	Tensione di alimentazione	Consumo energetico	Applicazioni principali
TSL2561	Digitale (I2C)	0,1 - 40.000	±10%	2,7-3,6 V	0,15-0,6 mA	Smartphone, monitoraggio ambientale, display
BH1750FVI	Digitale (I2C)	1 - 65.535	±20%	2,4-3,6 V	0,12 mA	Regolazione luminosità, dispositivi smart home
VEML7700	Digitale (I2C)	0,01 - 120.000	±10%	2,5-3,6 V	0,17 mA	Fotocamere, illuminazione adattiva, monitoraggio ambientale
OPT3001	Digitale (I2C)	0,01 - 83.000	±5%	1,6-3,6 V	2 µA	Sistemi di illuminazione, dispositivi portatili
TEMT6000	Analogica	Fino a 10.000	Proporzionale	2,7-5,5 V	Pochi µA	Regolazione automatica, sensori ambientali

- **TSL2561** e **BH1750FVI** sono ottimi per chi cerca sensori con interfaccia I2C e una buona gamma di misurazione, sebbene il **VEML7700** offra una gamma di misura ancora più ampia e maggiore sensibilità ai bassi livelli di luce.
- **OPT3001** è il sensore più preciso, con ±5% di accuratezza, ed è ideale per applicazioni ad alta precisione come sistemi di illuminazione adattivi.
- **TEMT6000**, essendo analogico, è perfetto per progetti più semplici o quando non è necessaria una comunicazione digitale complessa, rendendolo versatile e facile da usare in circuiti semplici.

In base all'applicazione desiderata, ciascuno di questi sensori offre caratteristiche uniche, che spaziano da precisione elevata a semplicità e basso costo.

9. Panoramica commerciale di sensori di vibrazione (accelerometri)

Si fornisce di seguito una descrizione approfondita di cinque sensori di vibrazione, comunemente utilizzati come accelerometri, con le specifiche tecniche dettagliate e un confronto finale. Gli accelerometri misurano l'accelerazione e le vibrazioni in applicazioni industriali, automobilistiche, robotiche, e in dispositivi portatili.

9.1. ADXL335 - Accelerometro a 3 assi analogico

L'ADXL335 è un accelerometro a 3 assi con uscita analogica, in grado di misurare l'accelerazione lungo gli assi X, Y e Z. È noto per la sua compattezza e bassa potenza, rendendolo ideale per applicazioni che richiedono monitoraggio delle vibrazioni o rilevamento di movimenti a basso consumo. La sua gamma di misurazione è limitata rispetto ad altri sensori, ma offre un'ottima sensibilità per applicazioni di rilevamento di movimenti leggeri.

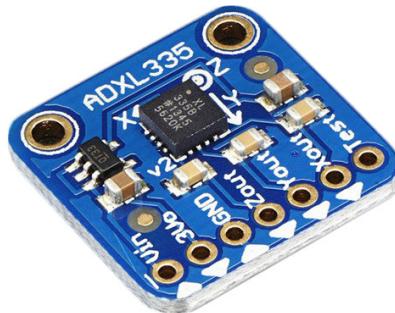


Figura 70: accelerometro ADXL335

Le specifiche tecniche sono riportate in basso:

- Tipo di uscita: Analogica
- Gamma di misurazione: $\pm 3 \text{ g}$
- Numero di assi: 3
- Tensione di alimentazione: 1,8-3,6 V DC
- Sensibilità: 300 mV/g
- Banda passante: Fino a 1,6 kHz per l'asse X e Y; fino a 550 Hz per l'asse Z
- Consumo energetico: 350 μA a 3 V
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a $+85^\circ\text{C}$
- Applicazioni tipiche: Dispositivi portatili, giocattoli intelligenti, robotica, sistemi di monitoraggio della salute.

9.2. MPU-6050 - Accelerometro e giroscopio a 6 assi

Il MPU-6050 è un modulo combinato accelerometro e giroscopio a 6 assi, con un'interfaccia I2C digitale. È in grado di rilevare l'accelerazione lungo tre assi e la velocità angolare, rendendolo molto versatile per applicazioni di monitoraggio della vibrazione, stabilizzazione e rilevamento di movimenti complessi. Include un buffer FIFO per l'elaborazione efficiente dei dati.



Figura 71: accelerometro MPU-6050

Le specifiche tecniche sono di seguito elencate:

- Tipo di uscita: Digitale (I2C)
- Gamma di misurazione accelerazione: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
- Gamma di misurazione giroscopio: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 °/s
- Numero di assi: 6 (accelerazione + velocità angolare)
- Tensione di alimentazione: 2,3-3,4 V DC
- Sensibilità: 16384 LSB/g (per ± 2 g)
- Banda passante: Fino a 256 Hz per l'accelerometro, 256 Hz per il giroscopio
- Consumo energetico: 3,9 mA in modalità attiva
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Applicazioni tipiche: Droni, stabilizzazione delle fotocamere, dispositivi indossabili, robotica.

9.3. ADXL345 - Accelerometro digitale a 3 assi

Il ADXL345 è un accelerometro digitale a 3 assi con interfaccia I2C e SPI, che offre un'elevata sensibilità per il rilevamento di accelerazioni e vibrazioni in applicazioni industriali e consumer. Il sensore supporta diverse gamme di misurazione, fino a ± 16 g, ed è noto per il suo basso consumo energetico, rendendolo adatto a dispositivi portatili e a basso consumo.



Figura 72: accelerometro ADXL345

Le specifiche tecniche sono riportate in basso:

- Tipo di uscita: Digitale (I2C, SPI)
- Gamma di misurazione: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
- Numero di assi: 3

- Tensione di alimentazione: 1,8-3,6 V DC
- Sensibilità: 256 LSB/g (per ± 2 g)
- Banda passante: Fino a 1600 Hz
- Consumo energetico: 40 μ A in modalità stand-by, 140 μ A in modalità misurazione
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Applicazioni tipiche: Monitoraggio delle vibrazioni industriali, smartphone, contapassi, dispositivi portatili.

9.4. LIS3DH - Accelerometro digitale a 3 assi

Il LIS3DH è un accelerometro digitale a 3 assi a bassa potenza con interfaccia I2C/SPI, particolarmente adatto per applicazioni che richiedono precisione nel rilevamento di movimenti e vibrazioni in dispositivi portatili o indossabili. È uno dei sensori più efficienti dal punto di vista energetico, progettato per applicazioni che richiedono un basso consumo prolungato.



Figura 73: Accelerometro LIS3DH

Le specifiche tecniche sono riportate di seguito:

- Tipo di uscita: Digitale (I2C, SPI)
- Gamma di misurazione: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
- Numero di assi: 3
- Tensione di alimentazione: 1,71-3,6 V DC
- Sensibilità: 1 mg/digit (per ± 2 g)
- Banda passante: Fino a 5 kHz
- Consumo energetico: 2 μ A in modalità bassa potenza, 10 μ A in modalità attiva
- Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Applicazioni tipiche: Dispositivi indossabili, dispositivi medici, dispositivi per il fitness, robotica.

9.5. BMA400 - Accelerometro a 3 assi a bassa potenza

Il BMA400 è un accelerometro digitale a 3 assi con un consumo energetico estremamente basso, rendendolo ideale per dispositivi alimentati a batteria. È progettato per monitorare vibrazioni e movimenti con alta precisione e può essere utilizzato per rilevare eventi di movimento e vibrazioni in applicazioni industriali e consumer.

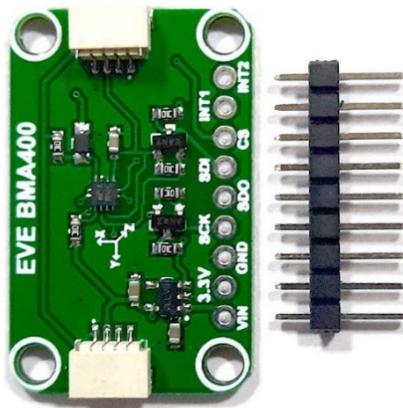


Figura 74: Accelerometro BMA400

- Specifiche tecniche:
 - Tipo di uscita: Digitale (I2C, SPI)
 - Gamma di misurazione: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
 - Numero di assi: 3
 - Tensione di alimentazione: 1,7-3,6 V DC
 - Sensibilità: 4096 LSB/g (per ± 2 g)
 - Banda passante: Fino a 800 Hz
 - Consumo energetico: 14 μ A in modalità attiva
 - Temperatura di funzionamento: Da -40°C a +85°C
- Applicazioni tipiche: Dispositivi indossabili, monitoraggio delle vibrazioni industriali, dispositivi alimentati a batteria, dispositivi medici.

La tabella in basso riporta un confronto tra le prestazioni dei suddetti accelerometri. In conclusione si può evidenziare che:

- ADXL335 è un'opzione semplice e robusta con uscita analogica, ideale per progetti che non richiedono una configurazione digitale complessa.
- MPU-6050 combina accelerometro e giroscopio in un unico modulo, rendendolo una soluzione versatile per applicazioni che necessitano di entrambe le misure.
- ADXL345 offre un ottimo compromesso tra precisione e consumo energetico, con supporto per I2C e SPI, rendendolo adatto a dispositivi portatili e monitoraggio industriale.
- LIS3DH è particolarmente adatto per applicazioni che richiedono un consumo energetico estremamente basso e un'ampia banda passante.
- BMA400 è ideale per dispositivi alimentati a batteria grazie al suo bassissimo consumo energetico, pur mantenendo un buon livello di sensibilità e gamma di misurazione.

In funzione delle esigenze specifiche (precisione, numero di assi, consumo energetico o interfaccia di uscita), ciascun accelerometro può offrire vantaggi unici.

Tabella 15: confronto tra le prestazioni degli accelerometri

Modello	Tipo di uscita	Gamma di misurazione (g)	Numero di assi	Consumo energetico	Banda passante	Applicazioni principali
ADXL335	Analogica	± 3 g	3	350 μ A	Fino a 1,6 kHz	Dispositivi portatili, robotica, monitoraggio della salute
MPU-6050	Digitale (I2C)	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g	6 (con giroscopio)	3,9 mA	Fino a 256 Hz	Droni, stabilizzazione fotocamere, dispositivi indossabili
ADXL345	Digitale (I2C, SPI)	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g	3	140 μ A in attivo, 40 μ A in stand-by	Fino a 1600 Hz	Monitoraggio vibrazioni industriali, dispositivi portatili
LIS3DH	Digitale (I2C, SPI)	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g	3	10 μ A in attivo, 2 μ A in bassa potenza	Fino a 5 kHz	Dispositivi indossabili, dispositivi medici, robotica
BMA400	Digitale (I2C, SPI)	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g	3	14 μ A	Fino a 800 Hz	Monitoraggio industriale, dispositivi alimentati a batteria

9. Identificazione dei sensori

Nel seguente paragrafo sono riportati i sensori che sono stati individuati a valle dello studio dello stato dell'arte commerciale. La scelta dei dispositivi è avvenuta sulla base delle specifiche tecniche di ognuno di loro e sulla base economica.

9.1. Selezione della Sensoristica per il risparmio energetico

Sensore di corrente AC analogico

Può essere comodamente utilizzata per la misurazione della corrente AC per monitorare motori AC, apparecchiature di illuminazione, compressori d'aria, ecc.



Figura 75: sensore di corrente

Le specifiche tecniche sono le seguenti:

Modulo di conversione del segnale di corrente CA

- Tensione di ingresso (VCC): 3,3 V-5,5 V
- Interfaccia: Gravity Analog (PH2.0-3P, uscita di tensione analogica 0,2-2,8 V CC)
- Intervallo di ingresso della tensione CA: 0-1 V (CA RMS)
- Errore relativo: $\pm 4\%$
- Dimensioni: 32×27 mm / 1,26×1,06 pollici
- Peso: 5g

Sonda per trasformatore CA di tipo aperto

- Intervallo di corrente CA: 0-20 A
- Uscita del segnale (spina standard Φ3,5mm 3P): tensione CA 0-1 V, intervallo corrispondente lineare 0-20 A
- Precisione: $\pm 1\%$
- Non linearità: $\leq \pm 0,2\%$
- Gamma di frequenza: 50Hz~1kHz
- Lunghezza del cavo: 1 m
- Temperatura di lavoro: -25 °C~+70 °C
- Dimensioni apertura: 13×13 mm / 0,51×0,51 pollici
- Peso: 50g

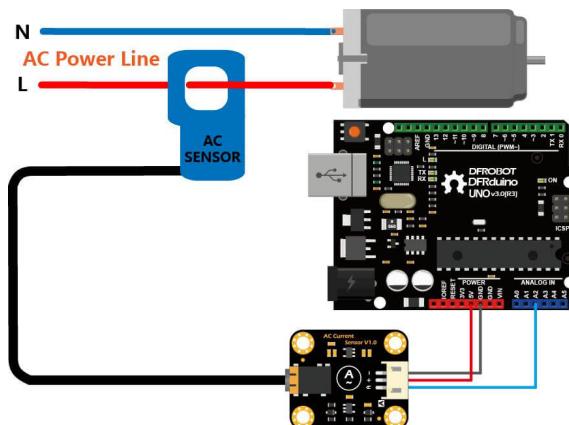


Figura 76: Diagramma di collegamento del sensore

Sensore di vibrazione (Accelerometro)

Ecco una descrizione dettagliata del sensore di accelerazione **AZ Delivery GY-521**, un modulo popolare che integra un accelerometro e un giroscopio per applicazioni di monitoraggio e rilevamento del movimento. Il GY-521 è un modulo basato sul sensore MPU-6050, che combina un accelerometro a 3 assi e un giroscopio a 3 assi in un singolo dispositivo. Questo modulo è ampiamente utilizzato in applicazioni di robotica, droni, stabilizzazione delle fotocamere e dispositivi indossabili. Grazie alla sua interfaccia I2C, è facile da integrare con microcontrollori come Arduino e Raspberry Pi. Il modulo GY-521 può essere facilmente integrato con piattaforme come Arduino utilizzando librerie disponibili, come la libreria MPU6050. Le librerie semplificano l'interazione con il sensore, consentendo la lettura rapida dei dati di accelerazione e giroscopio, nonché l'applicazione di filtri per migliorare la precisione.

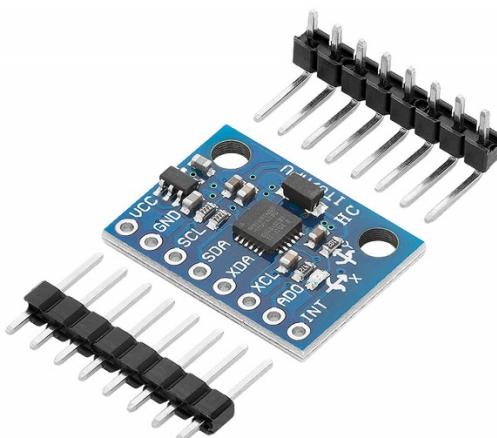


Figura 77: sensore di accelerazione AZ Delivery GY-521

Il AZ Delivery GY-521 è un sensore versatile e potente per la rilevazione del movimento e delle vibrazioni, perfetto per una vasta gamma di applicazioni. La combinazione di accelerometro e giroscopio, unita alla facilità d'uso e all'interfaccia I2C, lo rende una scelta popolare tra hobbisti e professionisti. Con il suo costo contenuto e le sue ottime prestazioni, il GY-521 è una risorsa indispensabile per chiunque lavori su progetti che richiedono il monitoraggio del movimento.

Le specifiche tecniche sono le seguenti:

- Tipo di sensore: Accelerometro e giroscopio a 6 assi
- Uscita: Digitale (I2C)
- Gamma di misurazione dell'accelerometro:
 - $\pm 2 \text{ g}$
 - $\pm 4 \text{ g}$
 - $\pm 8 \text{ g}$
 - $\pm 16 \text{ g}$
- Gamma di misurazione del giroscopio:
 - $\pm 250 \text{ }^{\circ}/\text{s}$
 - $\pm 500 \text{ }^{\circ}/\text{s}$
 - $\pm 1000 \text{ }^{\circ}/\text{s}$
 - $\pm 2000 \text{ }^{\circ}/\text{s}$
- Numero di assi: 6 (3 per accelerometro e 3 per giroscopio)
- Tensione di alimentazione: 3,3 V a 5 V DC

- Consumo energetico: Circa 3,9 mA in modalità attiva
- Interfaccia di comunicazione: I2C (con indirizzo 0x68)
- Dimensioni: 20 mm x 20 mm (modulo)
- Temperatura di funzionamento: Da -40 °C a +85 °C
- Sensibilità:
 - Accelerometro: 16384 LSB/g per ±2 g
 - Giroscopio: 131 LSB/°/s per ±250 °/s
- FIFO Buffer: Il GY-521 include un buffer FIFO che consente di memorizzare i dati per un'elaborazione più efficiente e la riduzione del carico sul microcontrollore.
- Sensore di temperatura integrato: Il modulo può fornire anche dati sulla temperatura, permettendo applicazioni di monitoraggio ambientale.
- Funzioni di filtraggio: È possibile applicare filtri digitali sui dati di accelerazione e giroscopio per ridurre il rumore e migliorare la precisione della misurazione.
- Facile da utilizzare: La scheda include pin di collegamento facili da utilizzare, compatibili con la maggior parte dei microcontrollori.

Le applicazioni tipiche di questi accelerometri sono:

- Droni e modelli di volo: Per la stabilizzazione e il controllo del volo.
- Robotica: Per il monitoraggio del movimento e la navigazione.
- Dispositivi portatili: Come smartphone e smartwatches per la rilevazione dell'orientamento e del movimento.
- Progetti di Internet delle Cose (IoT): Monitoraggio ambientale e automazione.
- Stabilizzazione delle fotocamere: Per correggere le vibrazioni e migliorare la qualità delle immagini.

Sensore di luce ambientale

Questo sensore di luce ambientale analogico Gravity può aiutarti a rilevare la densità della luce e a fornire un segnale di tensione analogico al controller come feedback. Inoltre, hai la possibilità di attivare altri componenti all'interno del tuo progetto impostando soglie di tensione. Questo sensore di luce ambientale è operativo nell'intervallo di tensione da 3,3 a 5 volt ed è compatibile con controller comuni come Arduino , micro:bit , ESP32 , RP2040 e Raspberry Pi . Tuttavia, tieni presente che la scheda Raspberry Pi non ha funzionalità ADC integrata e pertanto richiede un modulo di espansione ADC per leggere i segnali di ingresso del sensore di luce ambientale analogico, come il modulo Gravity: I2C ADS1115 16-Bit ADC o l' IO Expansion HAT per Raspberry Pi 4B/3B+ . Per facilitare l'uso del sensore di luce ambientale, questo prodotto è progettato con un'interfaccia Gravity universale che può essere collegata senza richiedere saldature. Due fori per viti consentono di fissarlo in qualsiasi posizione desiderata. Quando utilizzato in combinazione con uno shield di estensione Gravity IO , semplifica ulteriormente il processo di cablaggio, rendendo i cavi DuPont disordinati e le connessioni complesse un ricordo del passato e consentendoti di concentrare le tue energie sui tuoi progetti creativi.

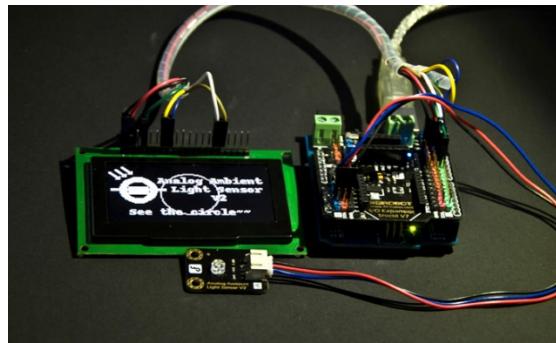


Figura 78: sensore di luce ambientale

Le specifiche tecniche sono le seguenti:

- Tensione di alimentazione: da 3,3 V a 5 V, compatibile con Arduino / ESP32 / micro:bit / Raspberry Pi
- Gamma di illuminazione: da 1 Lux a 6000 Lux
- Tempo di risposta: 15us
- Interfaccia: Analogica
- Supporta piattaforme di programmazione grafica come Mind+ e MakeCode
- Dimensioni: 22x30mm (0.87"x1.18")

9.2. Selezione della Sensoristica per Qualità dell'ambiente di lavoro per la salvaguardia della salute operatori

Sensore di NH₃.

Il sensore di rilevamento del gas ammoniaca NH₃ MEMS impiega la tecnologia di sistema micro elettromeccanico (MEMS) all'avanguardia, dotando il sensore di dimensioni compatte (13x13x2,5 mm), basso consumo energetico (<20 mA), generazione di calore minima, breve tempo di preriscaldamento e rapido recupero della risposta. Il sensore può misurare qualitativamente la concentrazione di ammoniaca, che è adatta per perdite di ammoniaca in celle frigorifere, controllo del rischio in acquacoltura, monitoraggio degli odori dei servizi igienici e altri scenari applicativi.

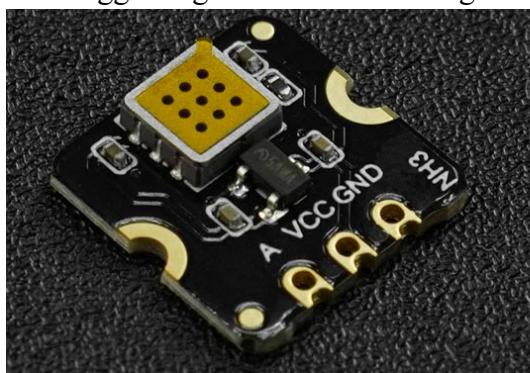


Figura 79: sensore di ammoniaca

La serie MEMS comprende attualmente 11 diversi tipi di sensori di gas (HCHO, CO, CH4 , VOC , NH3 , H2S , EtOH , fumo , odore , H2 , NO2), che possono essere combinati secondo requisiti

specifici. Nota bene: questo sensore è in grado di effettuare solo misurazioni qualitative. Per misurazioni quantitative, si prega di considerare l'acquisto del sensore Gravity: NH3 (calibrato).

Le specifiche del dispositivo sono le seguenti:

- Gas rilevato: ammoniaca (NH3)
- Intervallo di rilevamento: 1-300 ppm
- Voltaggio operativo: 3,3-5 V
- Corrente di funzionamento: <20mA
- Segnale di uscita: tensione analogica
- Sensibilità: $R_0(\text{in aria}) / R_s (\text{in 50ppm NH3}) \geq 3$
- Temperatura di esercizio: -10-50°C
- Umidità operativa: 15-90% RH (senza condensa)
- Durata della vita: ≥5 anni (in aria)
- Dimensioni: 13×13 x 2,5 mm/0,051×0,51x0,1"

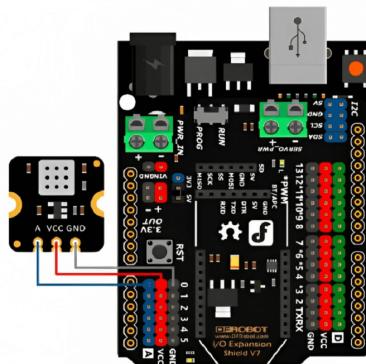


Figura 80: Schema elettrico di Fermion: sensore MEMS NH3 e Arduino UNO

Sensore di gas VOC

Il sensore di gas VOC per composti organici volatili MEMS impiega la tecnologia MEMS (microelectromechanical system) all'avanguardia, dotando il sensore di dimensioni compatte (13x13x2,5 mm), basso consumo energetico (<20 mA), minima generazione di calore, breve tempo di preriscaldamento e rapido recupero della risposta. Il sensore può misurare qualitativamente la concentrazione di gas VOC ed è adatto per il rilevamento della qualità dell'aria interna, sistema di aria fresca, purificatore d'aria e altri scenari applicativi.

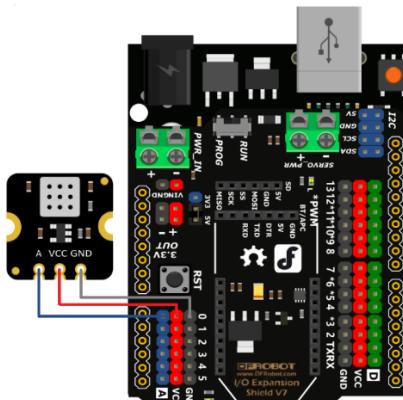


Figura 81: Schema elettrico per il sensore VOC

Le caratteristiche sono le seguenti:

- Dimensioni compatte, misura solo 13*13*2,5 mm

- Basso consumo energetico, corrente di esercizio <20mA
- Elevata sensibilità e recupero rapido della risposta
- Tecnologia MEMS avanzata

Le applicazioni sono molteplici, ad esempio:

- Monitoraggio ambientale: identificare le fonti e i livelli di benzene nell'aria ambiente
- Qualità dell'aria interna: misura la concentrazione di formaldeide nell'aria interna
- Sicurezza industriale: rilevare eventuali perdite o fuoriuscite di tetracloroetilene
- Rilevazione incendi: rileva i primi segnali di incendio e fumo rilevando i cambiamenti nella composizione e nella concentrazione dei COV nell'aria.
- Applicazioni sanitarie: misura la quantità di acetone nel respiro e fornisce feedback o indicazioni per la gestione del diabete.

Le specifiche tecniche sono:

- Gas rilevati: etanolo, formaldeide, toluene, ecc.
- Campo di rilevamento: 1-500 ppm
- Tensione di funzionamento: 3,3-5 V
- Corrente di funzionamento: <20mA
- Segnale di uscita: tensione analogica
- Sensibilità: $R_0(\text{in aria}) / R_s(\text{in 150ppm etanolo}) \geq 3$
- Temperatura di esercizio: -10-50°C
- Umidità di esercizio: 15-90%RH (senza condensa)
- Durata: ≥ 5 anni (in aria)
- Dimensioni: 13×13 x 2,5 mm/0,051×0,51x0,1"

Sensore di biossido di azoto

Il sensore di rilevamento del gas di biossido di azoto MEMS NO₂ impiega la tecnologia di sistema microelettromeccanico (MEMS) all'avanguardia, dotando il sensore di dimensioni compatte (13x13x2,5 mm), basso consumo energetico (<20 mA), minima generazione di calore, breve tempo di preriscaldamento e rapido recupero della risposta. Il sensore può misurare qualitativamente la concentrazione di gas di biossido di azoto ed è adatto per rilevatori di biossido di azoto, rilevamento di gas di scarico di automobili e altri scenari applicativi.

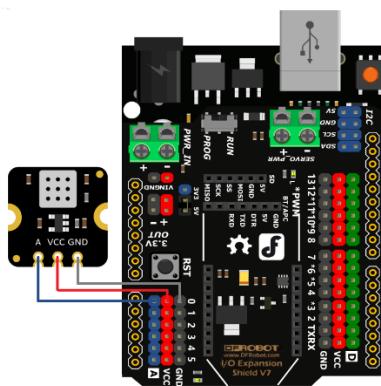


Figura 82: Schema elettrico del sensore NO₂ MEMS Fermion e Arduino UNO

Le caratteristiche principali sono le seguenti:

- Dimensioni compatte, misura solo 13*13*2,5 mm
- Basso consumo energetico, corrente di esercizio <20mA

- Elevata sensibilità e recupero rapido della risposta
- Tecnologia MEMS avanzata

Le applicazioni sono:

- Monitoraggio della qualità dell'aria: misura il livello di NO₂ e di altri inquinanti nell'aria ambiente.
- Controllo delle emissioni automobilistiche: monitora le emissioni di NO₂ dei veicoli e regola i parametri di iniezione del carburante e di combustione per ridurre le emissioni.
- Sicurezza industriale: rileva la perdita o l'esposizione di NO₂ e altri gas tossici nei processi industriali o nei luoghi di lavoro.

Le specifiche tecniche sono:

- Gas rilevato: NO₂
- Campo di rilevamento: 0,1-10 ppm
- Tensione di funzionamento: 3,3-5 V
- Corrente di funzionamento: <20mA
- Segnale di uscita: tensione analogica
- Sensibilità: R₀(in aria) /R_s (in 5ppm NO₂) ≥ 0,5
- Temperatura di esercizio: -10-50°C
- Umidità di esercizio: 15-90%RH (senza condensa)
- Durata: ≥5 anni (in aria)
- Dimensioni: 13×13 x 2,5 mm/0,0,51×0,51x0,1"

Sensore di ossigeno

Questo è un sensore che rileva la concentrazione di ossigeno/O₂ e supporta tre modalità di output: analogica, I2C e UART. La sonda è stata calibrata in fabbrica, il che può misurare rapidamente e accuratamente la concentrazione di ossigeno/O₂ nell'ambiente. Può essere ampiamente applicato a campi come dispositivi portatili, dispositivi di monitoraggio della qualità dell'aria, industrie, miniere, magazzini e altri spazi in cui l'aria non è facile da far circolare.

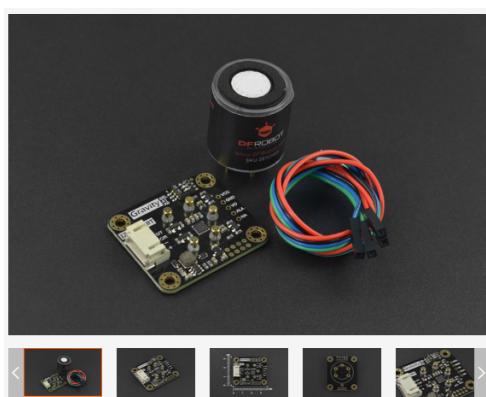


Figura 83: sensore di ossigeno

La sonda adotta il principio elettrochimico, ha le caratteristiche di forte capacità anti-interferenza, elevata stabilità, elevata sensibilità, ecc. e la durata di servizio è lunga fino a due anni. Il sensore ha 32 indirizzi I2C modificabili, un algoritmo di compensazione della temperatura integrato e una funzione di allarme di soglia, ha una buona compatibilità con i principali dispositivi di controllo principali come Arduino, ESP32 e Raspberry Pi. L'interfaccia Gravity di facile utilizzo, abbinata al nostro codice di esempio, può creare rapidamente un rilevatore di concentrazione di ossigeno / O₂.

Guida alla selezione del sensore di ossigeno/O2 I2C			
Prodotto	Gravità: sensore di ossigeno/O2 I2C	Gravità: sensore di ossigeno/O2 (calibrato) - I2C e UART	Gravità: sensore elettrochimico di ossigeno/O2, (0-100%Vol) - I2C
Codice Prodotto	SEN0322	SEN0465	SEN0496
Rilevamento Allineare	0~25%Vol	0~25%Vol	0~100%Vol
Calibrazione Metodo	Calibrazione manuale	Calibrazione di fabbrica	Calibrazione manuale
Segnale di uscita Lavorando Principio	I2C Elettrochimico	I2C, UART, analogico Elettrochimico	I2C Elettrochimico
Stabilità	<2%/mese	<2%/mese	<10%/anno
Tempo di risposta	≤15S	≤15S	0,1%~20,9%<40S 20,9%~100%<5S
Operativo Campo di pressione	101 kPa±10%	101 kPa±10%	0,5 - 2,0 bar
Temperatura Compensazione	×	√	×

Le caratteristiche del sensore sono le seguenti

- Forte capacità anti-interferenza
- Alta stabilità
- Alta sensibilità

Le applicazioni di uso del sensore sono:

- Dispositivo di monitoraggio della qualità dell'aria
- Rilevamento dell'aria mineraria
- Protezione ambientale
- Agricoltura intelligente

Le specifiche tecniche del modulo sensore sono:

- Gas di rilevamento: ossigeno (O2)
- Campo di rilevamento: 0~25%Vol
- Tensione di lavoro: 3,3~5,5 V CC
- Corrente di lavoro: <5mA
- Segnale di uscita: I2C, UART (0~3V), tensione analogica
- Temperatura di lavoro: -20~50°C
- Umidità di lavoro: 15~90%RH (senza condensa)
- Temperatura di conservazione: -20~50°C
- Umidità di stoccaggio: 15~90%RH (senza condensa)
- Durata della vita: >2 anni (in aria)
- Dimensioni piastra adattatrice: 37*32mm
- Compatibilità: Arduino, ESP32, Raspberry pi

Sensore di ozono

Questo è un sensore che rileva la concentrazione di ozono e supporta tre modalità di output: analogica, I2C e UART. La sonda è stata calibrata in fabbrica, il che può misurare rapidamente e accuratamente la concentrazione di ozono nell'ambiente. Può essere ampiamente utilizzato nei campi di protezione industriale e ambientale per il rilevamento dell'ozono.

In basso una immagine del sensore.



Figura 84: sensore di ozono

La sonda adotta il principio elettrochimico, ha le caratteristiche di forte capacità anti-interferenza, elevata stabilità, elevata sensibilità, ecc. e la durata è lunga fino a due anni. Il sensore ha 32 indirizzi I2C modificabili, un algoritmo di compensazione della temperatura integrato e una funzione di allarme di soglia, ha una buona compatibilità con i principali dispositivi di controllo principali come Arduino , ESP32 e Raspberry Pi . L'interfaccia Gravity di facile utilizzo , abbinata al nostro codice di esempio, può creare rapidamente un rilevatore di concentrazione di ozono.

Le specifiche tecniche sono le seguenti:

- Gas di rilevamento: ozono (O₃)
- Campo di rilevamento: 0~10ppm
- Tensione di lavoro: 3,3~5,5 V CC
- Corrente di lavoro: <5mA
- Segnale di uscita: I2C, UART (0~3V), tensione analogica
- Temperatura di lavoro: -20~50°C
- Umidità di lavoro: 15~90%RH (senza condensa)
- Temperatura di conservazione: -20~50°C
- Umidità di stoccaggio: 15~90%RH (senza condensa)
- Durata della vita: >2 anni (in aria)
- Dimensioni piastra adattatrice: 37*32mm
- Compatibilità: Arduino, ESP32, Raspberry pi

Sensore di metano

Il sensore Fermion: MEMS Methane CH₄ Gas Detection Sensor è un dispositivo avanzato progettato per rilevare il gas metano (CH₄) nell'aria, con un intervallo di misurazione che va da 1 a 10.000 ppm (parti per milione). È basato sulla tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), che permette di ottenere sensori di dimensioni ridotte, ad alta precisione e a basso consumo energetico, rendendolo ideale per applicazioni in ambienti industriali, agricoli e domestici.



Figura 85: sensore di metano CH4

Le sue caratteristiche principali sono:

1. Tecnologia MEMS: Grazie alla micro-fabbricazione MEMS, il sensore è estremamente compatto, preciso e adatto a dispositivi portatili o sistemi a basso consumo energetico. Questa tecnologia consente la rilevazione accurata del gas metano, anche a basse concentrazioni.
2. Campo di rilevamento: Il sensore ha una sensibilità che copre un intervallo di concentrazioni di metano da 1 ppm fino a 10.000 ppm, permettendo di monitorare sia concentrazioni molto basse che livelli pericolosi di gas nell'ambiente.
3. Principio di funzionamento:
 - Il sensore si basa su una struttura sensibile composta da uno strato di ossido di metallo. Quando il gas metano entra in contatto con la superficie del sensore, avviene una reazione chimica che provoca una variazione della resistenza elettrica del materiale sensibile.
 - Questo cambiamento di resistenza è proporzionale alla concentrazione di gas presente nell'ambiente, che viene quindi convertita in un segnale elettrico misurabile.
4. Basso consumo energetico: Essendo un dispositivo MEMS, il sensore consuma pochissima energia, rendendolo adatto per applicazioni a lungo termine in dispositivi alimentati a batteria o in sistemi IoT.
5. Interfaccia Breakout: Il modulo è fornito con un'interfaccia Breakout, che lo rende facile da integrare con microcontrollori come Arduino, Raspberry Pi o altre piattaforme di sviluppo. Ciò lo rende ideale per progetti di monitoraggio in tempo reale o automazione di sistemi di rilevazione di gas.
6. Applicazioni:
 - Sicurezza domestica: Monitoraggio della presenza di gas metano nelle abitazioni per prevenire incendi o esplosioni.
 - Industria: Controllo delle perdite di metano in impianti di estrazione e distribuzione del gas.
 - Ambiente: Rilevamento delle emissioni di metano in aree agricole o discariche, dove il metano è un sottoprodotto comune.

Le specifiche sono le seguenti:

- Gas detected: CH4, C3H8, etc

- Detection range: 1-10000ppm (C3H8)
- Operating voltage: 5V
- Operating current: <20mA
- Output signal: Analog voltage
- Sensitivity: $R_0(\text{in air})/R_s(\text{in 5000ppm CH}_4) \geq 2$
- Operating temperature: -10-50°C
- Operating humidity: 15-90%RH (non-condensing)
- Lifespan: ≥5 years (in air)
- Dimension : 13×13 x 2.5mm/0.51×0.51x0.1"

I vantaggi di questo sensore sono:

- Alta sensibilità: Rileva anche concentrazioni molto basse di metano, aumentando la sicurezza nelle applicazioni in cui è necessario un monitoraggio continuo.
- Compatto e leggero: Grazie alla tecnologia MEMS, è adatto per dispositivi portatili e sistemi embedded.
- Facile integrazione: La breakout board facilita il collegamento e l'uso del sensore con vari microcontrollori e piattaforme di sviluppo.

Il sensore è ottimizzato per il rilevamento del metano e potrebbe non essere altrettanto efficace per altri gas combustibili o per rilevare miscugli complessi di gas. In sintesi, il sensore Fermion: MEMS Methane CH4 Gas Detection Sensor è un dispositivo compatto e preciso, ideale per il monitoraggio sicuro e affidabile del metano in una varietà di applicazioni. La sua alta sensibilità e facile integrazione lo rendono un'opzione eccellente per progetti di rilevamento di gas basati su sistemi IoT e dispositivi a basso consumo.

Sensore di monossido di carbonio

Questo è un sensore che rileva il monossido di carbonio e supporta tre modalità di output: analogica, I2C e UART. La sonda è stata calibrata in fabbrica, il che può misurare rapidamente e accuratamente la concentrazione di monossido di carbonio nell'ambiente. Può essere ampiamente applicato a campi come dispositivi portatili, dispositivi di monitoraggio della qualità dell'aria, industrie, miniere, magazzini e altri spazi in cui l'aria non è facile da far circolare.

La sonda adotta il principio elettrochimico, ha le caratteristiche di forte capacità anti-interferenza, elevata stabilità, elevata sensibilità, ecc. e la durata di servizio è lunga fino a due anni. Il sensore ha 32 indirizzi I2C modificabili, un algoritmo di compensazione della temperatura integrato e una funzione di allarme di soglia, ha una buona compatibilità con i principali dispositivi di controllo principali come Arduino , ESP32 e Raspberry Pi . L'interfaccia Gravity di facile utilizzo, abbinata al nostro codice di esempio, può costruire rapidamente un rilevatore di monossido di carbonio.



Figura 86: sensore di monossido di carbonio

Di seguito sono elencate le specifiche tecniche:

- Gas di rilevamento: monossido di carbonio (CO)
- Campo di rilevamento: 0-1000 ppm
- Tensione di lavoro: 3,3~5,5 V CC
- Corrente di lavoro: <5mA
- Segnale di uscita: I2C, UART (0~3V), tensione analogica
- Temperatura di lavoro: -20~50°C
- Umidità di lavoro: 15~90%RH (senza condensa)
- Temperatura di conservazione: -20~50°C
- Umidità di stoccaggio: 15~90%RH (senza condensa)
- Durata della vita: >2 anni (in aria)
- Dimensioni piastra adattatrice: 37*32mm
- Compatibilità: Arduino, ESP32, Raspberry pi

Sensore di qualità dell'aria PM2,5

DFRobot offre questo sensore della qualità dell'aria in grado di misurare particolato come PM2.5, PM1.0, PM10.

Con l'interfaccia Gravity facile da usare, il sensore della qualità dell'aria funziona bene con la maggior parte dei controller principali. E ti fornisce codici campione pertinenti per creare rapidamente progetti di monitoraggio della qualità dell'aria.

Basato sul principio della diffusione laser, il sensore della qualità dell'aria PM2.5 impiega un sensore di particelle universale digitale in grado di raccogliere e calcolare continuamente il numero di particelle sospese di diverse dimensioni nell'aria per unità di volume, ovvero la distribuzione della concentrazione delle particelle, e quindi convertirlo in concentrazione e output tramite interfaccia I2C. Il sensore può essere integrato in vari strumenti e misuratori o apparecchiature di miglioramento ambientale correlate alla concentrazione di particolato sospeso nell'aria per fornire dati tempestivi e precisi sulla concentrazione.

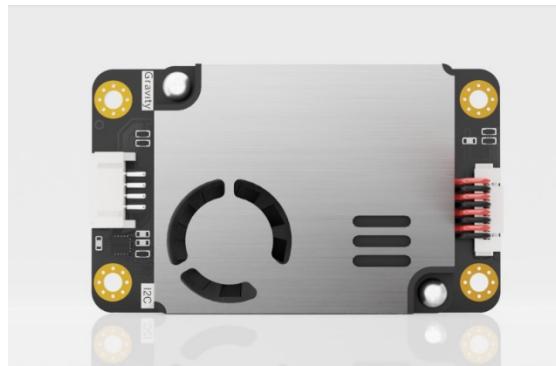


Figura 87: sensore di qualità dell'aria

Questo sensore adotta il principio dello scattering laser, ovvero fa sì che il laser irradia le particelle sospese nell'aria per produrre scattering e, allo stesso tempo, raccoglie la luce diffusa a un certo angolo e ottiene la curva dell'intensità della luce diffusa nel tempo. Inoltre, il microprocessore, basato sull'algoritmo della teoria MIE, ottiene la dimensione equivalente delle particelle e il numero di particelle di diverse dimensioni delle particelle per unità di volume.

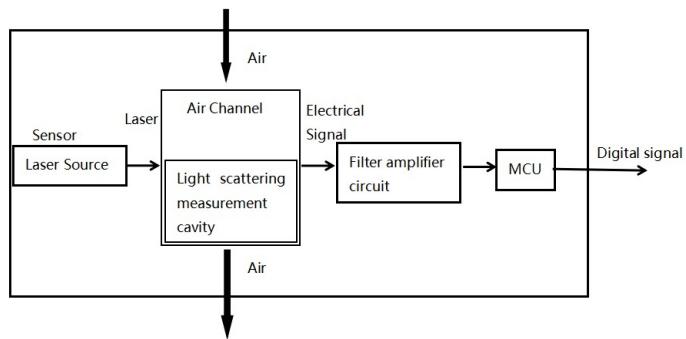


Figura 88: schematic del funzionamento del sensore di qualità dell'aria

Le caratteristiche del documento sono le seguenti:

- Principio di diffusione laser, misurazione accurata
- Tasso di falsi allarmi pari a zero
- Risposta in tempo reale e supporto all'acquisizione continua
- Dimensione minima delle particelle riconoscibili $0,3\mu\text{m}$
- Schermatura completa a sei lati, anti-interferenza più forte
- Design ultra sottile, solo 12 mm, adatto per dispositivi portatili

Di seguito le specifiche tecniche del dispositivo:

- Tensione di lavoro: $3,3 \text{ V} \sim 5 \text{ V}$
- Corrente massima di lavoro: 100 mA
- Corrente di standby: $\leq 2\text{mA}$
- Livello interfaccia dati: $L < 0,8 \text{ V}$, $H > 2,7 \text{ V}$, livello di tensione massimo $3,3 \text{ V}$
- Intervallo di misurazione delle particelle: $0,3 \sim 1,0 \mu\text{m}$; $1,0 \sim 2,5 \mu\text{m}$; $2,5 \sim 10 \mu\text{m}$
- Efficienza di conteggio delle particelle: 50% a $0,3\mu\text{m}$ 98% a $\geq 0,5\mu\text{m}$
- Intervallo effettivo di concentrazione di massa delle particelle (valore standard PM2.5): $0 \sim 500\text{ug/m}^3$
- Intervallo massimo di concentrazione di massa delle particelle (valore standard PM2.5): $\geq 1000\text{ug/m}^3$
- Risoluzione della concentrazione di massa delle particelle: 1ug/m^3

- Consistenza della concentrazione di massa delle particelle (valore standard PM2.5): 1. $\pm 10\%$ @ $100 \sim 500 \text{ ug/m}^3$; 2. $\pm 10 \text{ ug/m}^3$ @ $0 \sim 100 \text{ ug/m}^3$
- Volume standard: 0,1 L
- Tempo di risposta singola: $< 1\text{s}$
- Tempo di risposta completo: $\leq 10\text{s}$
- Intervallo di temperatura di lavoro: $-10 \sim +60^\circ\text{C}$
- Intervallo di umidità di lavoro: $0 \sim 95\%$ (senza condensa)
- Tempo medio tra guasti: ≥ 5 anni
- Dimensioni del prodotto: $67 \text{ mm} * 40 \text{ mm} * 14 \text{ mm} / 2,64 * 1,57 * 0,55$ pollici

Sensore CO₂

La CO₂ è un fattore chiave per la qualità dell'aria indoor, poiché livelli elevati compromettono le prestazioni cognitive e il benessere umano. Questo sensore SCD41 CO₂ si basa sul sensore CO₂ in miniatura SCD41 di Sensirion. SCD41 si basa sul principio di rilevamento fotoacustico NDIR e sulla tecnologia brevettata PAsens® e CMOSens® di Sensirion per offrire un'elevata accuratezza a un prezzo ineguagliabile e al fattore di forma più piccolo. La compensazione del segnale on-chip è realizzata con il sensore di temperatura e umidità integrato, mentre sono disponibili anche uscite dati di temperatura e umidità. Il sensore SCD41 rileva la quantità di energia assorbita dalle molecole di CO₂. Quando si pulsa l'emettitore a infrarossi, le molecole di CO₂ assorbono periodicamente la luce infrarossa. Ciò provoca un'ulteriore vibrazione molecolare che determina un'onda di pressione all'interno della camera di misurazione. Maggiore è la concentrazione di CO₂, maggiore è la luce assorbita e quindi maggiore diventa l'ampiezza di questa onda acustica. Un microfono all'interno della camera a gas misura questo, da cui è possibile calcolare la concentrazione di CO₂.

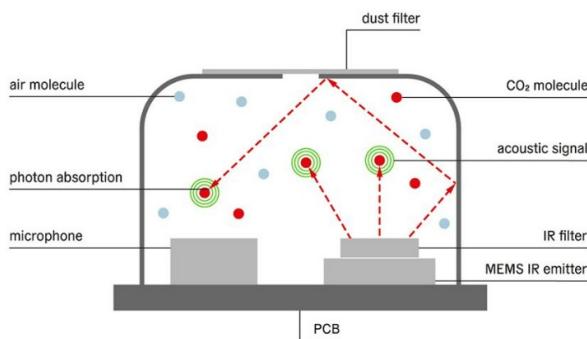


Figura 89: Funzionamento

La tabella in basso riporta le specifiche tecniche del sensore:

Tabella 16: Specifiche tecniche del sensore

Guida alla selezione del sensore di CO2 a gravità				
nome del prodotto	Gravità: sensore di CO2 elettrochimico analogico	Gravità: sensore CO2 IR analogico	Gravità: sensore CO2 UART IR	Gravità: sensore di CO2 a infrarossi I2C SCD41 (400 - 5000 ppm)
Codice Prodotto	SEN0159	SEN0219	SEN0220	SEN0536
Tensione di funzionamento	3,7 ~ 5V	4,5 ~ 5,5 V	4,5 ~ 5,5 V	3,3 V-5 V
Produzione	Gravità: Analogica (Analogico 2,7 ~ 4,1V) + Uscita digitale intestazione 3P (allarme): livello 0 ~ VCC	Gravità: Analogica (Uscita analogica 0,4 ~ 2V)	Gravità: UART (livello 0 ~ 3,3 V)	Gravità: I2C
Principio di misurazione	Elettrochimica (Princípio della batteria ad elettrolita solido)	NDIR (infrarosso non dispersivo)	NDIR (infrarosso non dispersivo)	fotoacustico NDIR
Campo di misura	0 ~ 10000 ppm	0 ~ 5000 ppm	0 ~ 50000 ppm	400 ~ 5000 ppm
Precisione	±100 ppm a 400 ppm	±(100 ppm + 6% lettura)	±(100 ppm + 6% lettura)	±(40 ppm + 5% V.M.)
Risposta Tempo	<20 anni	<anni '90	<30 anni	Anni '60
Media Energia	<1Settembre	<430mW@5V	<430mW@5V	<30mW@5V
Temperatura di funzionamento	-20°C ~ 50°C	0°C ~ 50°C	0°C ~ 50°C	-10°C ~ 60°C
Umidità di funzionamento	0 ~ 95% RH (senza condensa)	0 ~ 95% RH (senza condensa)	0 ~ 95% RH (senza condensa)	0 ~ 95% RH (senza condensa)
Durata	>1 anno	>5 anni	>5 anni	>10 anni
Dimensione (PCB)	32*42 millimetri	37*69 millimetri	21*27,1 millimetri	32*27*8mm

Sensore di Fiamma

Questo sensore di fiamma Arduino può essere utilizzato per rilevare incendi o altre lunghezze d'onda a 760 nm ~ 1100 nm di luce. Nel gioco del robot antincendio, la fiamma svolge un ruolo importante nella sonda, che può essere utilizzata come occhi del robot per trovare la fonte del fuoco o il pallone da calcio. Può utilizzare robot antincendio, robot da calcio.

Il sensore di fiamma ha un angolo di sonda di 60 gradi e sono previsti due fori di montaggio M3 per l'installazione su diverse piattaforme.

La temperatura di funzionamento di questo sensore di fiamma Arduino è compresa tra -25 e 85 gradi Celsius; durante la combustione, è opportuno tenere presente che la distanza della sonda dalla fiamma non deve essere troppo ravvicinata per evitare danni.

Questo sensore utilizza l'interfaccia Gravity e funziona da 3,3 V a 5 V, risultando compatibile con diverse piattaforme quali Arduino , Raspberry Pi, Intel Galileo, Curie e Joule .

Le specifiche tecniche sono le seguenti:

- Tensione di alimentazione: da 3,3 V a 5 V
- Campo di rilevamento: 20 cm (4,8 V) ~ 100 cm (1 V)

- Gamma di larghezza di banda spettrale: da 760 nm a 1100 nm
- Tempo di risposta: 15us
- Interfaccia: Analogica
- Dimensioni: 22x30mm (0,87x1,18 pollici)

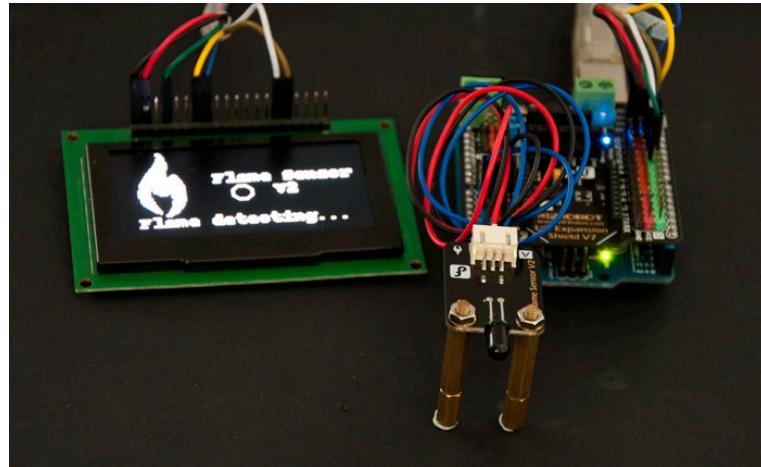


Figura 90: sensore di fiamma (1)

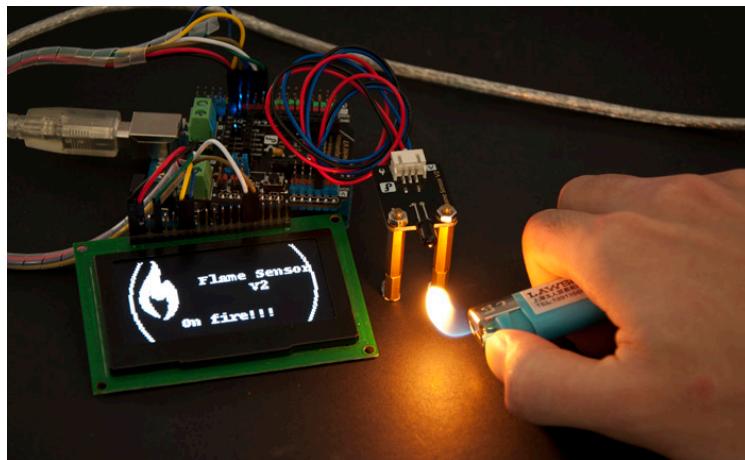


Figura 91: sensore di fiamma (2)

Sensore di qualità dell'aria

SEN5x è una famiglia di moduli sensore unica che combina la misurazione dei parametri critici della qualità dell'aria (particolato, COV, NOx, umidità e temperatura) in un unico pacchetto. I moduli sono il risultato della vasta esperienza di Sensirion nel rilevamento ambientale e offrono le migliori prestazioni possibili per ciascuno di essi, una durata superiore e un fattore di forma compatto. I sensori SEN5x forniscono uscite completamente calibrate con un'interfaccia digitale. La combinazione di tutti i parametri di misurazione in un unico dispositivo consente ai produttori di dispositivi per la qualità dell'aria di ridurre gli sforzi di progettazione e integrazione, abbreviare i tempi di sviluppo e semplificare la catena di fornitura. Gli algoritmi proprietari consentono un'integrazione diretta nelle applicazioni HVAC e di qualità dell'aria consentendo un risparmio di risorse/tempo e concentrandosi sulle competenze chiave.

Il motore Sensirion Temperature Acceleration Routine (STAR) implementato accelera la risposta del dispositivo al cambiamento della temperatura ambiente di un fattore 2-3 per fornire misurazioni più accurate agli utenti finali.

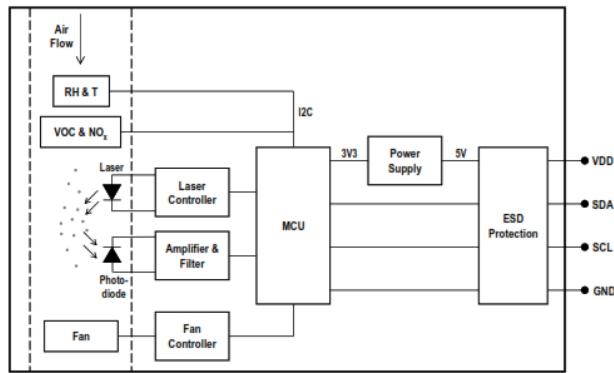


Figura 92: diagramma a blocchi del sensore

In basso una immagine esemplificativa di un sensore della qualità dell'aria della Sensirion.

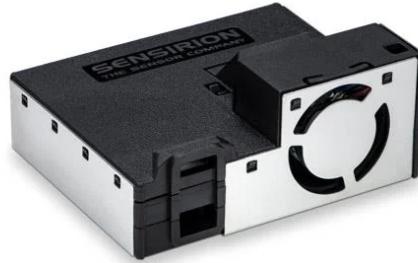


Figura 93: sensore della qualità dell'aria Sensirion

In basso sono riportate le dimensioni del suddetto dispositivo.

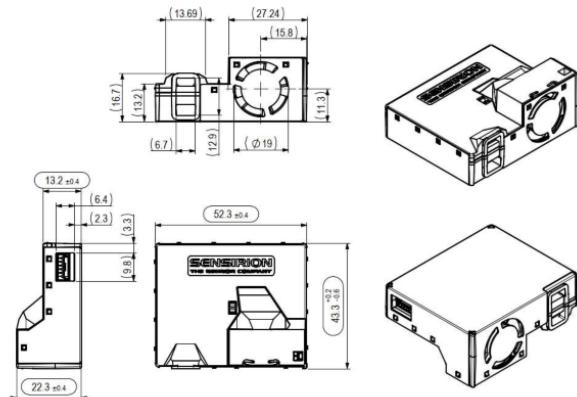


Figura 94: dimensioni del sensore

La tabella in basso riporta le caratteristiche tecniche:

Tabella 17: caratteristiche tecniche del sensore della qualità dell'aria della Sensirion

Attributo del prodotto	Valore dell'attributo
Produttore:	Sensirion
Categoria prodotto:	Sensori della qualità dell'aria
RoHS::	 Dettagli
Tipo:	Particle Sensor
Tipo di sensore:	Air Quality
Temperatura di lavoro massima:	+ 50 C
Temperatura di lavoro minima:	- 10 C
Tensione di alimentazione di lavoro:	5 V
Marchio:	Sensirion
Corrente nominale:	100 mA
Stile di montaggio:	Panel Mount
Confezione:	Tray
Tipo di prodotto:	Air Quality Sensors
Serie:	SEN5x
Quantità colli di fabbrica:	270
Sottocategoria:	Sensors
Tensione di alimentazione - Max.:	5.5 V
Tensione di alimentazione - Min.:	4.5 V

Si riportano in basso le specifiche del sensore relative alle misure di temperatura, umidità e concentrazione di gas.

Tabella 18: specifiche del sensore per la misura di temperatura ed umidità

Parameter	Conditions	Value ^a	Units
Compensated outputs ^b	-	Temperature and Relative Humidity	°C %RH
Typical accuracy temperature	@ 15-30 °C, 50 %RH	±0.45	°C
Max. accuracy temperature	@ 15-30 °C, 50 %RH	±0.7	°C
Repeatability temperature	@ 25 °C, 50 %RH	0.1	°C
Response time temperature ^a	@ 25 °C, 50 %RH, τ 63%	< 60	s
Typical accuracy relative humidity	@ 25 °C, 30-70 %RH	±4.5	%RH
Max. accuracy relative humidity	@ 25 °C, 30-70 %RH	±6	%RH
Repeatability relative humidity	@ 25 °C, 50 %RH	±1	%RH
Response time relative humidity ¹⁰	@ 25 °C, 50 %RH, τ 63%	< 20	s

Tabella 19: Specifiche del sensore per la misura di determinate concentrazioni di gas

Parameter	Comments	Values			Units
		Min.	Typ. ¹¹	Max.	
Output signals	VOC Index	1	–	500	VOC Index points
	NO _x Index	1	–	500	NO _x Index points
Device-to-device variation	VOC Index ¹²	–	<±15 – <±15	–	VOC Index points or % VOC Index m.v. (the larger)
	NO _x Index ¹²	–	<±50 – <±50	–	NO _x Index points or % NO _x Index m.v. (the larger)
Repeatability	VOC Index ¹²	–	<±5 – <±5	–	VOC Index points or % VOC Index m.v. (the larger)
	NO _x Index ¹²	–	<±10 – <±10	–	NO _x Index points or % NO _x Index m.v. (the larger)
Response time	Changing concentration from 5 to 10 ppm of ethanol, at sampling interval of 1 s	τ_{d3} – τ_{90}	– – –	<10 – <30	s – s
Switch-on behavior	Time until reliably detecting events ¹³	–	–	<60	s
	Time until specifications in this table are met	VOC Index NO _x Index	<1 –	–	h h

7. Conclusioni

Il documento ha riportato i risultati dell'attività A3.1, che ha riguardato lo studio e l'identificazione dei componenti hardware (sensori e circuiti di condizionamento) e del firmware all'interno del WP3, intitolato "Studio, progettazione ed implementazione dei componenti hardware e firmware del prototipo IoT" nel progetto "Smart Work Platform". L'obiettivo generale del progetto è stato quello di sviluppare una soluzione integrata per trasformare gli impianti industriali tradizionali in impianti basati su Industria 4.0. Si è previsto di creare un dispositivo IoT dotato di una piattaforma di monitoraggio e virtualizzazione per migliorare l'efficienza energetica, la manutenzione predittiva e la sicurezza nei luoghi di lavoro.

Nel documento sono stati trattati vari argomenti, tra cui lo scenario applicativo, lo stato dell'arte dei sensori per l'efficienza energetica e la qualità dell'aria, e le panoramiche commerciali su diverse categorie di sensori (gas, temperatura, vibrazione, ecc.). Inoltre sono stati selezionati sensori per monitorare vari parametri legati all'efficienza energetica (corrente, vibrazioni) e alla qualità dell'ambiente di lavoro (temperatura, umidità, gas vari tra cui CO₂, CH₄, VOC, ecc.).

L'attività è stata completata con successo, senza anomalie o criticità.

8. Bibliografia

- [1] «www.eea.europa.eu,» [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/environmentalmonitoring>.
- [2] «www.who.int,» [Online]. Available: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1.
- [3] L. Philip J. D. Peterson, «Practical Use of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors for Measuring Nitrogen Dioxide and Ozone in Urban Environments,» *Sensors*, vol. 17, 2017.
- [4] R. Bogue, «Detecting gases with light: a review of optical gas sensor technologies,» *Sensor Review*, pp. Vol. 35 No. 2, pp. 133-140, 16 March 2015.
- [5] R. K. Jha, «Non-Dispersive Infrared Gas Sensing Technology: A Review,» *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 20, n. 1, pp. 6-15, 2022.
- [6] J. H. a. R. P. Tatam, «Optical gas sensing: a review,» *Measurement Science and Technology*, vol. 24, n. 1, 28 Novembre 2012.
- [7] «www.chimica-online.it,» [Online]. Available: <https://www.chimica-online.it/fisica/piroelettricità.htm>.
- [8] «it.wikipedia.org,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_fotovoltaico.
- [9] [Online]. Available: http://www-9.unipv.it/lde/didattica_elettronica/Fotodiodo.pdf.
- [10] M.. Zainab Yunusa, «Gas Sensors: A Review,» *Sensors and Transducers*, pp. 6175, 2014.
- [11] [Online]. Available: <https://pdf4pro.com/amp/view/chapter-3-catalytic-combustible-gassensors-4c1be.html>.
- [12] R. Henderson. [Online]. Available: <http://enviromed.ca/files/QA/CombustSensPerform.pdf>.
- [13] S. G. F. I. Adam Hulanicki, «Chemical sensors: Definitions and classification,» *Pure Appl. Chem.*, vol. 63, n. 9, pp. 1247-1250, 1991.
- [14] B. Baranwal, «Electrochemical Sensors and Their Applications: A Review,» *Chemosensors*, vol. 10, n. 9, p. 363, 2022.
- [15] «Wikipedia,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Cella_elettrochimica.
- [16] M. R. Pawel Pasierb, «Solid-state Potentiometric Gas Sensors—Current Status and Future Trends,» *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2009.
- [17] R. D. M. M. e. a. Razie Hanafi, «Electrochemical sensor for environmental monitoring system:A review,» in *AIP Conference Proceedings* 2169, 2019.
- [18] P. Sennequier, «Signal conditioning for electrochemical sensors,» [Online]. Available: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4348-signal-conditioning-for-electrochemical-sensors-stmicroelectronics.pdf.
- [19] J. S. Ronan Baron, «Amperometric Gas Sensors as a Low Cost Emerging Technology Monitoring Applications: A Review,» *ACS Sens.*, vol. 2, n. 11, pp. 1553-1566, 2017.
- [20] M. S. S. T. Emilio Sardini, «Printed Electrochemical Biosensors: Opportunities and Metrological Challenges».
- [21] A. Nitin Kumar Sharma, «Impedimetric Sensors: Principles, Applications and Recent Trends,» *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* , vol. 8, n. 10, pp. 2278-3075, 2019.
- [22] [Online]. Available: <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/>.
- [23] [Online]. Available: <https://sites.unimi.it/ECEA/0910Impedenza.pdf>.
- [24] A. P. P. Jonathan M. Rheaume, «A review of recent progress in sensing of gas concentration by impedance change,» *Ionics*, vol. 17, pp. 99-108, 2011.

- [25] «A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives,» *Sensors*, 2020.
- [26] L. Lattanzio. [Online]. Available: <https://sensirion.com/products/product-insights/specialistarticles/particulate-matter-sensing-for-air-quality-measurements/>.
- [27] J. C. Simone Simões Amaral, «An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments,» *Atmosphere*, pp. 1327-1345, 2015.
- [28] J.Kirschner.[Online]Available:
<http://www.jaredkirschner.com/uploads/9/6/1/0/9610588/saws.pdf>.
- [29] S. Gurpreet Singh, «Development of a highly sensitive and portable particulate matter SAW sensor and interface electronics,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 343, 2022.
- [30] J. Homola, M. Piliarik, Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensors. In *Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors*, Springer Berlin Heidelberg (2006) 45-67.
- [31] Y. Liu, X. Zhang, Microfluidics-Based Plasmonic Biosensing System Based on Patterned Plasmonic Nanostructure Arrays., *Micromachines*(2021), 12, 826.
- [32] D.R. Shankaran, K.V. Gobi, N. Miura, Recent advancements in surface plasmon resonance immunosensors for detection of small molecules of biomedical, food and environmental interest, *Sens. Actuators B* 121 (2007) 158–177
- [33] F.S. Ligler, Perspective on optical biosensors and integrated sensor systems, *Anal. Chem.* 81 (2009) 519–526.
- [34] R.H. Ritchie, Plasma losses by fast electrons in thin films, *Phys. Rev.* 106 (1957) 874–881.
- [35] M.A. Ordal, L.L. Long, R.J. Bell, S.E. Bell, R.R. Bell, R.W. Alexander, J. Ward, C.A. Ward, Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared, *Appl. Opt.* 11 (1983) 1099–1119
- [36] R. Ince, R. Narayanaswamy, Analysis of the performance of interferometry, surface plasmon resonance and luminescence as biosensors and chemosensors, *Anal. Chim. Acta* 569 (2006) 1–20.
- [37] K.M. Mayer, J.H. Hafner, Localized Surface Plasmon Resonance Sensors, *Chem. Rev.* (2011), 111, 3282-3857.
- [38] Y. Hong, Y. M. Huh, D.S. Yoon, J. Nanobiosensors Based on Localized Surface Plasmon Resonance for Biomarker Detection, *Journal of Nanomaterials* (2013), 1-12.
- [39] S. M. Kim, H. J. Kim, H. J. Jung, J. Y. Park, T. J. Seok, Y. H. Choa, T.J. Park, S.W. Lee, HighPerformance, Transparent Thin Film Hydrogen Gas Sensor Using 2D Electron Gas at Interface of Oxide Thin Film Heterostructure Grown by Atomic Layer Deposition., *Adv. Funct. Mat.* (2019), 29, 18
- [40] https://italy.representation.ec.europa.eu/notizie-ed-eventi/notizie/la-commissione-sostiene-lalleanza-europea-lidrogeno-pulito-ridurre-la-dipendenza-dellue-dal-gas-2022-06-16_it
- [41] E. Della Gaspera, A. Antonello, M. Guglielmi, M. L. Post, V. Bello, G. Mattei, F. Romanato, A. Martucci, A Colloidal Approach to Au-Loaded TiO₂ Thin Films with Optimized Optical Sensing Properties, *J. Mater. Chem.* (2011), 21, 4293.
- [42] E. Della Gaspera, M. Bersani, G. Mattei, T. L. Nguyen, P. Mulvaney, A. Martucci, A Cooperative Effect of Au and Pt Inside TiO₂ Matrix for Optical Hydrogen Detection at Room Temperature Using Surface Plasmon Spectroscopy, *Nanoscale* (2012), 4, 5972.
- [43] T. J. Seok, Y. Liu, J. H. Choi, H. J. Kim, D. H. Kim, S. M. Kim, J. H. Jang, D. J. Cho, S. W. Lee, T. J. Park, In Situ Observation of Two-Dimensional Electron Gas Creation at the Interface of an Atomic Layer-Deposited Al₂O₃/TiO₂ Thin-Film Heterostructure, *Chem. Mater.* 2020, 32, 7662–7669.

