



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un sistema di monitoraggio e controllo remoto nelle fasi di maturazione del compost: il Compost Talker™

A. Vannini e M.P. Aleandri

SVILUPPO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO REMOTO NELLE FASI DI MATURAZIONE DEL COMPOST: IL COMPOST TALKER™

Andrea Vannini e MariaPia Aleandri – DIBAF Università degli Studi della Tuscia

Novembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.6 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano

Obiettivo:

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione ENEA – Univ.degi Studi della Tuscia, DIBAF “Sviluppo di un sistema di monitoraggio e controllo remoto nelle fasi di maturazione del compost: il Compost Talker™ “

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Pier Giorgio Landolfo

Responsabile scientifico DIBAF: Prof. Andrea Vannini

Indice

INDICE	3
SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	12
2.1 ASSEMBLAGGIO DEL PROTOTIPO DI COMPOST TALKER™ DEFINITIVO	12
2.2 ACQUISIZIONE E GESTIONE DEL DATO.....	18
2.3 VALUTAZIONE DELLA FUNZIONALITÀ IN CUMULO E INDIVIDUAZIONE DELLE SOGLIE DI MATURAZIONE	19
2.4 POTENZIALITÀ DI ESTRAZIONE DI CALORE DAI CUMULI DURANTE I PROCESSI DI COMPOSTAGGIO	27
3 CONCLUSIONI.....	28
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	28
5 CV DEI PARTECIPANTI	32
6 ALLEGATI	33

Sommario

Il presente progetto ha realizzato un sistema multisensore (Compost Talker™) gestibile in ambiente IoT per il monitoraggio dei parametri del processo di compostaggio di cumuli di matrici organiche di diversa origine, specificatamente rilevando in continuo i valori di CO₂, CH₄, O₂ e la temperatura dei cumuli. Il progetto ha anche dimostrato l'efficacia del Compost Talker™ di individuare le diverse fasi del processo (fase termica, fase di stabilizzazione/maturazione), rilevando anche fattori critici quali sacche di respirazione anaerobica.

Dal punto di vista tecnologico, il Compost Talker™ si è dimostrato gestibile in una rete IoT, permettendo la lettura in tempo reale dei valori rilevati.

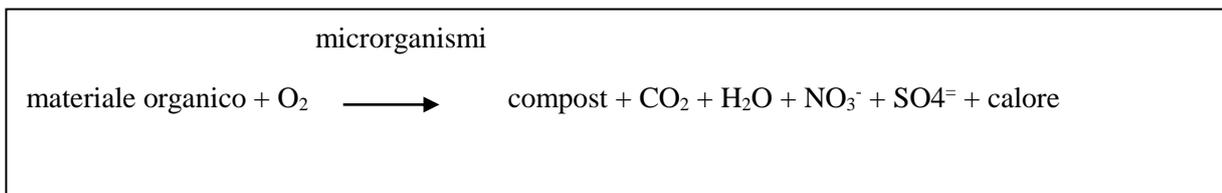
Il Compost Talker™, per le sue peculiari componentistiche elettroniche e sensoristiche, è un sistema a basso costo e quindi facilmente utilizzabile in reti di gestione, offrendo informazioni essenziali per i gestori di piccoli, medi e grandi impianti di compostaggio

Un ulteriore risultato del progetto, sviluppato per ora a livello teorico, riguarda la potenzialità di recupero di energia dai cumuli in fase termica e dell'uso della stessa come energia termica.

1 Introduzione

Il processo di compostaggio è il risultato di un processo di bio-stabilizzazione aerobica di matrici fermentescibili, il processo si compie ad opera di diversi tipi di microrganismi aerobi quali batteri, funghi, attinomiceti, lieviti, alghe e protozoi che sono normalmente presenti nella biomassa iniziale o che vengono artificialmente apportati attraverso un inoculo specifico.

Il processo di compostaggio può essere descritto attraverso la seguente relazione:



Il termine compost deriva dal latino *compositum* (= formato da più materiali), proprio perché tra i prodotti della reazione microbica sono presenti substrati organici di diversa origine dalla cui degradazione è possibile ottenere un prodotto finito stabile dal punto di vista fisico, chimico e microbiologico, di colore bruno e con le caratteristiche di un ammendante (Vallini, 1995). In condizioni aerobiche ottimali, il processo di compostaggio si svolge attraverso tre stadi principali:

- fase mesofila o di latenza (0-7 giorni): la matrice iniziale viene invasa dai microrganismi, il cui metabolismo causa il progressivo riscaldamento del substrato (50 °C). In questa fase, la decomposizione del substrato è dovuta all'intervento di specie microbiche mesofile che utilizzano rapidamente i composti solubili (zuccheri) e facilmente degradabili (Chen and Inbar, 1993; Tilston et al., 2002).

- fase termofila o di stabilizzazione (7-27 giorni): la liberazione di energia sotto forma di calore caratterizza questa fase del processo di compostaggio che per questo viene definita termofila, comportando un'elevata richiesta di ossigeno da parte dei microrganismi che entrano in gioco per la degradazione della sostanza organica, con formazione di composti intermedi come acidi grassi volatili a catena corta (acido acetico, propionico e butirrico), tossici per le piante ma rapidamente metabolizzati alle popolazioni microbiche. In questa fase la temperatura raggiunge valori molto elevati, anche superiori ai 60 °C (Tilston et al., 2002), e si ha l'igienizzazione del substrato attraverso l'inattivazione di semi di piante infestanti e organismi patogeni. Le sostanze prontamente degradabili, come zuccheri, acidi grassi e proteine vengono rapidamente consumate (De Bertoldi et al., 1983; Chen and Inbar, 1993; Hoitink and Boehm, 1999; Hoitink and Grebus, 1994). Il prodotto che si ottiene al termine di questa fase è il compost fresco, un materiale igienizzato e sufficientemente stabilizzato grazie all'azione dei batteri aerobi.

- fase di maturazione (27-365 giorni): con la scomparsa dei composti più facilmente biodegradabili, le trasformazioni metaboliche di decomposizione interessano le molecole organiche più complesse e si attuano con processi più lenti, anche a seguito della morte di una buona parte della popolazione microbica dovuta a carenza di nutrimento e alle alte temperature raggiunte nella fase precedente. Con la riduzione della disponibilità di composti ricchi di energia, la temperatura della matrice in trasformazione diminuisce (circa 40-45°C), consentendo alle popolazioni microbiche mesofile, responsabili dei processi di umificazione, di colonizzare il substrato (De Bertoldi et al., 1983; Tilston et al., 2002). Quindi in questa la fase di maturazione i processi metabolici diminuiscono di intensità e accanto ai batteri sono attivi gruppi microbici costituiti da funghi e attinomiceti che degradano attivamente amido, cellulosa e lignina, composti essenziali dell'humus. In questa fase le temperature si abbassano progressivamente, stabilizzandosi poco al di sopra della temperatura ambiente. Dopo questa fase si ottiene un prodotto costituito da sostanza organica stabilizzata, formata da composti ad alto peso molecolare (Senesi, 1989). In questa terza fase del processo di compostaggio, prende forma una competizione intensa tra i microrganismi, per le sostanze nutritive che sono rimaste, e si sviluppano anche forme di antagonismo attraverso la produzione di antibiotici (Chen and Inbar, 1993).

I microrganismi sono i veri artefici del processo di compostaggio e sono diverse le popolazioni che si alternano nelle diverse fasi del processo. La popolazione di microrganismi che partecipa al processo di compostaggio è

molto complessa, sia in termini di gruppi fisiologici, che di entità tassonomiche nell'ambito dei singoli gruppi. I microrganismi che operano nel processo di compostaggio possono essere classificati in relazione ai regimi di temperatura nei quali svolgono la loro attività metabolica in psicrofilo, mesofilo e termofilo.

Al variare della temperatura di processo, variano le popolazioni microbiche attive: nelle prime fasi, in cui si ha una rapida metabolizzazione dei composti carboniosi più semplici (monosaccaridi, lipidi e peptidi), operano inizialmente i microrganismi psicrofilo e mesofilo. Successivamente, a causa dell'innalzamento della temperatura, conseguente ad una intensa attività metabolica, si ha una forte selezione tra le popolazioni batteriche a vantaggio delle specie termofile, il cui optimum di crescita è intorno 50-60 °C (Corlay Chee et al., 1999; Maynard, 2000; Sharma et al., 2000; Vuorinen and Saharinen, 1999). Oltre i 70- 80 °C si ha la morte della maggior parte dei microrganismi ad eccezione di alcune specie sporogene che riescono a resistere. Tali condizioni portano ad una progressiva diminuzione dell'attività microbica, fino all'arresto della stessa (Lyon et al., 2000; Maynard, 2000). Il raffreddamento che ne consegue porta alla riattivazione dei microrganismi sporigeni a partire da quelli termofili, per passare poi a quelli mesofili e psicrofilo in ordine cronologico (Haug, 1980; Maynard, 2000).

Il compostaggio è un processo di natura prevalentemente microbica, i maggiori raggruppamenti di microrganismi che vi partecipano sono i batteri, i funghi, gli attinomiceti e i lieviti. Il compostaggio è un processo dinamico che si svolge attraverso delle fasi nelle quali variano molti parametri (pH, temperatura, umidità), a questo ne consegue una evoluzione della comunità microbica che, ad ogni fase, vede la prevalenza di uno o di un altro gruppo microbico. In tutte le fasi del processo di compostaggio i batteri sono la componente microbiologica principale, questi partecipano attivamente a tutte le fasi del processo e sono circa 100 volte superiori agli altri gruppi di microrganismi (Haug, 1980; Piontek, 2000). I funghi e gli attinomiceti sono più attivi nella fase conclusiva in cui si assiste ad un aumento della frazione umica. I diversi microrganismi si distribuiscono in modo differente all'interno del cumulo, i batteri si possono ritrovare in tutto il cumulo invece i funghi e gli attinomiceti si trovano più facilmente nello strato superficiale (5-15 cm dalla superficie).

I batteri sono la comunità microbica più numerosa e hanno anche il più ampio spettro di profili nutrizionali e possono essere presenti in più 1000 specie diverse. L'intervallo di pH di crescita ottimale è tra 6.5 e 8, ma sono molto tolleranti e crescono anche fuori da questo range; non tollerano invece condizioni di scarsa umidità. Sono dei rapidi decompositori e riescono ad utilizzare in breve tempo le sostanze facilmente degradabili, quindi si ritrovano soprattutto nella prima fase del processo di compostaggio (fase mesofila). I batteri sono i responsabili della produzione di calore e conseguentemente dell'innalzamento della temperatura e quindi del passaggio dalla fase mesofila a quella termofila. Nella fase termofila solo poche specie sporogene quali, quelle appartenenti al genere *Bacillus* riescono a sopravvivere alle alte temperature. Durante la fase di maturazione, una volta scesa la temperatura, si ripristinano le condizioni per lo sviluppo dei batteri che in questa fase sono anche implicati nella degradazione dei prodotti intermedi del metabolismo fungino. Nel processo di compostaggio i batteri eterotrofi sono i più numerosi, utilizzano come fonte di carbonio quello organico e possono utilizzare anche l'azoto organico, gli autotrofi sono in numero minore e utilizzano come fonte di carbonio quello minerale (anidride carbonica e carbonati) e come fonti di azoto l'ammoniaca, i nitriti i nitrati e l'azoto gassoso.

I funghi che ritroviamo durante il processo di compostaggio, appartenenti alla classe Deuteromyces ma anche Ascomycota e ai Basidiomycota, sono in massima parte dei saprofiti che si sviluppano su materiali organici morti, questi riescono a decomporre sostanze altrimenti resistenti all'attacco dei batteri. Inoltre, i funghi riescono a svilupparsi anche in condizioni di bassa umidità. I funghi sono favoriti rispetto ai batteri da rapporti C/N alti, e riescono a vivere in un range di pH molto ampio (2<pH<9). Le specie fungine che si ritrovano durante il processo di compostaggio sono molte sia nella fase mesofila (*Cladosporium*, *Aureobasidium*, *Aspergillus*, *Coprinus*, *Rhizopus*, *Penicillium*, *Trichotecium*, *Trichoderma*) che in quella termofila (*Thermomyces*, *Pecilomyces*, *Aspergillus*, *Chaetomium*).

Gli attinomiceti sono dei batteri filamentosi (per la presenza di pseudo-ife). Sono microrganismi eterotrofi, utilizzano prevalentemente l'azoto organico e come fonte di carbonio utilizzano quello della sostanza organica; hanno quindi un ruolo fondamentale nella degradazione di molecole complesse quali la lignina, la cellulosa, le emicellulose e la chitina. Gli attinomiceti attaccano la sostanza organica non degradata dai batteri

e dai funghi e intervengono nella fase finale del processo di compostaggio attraverso diverse specie (*Micromonospora*, *Streptomyces*, *Nocardia*). Sono i responsabili del caratteristico "profumo di terra" tipico del compost maturo poiché producono un metabolita secondario volatile la geosmina.

Il compostaggio, è ormai pratica consolidata in tutti i territori dove viene applicata la raccolta differenziata dei rifiuti urbani (e non solo). La matrice organica conta per circa il 30% dei rifiuti totali prodotti. In Italia è stimata una produzione pro-capite di rifiuti intorno ai 500 kg/anno (stima 2014, ISPRA 2016). Quindi ogni cittadino produce annualmente dai 150 ai 200 Kg/anno di rifiuti organici. La frazione organica (umido + verde) in Italia si attesta su 6.1 milioni di tonnellate. Il compostaggio di questa quantità di rifiuti potrebbe produrre annualmente circa 2 milioni di tonnellate di ammendante compostato misto (ACM) (secondo la 75/2010 e successive integrazioni) utilizzabile in agricoltura biologica.

Il problema principale risiede nella capacità di utilizzare il rifiuto organico in impiantistica secondo un contesto di economia circolare, in impianti di differente capacità distribuiti sul territorio e gestiti sia da enti pubblici che da privati. Si parla quindi di grossi impianti con capacità superiore alle 45.000 tonnellate, fino a piccoli impianti di comunità e prossimità con capacità inferiori alle 130 t/anno, e piccolissimi impianti quali quelli domestici. Il Decreto Ministeriale - numero 266 del 29/12/2016 ad esempio indica le procedure semplificate per il compostaggio di comunità di rifiuti organici.

L'utilizzo di una rete di piccoli, medi e anche grandi impianti, pone forte la problematica del monitoraggio del processo di compostaggio e dei parametri utilizzabili per il controllo di qualità. Difatti l'utilizzo di ACM (da solo o in terricci) in agricoltura, verde urbano, produzioni vivaistiche, è possibile solo se il prodotto finale avrà composizione e caratteristiche certe tali da poterlo confrontare con i fertilizzanti di altra natura e garantire l'utilizzatore. Oltre alla parametrizzazione e monitoraggio del processo (temperatura, umidità, respirazione, produzione di metano etc.) è importante individuare con certezza e indipendentemente dalle matrici, il punto di maturazione, raggiunto il quale la componente fitotossica è negligibile e le caratteristiche del prodotto ottimali per il suo uso in agricoltura o giardinaggio (assenza di cattivi odori e fitotossicità). Convenzionalmente la maturazione del compost viene valutata con saggi di fitotossicità su piante 'test' come il crescione, attraverso il tasso di germinazione dei semi. Il metodo è approssimativo e richiede tempo.

Bernal et al. (2009) hanno prodotto una interessante review che tra gli aspetti operativi indica, sulla base della letteratura corrente, i principali criteri utilizzati per la valutazione della qualità di un compost (Tabella1). Tra i criteri chimici alcuni, ad esempio il contenuto in metalli pesanti o la capacità di scambio, non sono direttamente associati alla maturazione ma piuttosto determinati dalla matrice di partenza, mentre altri come ad esempio il rapporto C/N e l'azoto minerale, rappresentano criteri chiave per la valutazione della soglia di maturazione. Molto importanti sono i criteri biologici relativi al consumo di ossigeno e produzione di CO₂, strettamente associati alle fasi di fermentazione aerobica tipica dei processi di compostaggio. Infine, molti di questi parametri nella legislazione nazionale, europea e internazionale devono essere rispettati per permettere la commercializzazione o comunque l'utilizzo del prodotto.

TABELLA 1. Criteri citati in letteratura per la caratterizzazione della qualità del compost

Fisici:	Odore, colore temperatura, dimensione particelle e presenza di materiali inerti	
Chimici:	Analisi carbonio e azoto	Rapporto C/N in estratto solido e acquoso
	Capacità di scambio cationico	CEC, CEC/carbonio organico totale
	Estratto idrosolubile	pH, EC, carbonio organico, ioni
	Azoto minerale	Contenuto NH ₄ -N, rapporto NH ₄ -N/NO ₃ -N
	Inquinanti	Metalli pesanti, sostanze organiche
	Qualità della sostanza organica, umificazione	Composizione sost. organica: lignina, carboidrati complessi, lipidi, zuccheri Indice di umificazione e caratterizzazione delle sostanze simil-umiche: analisi di gruppi elementari e funzionali e distribuzione del peso, molecolare, rapporto E4 / E6, pirolisi GC-MS, analisi spettroscopiche (NMR e FTIR, fluorescenza, ecc.), ecc.
Biologici:	Indicatori dell'attività microbiologica	Respirazione (assorbimento/consumo di O ₂ , produzione di CO ₂ , test di autoriscaldamento, componenti biodegradabili)
		Attività enzimatica(fosfatasi, deidrogenasi, proteasi)
		Contenuto ATP
		Mineralizzazione azoto, nitrificazione
	Biomassa microbica	
Fitotossicità	Test di germinazione ed crescita piante	
Altri	Presenza di semi di piante infestanti e di patogeni, test di ecotossicità	

Sulla base dei criteri in Tabella 1, vari autori hanno individuato indici e metodi per la valutazione del grado di maturazione dei compost (Tabella 2).

TABELLA 2. Indici di maturazione dei compost

<i>Parametri</i>	<i>Valore</i>	<i>Riferimento bibliografico</i>
C/N solubile in acqua	5-6	Chanyasak e Kubota (1981)
Indice di germinazione	>50%	Zucconi <i>et al.</i> (1981)
NH ₄ -N	<0.4 g/kg	Zucconi e de Bertoldi (1987)
C/N	<20, preferibilmente <10	Mathur <i>et al.</i> (1993)
Tasso di produzione di CO ₂	≤120 mg CO ₂ /kg/h	Hue e Liu (1995)
C organico solubile in acqua	≤10g/kg	
C/N solubile in acqua	≤16	
C organico solubile in acqua/N organico totale	≤0.70	
C _{EX}	≤60g/kg	
C _{FA}	≤12.5 g/kg	
C _{EX} /C organico solubile in acqua	≥6.0	
C/N	<12	Bernal <i>et al.</i> (1998)
C organico solubile in acqua	<17g/kg	
C organico solubile in acqua/N organico totale	<0.55	
Rapporto NH ₄ -N/NO ₃ -N	<0.16	
NH ₄ -N	<0.4g/kg	
C mineralizzabile in 70 giorni	<30%	
Rapporto NO ₃ -N/CO ₂ -C (al giorno)	>8	Cooperband <i>et al.</i> (2003)
C organico solubile in acqua	≤4g/kg	Zmora-Nahum <i>et al.</i> (2005)

Come deducibile dagli indici proposti in Tabella 2, la maggior parte degli stessi riguardano la quantità di Carbonio organico solubile, il rapporto C/N, il rapporto ioni ammonio/nitrati. Questi valori sono di solito variabili in funzione della tipologia di compost e delle matrici (frazioni organiche) di origine come si può anche evincere dai valori di riferimento riportati nella legislazione corrente (75/2010 ad esempio). Hue e Liu (1995) ha proposto il tasso di produzione di CO₂ come indice del processo di maturazione indicando la soglia di 120 mg/kg/ora. Il limite di questi metodi è che utilizzano misure puntuali con soglie che a seconda della tipologia di materiale organico in trasformazione, potrebbero subire variazioni importanti.

Per questa ragione la Californian Compost Quality Council (CCQC) ha stabilito una 'pipeline' di analisi in successione per poter valutare al meglio il livello di stabilità e quindi di maturità dei compost. È importante distinguere questi due termini, nonostante spesso vengano usati erroneamente come sinonimi. La stabilità del compost, in generale, riflette il grado di decomposizione della materia organica, in particolare la decomposizione di tutte le sostanze organiche facilmente degradabili, momento dopo il quale l'attività microbica si riduce e si abbassa il livello rispetto alle fasi precedenti. Data questa definizione, la stabilità è riferibile al livello di attività microbica della biomassa e, pertanto, può essere determinata da parametri quali il consumo di ossigeno, il tasso di respirazione o il calore prodotto dal cumulo in quanto risultati dell'attività microbica. La maturità del compost, invece, spesso viene caratterizzata dall'indice di germinazione, che ne misura la fitotossicità; pertanto la maturità diventa il grado di decomposizione della sostanza organica fitotossica prodotta durante le fasi precedenti. Un altro modo per caratterizzare la maturità del compost è il suo livello di nitrificazione, associato al grado di umificazione del compost. In ogni caso il compost si considera maturo quando è stabile.

La Tabella 3 riporta il metodo di valutazione della stabilità e della maturità di un compost messo a punto dal CCQC che contempla una serie di analisi secondo un protocollo molto articolato.

TABELLA 3. Valutazione della maturità secondo l'indice del California Compost Quality Council (CCQC)

C/N ≤25				
Soglia di stabilità (gruppo A)				
Metodo	Unità di misura	Molto stabile	Stabile	Non stabile
Tasso di assorbimento ossigeno	mg O ₂ /g OM/giorno	<3	3-10	>10
Tasso di evoluzione CO ₂	mgCO ₂ -C/ g OM/giorno	<2	2-4	>4
Test di auto-riscaldamento di Dewar	Indice Dewar	V	V	< V
Co ₂ nello spazio di testa (metodo Solvita)	Codice colore	7-8	5-6	1-4
C biologicamente disponibile	mgCO ₂ -C/ g C/giorno	<2	2-4	>4
Soglia di maturazione (gruppo B)				
Metodo	Unità di misura	Molto maturo	Maturo	Non maturo
NH ₄ -N	mg/kg di peso secco	<75	75-500	>500
NH ₄ -N/NO ₃ -N	-	<0.5	0.5-3.0	>3.0
Emergenza plantule	% sul controllo	>90	80-90	<80
Vigoria Plantule	% sul controllo	>95	85-95	<85
Indice di germinazione <i>in vitro</i>	% sul controllo	>90	80-90	<80
Saggio biologico lombrichi	aumento in peso	<20	20-40	>40
NH ₃ (metodo Solvita)	Codice colore	5	4	3-1
Acidi grassi volatili	mmol/g di peso secco	<200	200-1000	>1000

Anche nel protocollo CCQC l'evoluzione della CO₂ è un indice di riferimento importante per la valutazione della stabilità/maturità del compost. Tuttavia, anche in questo caso si tratta di misure puntuali che hanno bisogno di valori di riferimento per poter essere utilizzati come indici. Tuttavia, l'evoluzione della CO₂ è uno dei pochi indici che può essere misurato in continuo, fornendo un 'pattern' evolutivo del gas nel tempo dal quale è più agevole e affidabile valutare la raggiunta stabilità del cumulo.

La ricerca bibliografica ha evidenziato che a tutt'oggi non esistono sistemi di monitoraggio in continuo di CO₂ e CH₄ per cumuli di compost (Ammendante Compostato Misto o Verde secondo la legislazione italiana DL 75/2010). La maggior parte delle sperimentazioni hanno riguardato misure in laboratorio (Darby et al., 2016) (Poulsen, 2011) o misure puntuali sul cumulo ma essenzialmente per il controllo dei parametri di qualità previsti dalla legislazione corrente (DL 75/2010 e successive modifiche).

Il monitoraggio dei parametri che descrivono la qualità e velocità del processo di ossidazione, individuati nel nostro caso nel consumo di CO₂ e produzione di CH₄, non hanno trovato una larga applicazione in modelli operativi anche per il costo elevato dei sensori di monitoraggio dei casi presenti sul mercato (LiCor, Lincoln, Nebraska USA; PPsystems, Amesbury, USA; Thermofisher scientific.). Tuttavia, negli ultimi anni si sono sviluppate nuove tecnologie in campo elettrochimico e nella spettroscopia del vicino infrarosso che hanno permesso la realizzazione e presenza sul mercato di diverse tipologie di sensori a basso costo. Negli ultimi anni sono stati sviluppati sensori di CO₂ costituiti da semiconduttori (Asakawa et al., 2010), elettroliti solidi (Jiao et al., 2002; Chu and Lo, 2008), fibre ottiche (Mandayo et al., 2011), diodi laser (Fine et al., 2010) e rivelatori a infrarossi non dispersivi (NDIR) per monitorare la concentrazione di CO₂ (Wang et al., 2005). Per le misurazioni della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, i sensori NDIR sono ampiamente impiegati poiché

sono stabili e molto robusti contro le interferenze di altri componenti dell'aria, compresi gli inquinanti. Il sensore NDIR ha anche un'eccellente durata e, pertanto, sembra essere il sensore più affidabile per la misurazione di CO₂ atmosferica. L'uscita dei sensori NDIR è influenzata dalla temperatura, dalla pressione atmosferica e dalla durata di utilizzo (Wang et al., 2005). Per migliorare la precisione dei sensori NDIR, è importante correggere le uscite dei sensori per questi fattori. Finora, ci sono stati diversi studi sulla calibrazione di analizzatori NDIR ad alto costo (Sega et al., 2002; Francey and Steele, 2003; Wang et al., 2005). Solo pochi studi nel passato sono concentrati sui metodi di prestazione e calibrazione di piccoli sensori commerciali di CO₂. Tuttavia, recentemente (Yasuda et al., 2012) e (Liu et al., 2017) hanno riportato una serie di esperimenti che hanno dimostrato la crescita negli ultimi anni delle performances dei sensori NDIR, rispetto a quelli elettrochimici. Una analoga considerazione si può trarre dai sensori per il metano rispetto alla disponibilità di sensori commerciali a basso costo. Tuttavia, per ora i più diffusi sono ancora quelli elettrochimici che comunque mostrano buone prestazioni (Sekhar et al., 2016). Per quanto riguarda la trasmissione dati, il crescere esponenziale della sensoristica wireless ha determinato la presenza di nuovi protocolli di trasmissione dati che sono diventati sempre più efficienti. A fianco della classica distribuzione dati in rete WiFi, non adatta alla trasmissione dati a lunga distanza ed in ambienti esterni, si sono imposti sulla scena commerciale le tecnologie radio LoRa, SIGFox e NB-IoT, includendo anche il GPRS come sistema di trasmissione in cloud. Tra tutti i sistemi senza dubbio per le applicazioni outdoor le migliori prestazioni si raggiungono con i protocolli LoRa e SIGFox (Vejlgaard et al., 2017). LoRa si basa sulla modulazione dello spettro spread chirp che seppure a bassa potenza ha una alta efficienza nell'aumentare significativamente il raggio di comunicazione (Lim and Han, 2018). Lo spettro diffuso chirp è stato utilizzato per decenni nella comunicazione militare e spaziale, ma LoRa è la prima implementazione a basso costo per l'uso commerciale. La comunicazione tra dispositivi terminali e gateway è distribuita su diversi canali di frequenza e velocità di trasmissione dati. La selezione della velocità dati è un compromesso tra intervallo di comunicazione e durata del messaggio. A causa della tecnologia a spettro esteso, le comunicazioni con velocità di trasmissione dati diverse non interferiscono tra loro e creano una serie di canali "virtuali" che aumentano la capacità del gateway. Le velocità di trasmissione dati LoRa (su layer LoRaWAN) vanno da 0,3 kbps a 50 kbps. SigFox è una tecnologia a banda stretta (o ultra-narrowband). Utilizza un metodo di trasmissione radio standard chiamato binary phase-shift keying (BPSK), e prende frammenti di spettro molto stretti e modifica la fase dell'onda radio portante per codificare i dati. Ciò consente al ricevitore di ascoltare solo una piccola porzione di spettro attenuando in questo modo l'effetto del rumore. La comunicazione SigFox tende ad essere migliore se viene diretta dall'endpoint alla base. Dispone di funzionalità bidirezionali, ma la sua capacità che va dalla stazione base all'endpoint è limitata. Il protocollo SIGFox non è open access ed il servizio quindi di trasmissione dati è a pagamento con diverse soluzioni dei costi a seconda dei bundles dati. Entrambi gli standard LoRa e SIGFox utilizzano le stesse frequenze radio disponibili senza autorizzazione (in Europa 433 e 868 MHz). La scelta nel nostro caso si è orientata, alla luce dei rapporti costi – benefici e possibilità di intervenire via software per migliorare la topologia delle reti dati, sul protocollo LoRa, anche in riferimento alle considerazioni del lavoro di Vejlgaard et al. (2017).

Alla luce di queste considerazioni, per quanto riguarda la sensoristica, durante il primo anno di progetto sono state prese in considerazione diverse opzioni presenti sia in letteratura che sul web, e, dopo una accurata fase comparativa, sono stati individuati i seguenti sensori: sensore CO₂, MHZ19 o MG811; sensore di metano, MQ4; sensore di temperatura e umidità aria, DHT22 o HDC080; sensore di umidità capacitivo (humisol – non commerciale). Le caratteristiche salienti dei sensori sono riportati in Tabella 4.

TABELLA 4. Caratteristiche tecniche salienti dei sensori utilizzati

Sensore	Variabile	range	Alimentazione	Interfaccia
MHZ19	CO2	300-5000 ppm	5V	PWRM/Serial
MG811	CO2	300-10000 ppm	6V	Analog
MQ4	CH4	300-10000 ppm	6V	Analog
DHT22	T, Umidità relativa	-40 \approx +125 \pm 0.5 °C 0 – 100 % \pm 2-5%	3.3 – 5V	Digital
humisol	Umidità suolo (%vol)	10-50% \pm 5%	-	Digital

Sono state assemblate diverse versioni del sistema ottimizzando la scelta dei singoli sensori la sistema di trasmissione dei dati. Le diverse versioni sono state testate in successione in un cumulo di compost in ambiente confinato e la qualità e trasmissione del dato valutata (rif. Relazione primo anno di attività).

Le attività del secondo anno di progetto hanno riguardato:

1. *Assemblaggio del prototipo definitivo*
2. *Acquisizione e gestione del dato*
3. *Valutazione della funzionalità in cumulo e individuazione delle soglie di maturazione*
4. *Potenzialità di estrazione di calore da sistemi di compostaggio*

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 *Assemblaggio del prototipo di Compost Talker™ definitivo*

Rispetto al modello precedente sono state approntati nuovi miglioramenti alla sensoristica ed alla architettura del microprocessore. È stato disegnato un nuovo circuito elettronico e realizzato un PCB al fine di una produzione industriale. Lo schema a blocchi del sistema è presentato in Figura 1. L'aria è inviata alla cella di misura con una pompa (alimentazione 3.3 V) e può essere selezionata con una elettrovalvola (alimentazione 4 V) proveniente dall'ambiente esterno o dal compost. La cella di misura contiene i sensori per i gas. Un microprocessore ATMEGA328 è utilizzato per l'acquisizione dei dati dei sensori e per l'azionamento dei meccanismi di accensione/spegnimento e di controllo dell'elettrovalvola.

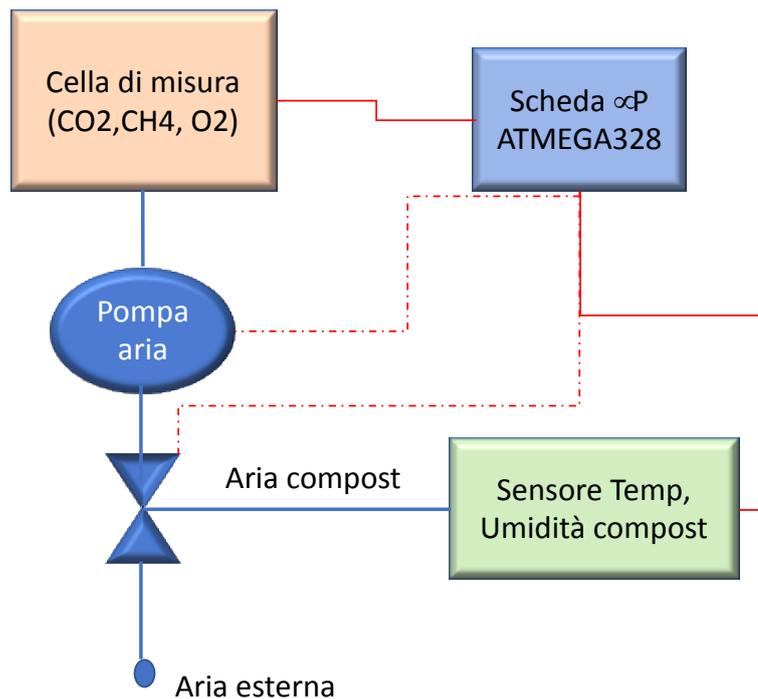


Figura 1. Circuito elettronico del nuovo microprocessore Compost Talker™. Le linee continue in rosso sono i segnali analogici o digitali dei sensori, mentre le linee tratteggiate sono i segnali di controllo.

In seguito a numerose prove di laboratorio su diversi sensori commerciali (cfr. relazione primo anno) si è proceduto alla scelta definitiva degli stessi e quindi alla realizzazione di 4 prototipi definitivi. Si è inoltre aggiunto il sensore per ossigeno (O₂) che va a completare la gamma dei gas di monitoraggio. L'ossigeno che viene consumato nei processi respiratori microbici è un utile indicatore dell'evoluzione del materiale organico e quindi si è ritenuto di doverlo aggiungere nel prototipo finale.

Nella cella sono disposti tre sensori per la misura dei gas CO₂, CH₄ e O₂ e le loro caratteristiche salienti sono riportati in Tabella 4.

TABELLA 5. Caratteristiche tecniche salienti dei sensori utilizzati

Modello	Tipo sensore	Range	Precisione	Alimentazione
MHZ-16	Sensore CO ₂ - Ottico	0-50000 ppm	± 50 ppm	+ 5V
Click (MQ4)	Sensore CH ₄ - elettrochimico	2-10000 ppm	Non disponibile Sensitività: circa 3mV/ppm	+ 5V
Winsense O ₂ sensor	Sensore O ₂ - elettrochimico	0-21%	Non disponibile Sensitività: circa 95 mV/1%	+ 5V o + 3.3V
Si7006	Temperatura e umidità aria	-50 +100 °C 0-100 % UR	± 0.1°C ± 3%	+3.3 V
NTC	Temperatura compost	-50 + 100	± 0.1°C	+3.3V (passivo)

Soiltalker Nature4.0	-	Sensore umidità	0-100 %	± 5%	+3.3 V
----------------------	---	-----------------	---------	------	--------

Il sensore della CO2 è stato migliorato utilizzando un sensore ottico all'infrarosso MHZ-16 con range 0-50000 ppm ed uscita seriale ed alimentazione a 5V (Figura 2).



Figura 2. Sensore ottico all'infrarosso MHZ-16 con range 0-50000 ppm ed uscita seriale ed alimentazione a 5V

Questo sensore ha mostrato alta stabilità e facilità di calibrazione via software, rispetto ad altri sensori elettrochimici (es. MHZ-19), ma anche una migliore performance rispetto ad altri sensori ottici di minore qualità (es MHZ-14). L'uscita è seriale a 9600 BAUD. I sensori di CO2 e CH4 sono stati testati in condizione di transiente, per verificare il loro tempo di risposta ai fini del dimensionamento della cella di misura e del flusso di aria di immissione. I risultati mostrano nel caso di CO2 un tempo di risposta per il raggiungimento del 90% del valore finale di circa 83 secondi (Figura 3).

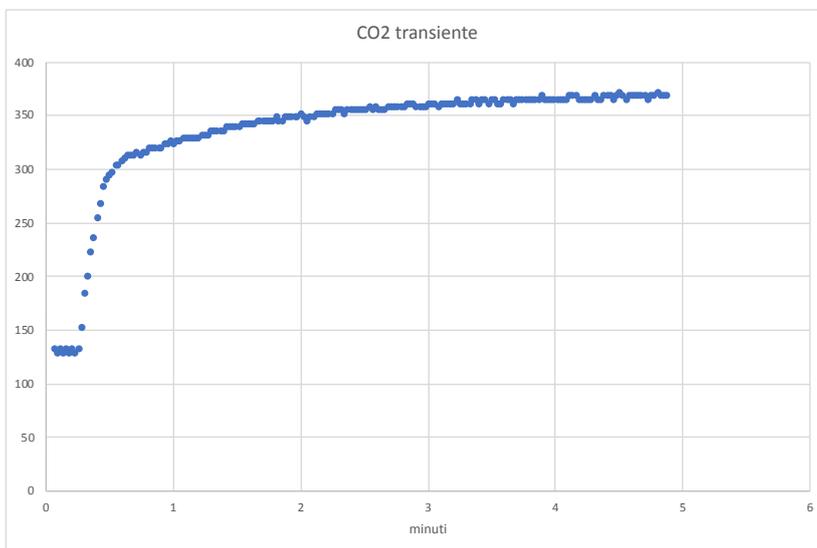


Figura 3. Tempi di risposta del sensore di CO2 per il raggiungimento del 90% del valore finale (in questo caso da 400 a 2000 ppm, le unità sull'asse Y sono in mV)

Il sensore di metano è costituito da un sensore elettrochimico con range di misura da concentrazione ambiente a 10000 ppm (Figura 4).

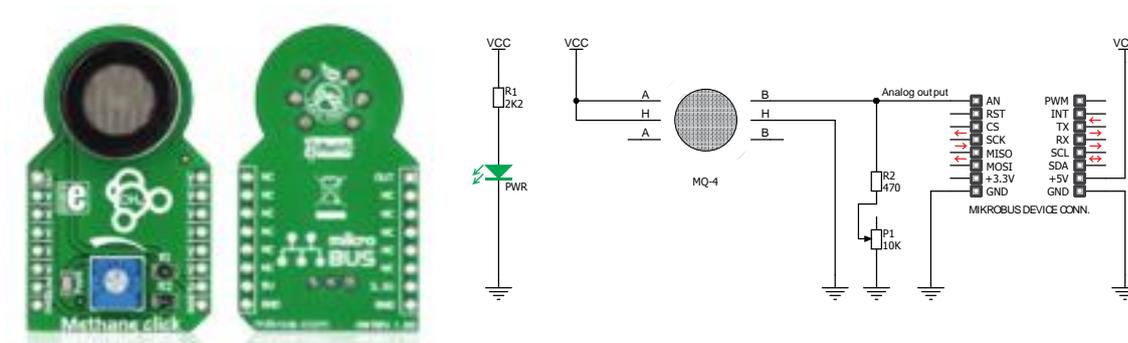


Figura 4. Immagine e schema del sensore elettrochimico di misura del metano

Il sensore può essere alimentato a 3.3 o 5V e possiede una resistenza variabile per la calibrazione. Di seguito il comportamento della resistenza elettrica del sensore in funzione della concentrazione di metano (Figura 5).

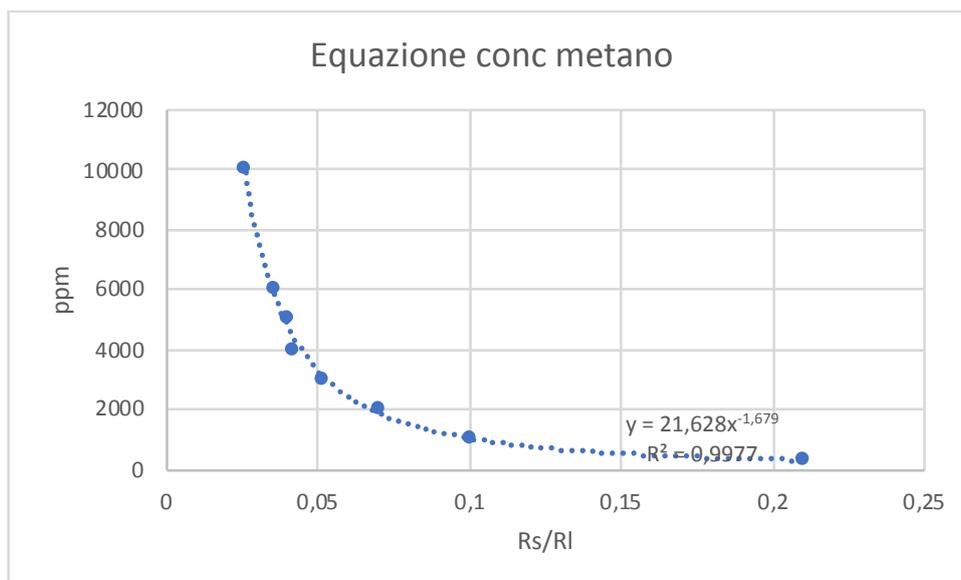


Figura 5. Andamento della resistenza elettrica del sensore in funzione della concentrazione di metano

Nel caso del metano con un transiente da 2 a 1000 ppm, il tempo di risposta è di circa 16 secondi (Figura 6). Da questo punto di vista i sensori selezionati mostrano una sufficiente rapidità di risposta ai fini del dimensionamento della cella e per la durata dell'acquisizione del segnale che dovrà essere la più breve possibile ai fini del contenimento dei consumi della batteria.

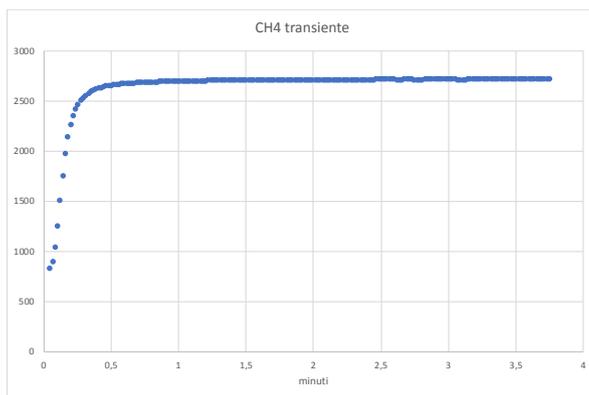


Figura 6. Tempi di risposta del sensore di CH4 per il raggiungimento del 90% del valore finale

Il sensore di ossigeno è di tipo elettrochimico ed ha un campo di misura da 0 a 21% ovvero fino alle concentrazioni atmosferiche standard con una uscita analogica proporzionale alla concentrazione. L'equazione di riferimento per il calcolo della concentrazione è:

$$O_2 = \frac{V_{out} * 100 * 0.21}{2}$$

L'alimentazione è a 5V (Figura 7).



Figura 7. Sensore elettrochimico per la misura di O2

I tre sensori, CO2, CH4 e O2, sono disposti all'interno di una cella delle dimensioni di 45x110x45 mm corrispondenti ad un volume pari a circa 222 cm³ (0.22 l), a cui si deve aggiungere il volume del tubo di immissione dell'aria pari a circa 25 cm³ (0,025 l). L'aria viene immessa nella cella di misura con un flusso pari a 0,2 l/min. Il ciclo di misura prevede 5 minuti di flush della cella con aria esterna a concentrazione atmosferica, in cui viene effettuata via software la calibrazione dei sensori e 5 minuti di misura. Il tempo scelto di 5 minuti è più che sufficiente per il completo rinnovamento dell'aria nella cella, ogni ciclo di misura l'aria della cella viene rinnovata circa 5 volte. Nello stesso tempo i 10 minuti complessivi di tempo di funzionamento delle pompe e dell'elettrovalvola (solo per 5 minuti nel ciclo di immissione aria compost) permettono di ridurre i consumi delle batterie.

Oltre ai sensori di gas, il sistema Compost Talker™ prevede anche la misura della temperatura del compost mediante una sonda NTC (mod NCP18XH103F03RB , beta = 3308), la misura dell'umidità del compost in volume, mediante un sensore capacitivo con un oscillatore in frequenza ed uno speciale PCB disegnato per questo scopo e la temperatura e umidità dell'aria.

La curva di calibrazione del sensore di umidità in un transiente di umidità tra 0 e 100% è presentata in Figura 8. In Figura 9 è mostrata la cella di misura.

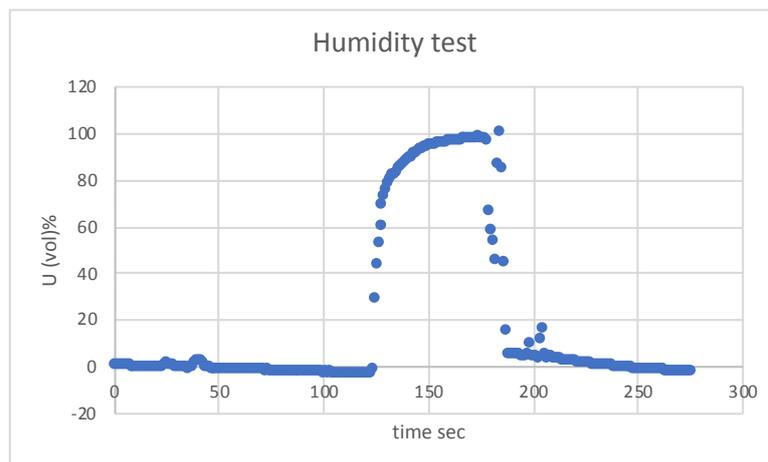


Figura 8. Transiente di umidità dal 0 al 100% e risposta del sensore capacitivo

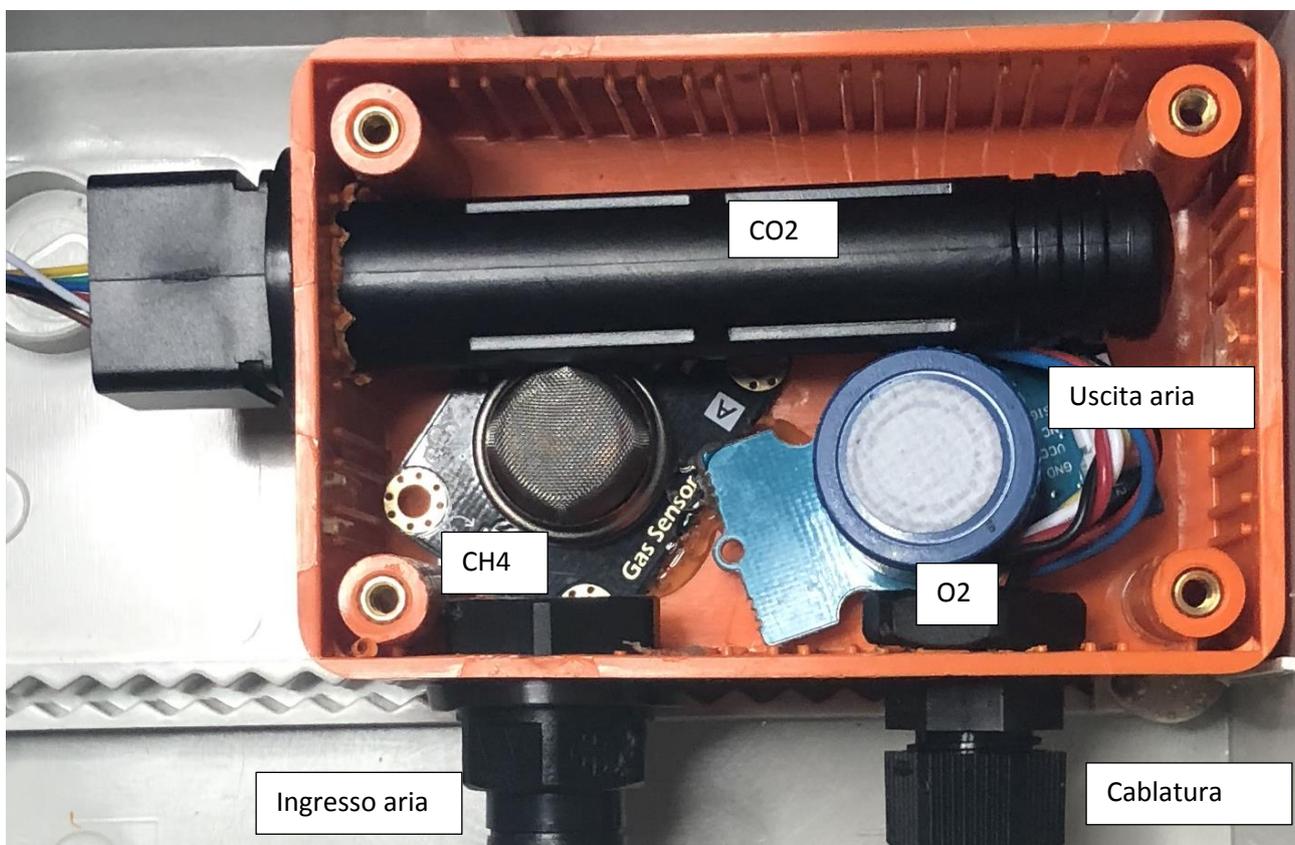


Figura 9. Particolare della cella di misura con i sensori di CO2, CH4 e O2.

2.2 Acquisizione e gestione del dato

Per la gestione dei dati ci si è orientati su un micro-controller ATMEGA328; per l'invio e ricezione dati si è scelto il Transceiver SEMTECH SX1262 a 868 MHz e il GSM modem SIM900 per trasmissione dati su server. Il sistema è poi corredato di un flash memory card (8Mbit) per la memorizzazione e di un pacco batterie ricaricabili (4x Li-Ion da 3300 mA/hr). Di seguito nella Figura 10, il PCB Layout del prototipo.

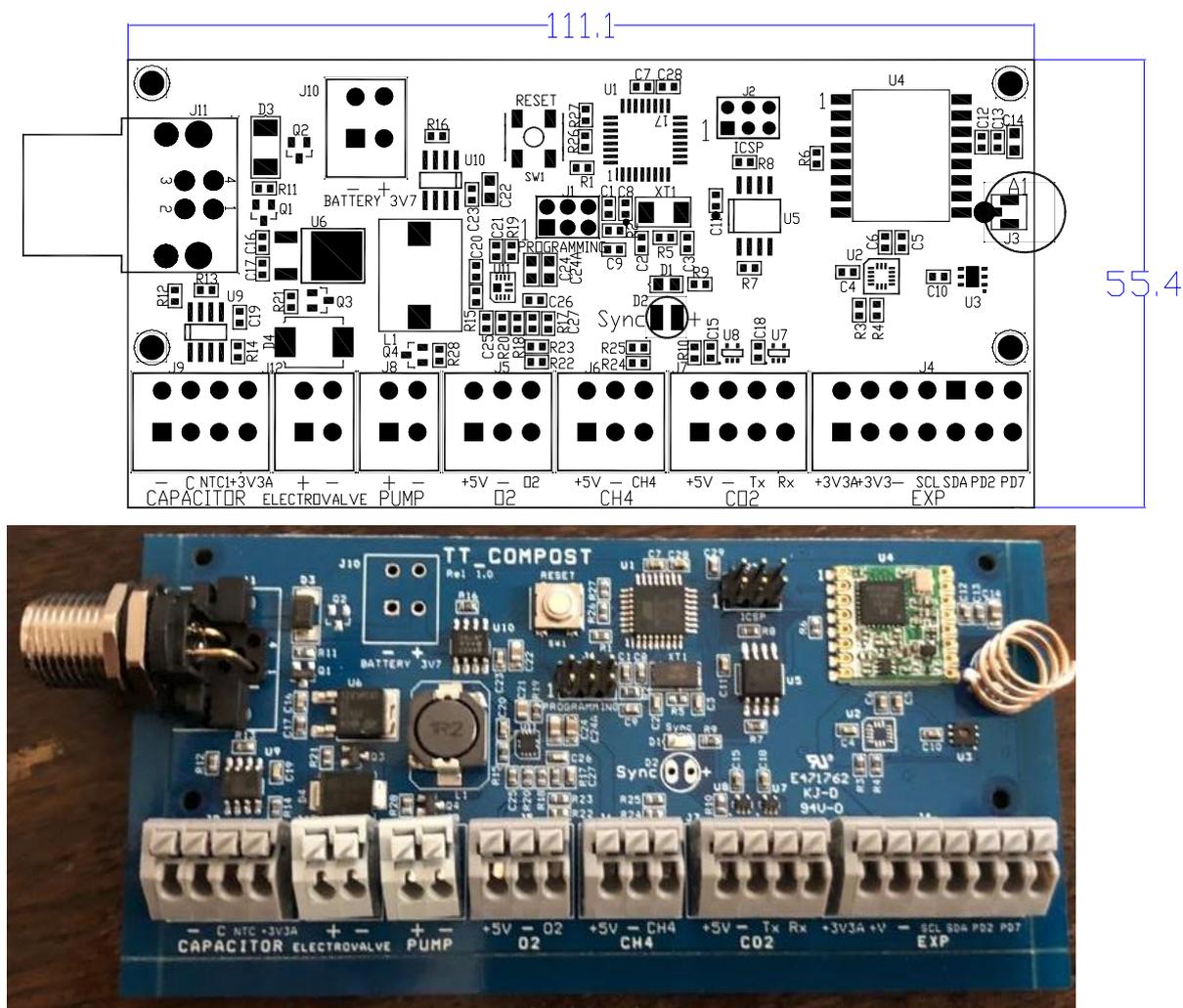


Figura 10. PCB del Compost Talker™2.0: schema grafico e foto della piastra

Lo schema elettrico del prototipo contiene una prima parte di gestione dei controlli delle periferiche, che in questo caso sono: la pompa, l'elettrovalvola e l'alimentazione dei sensori. Questi tre blocchi sono azionati mediante le linee di controllo digitali del processore (PUMP, Even e 3V3AEn, azionate tramite MOSFET. I sensori sono alimentati tutti a 5V. Poiché le batterie erogano una tensione di 3.3 Volt è stato predisposto un circuito di step-up (da 3.3 a 5V@7A). I sensori di CH4 e O2 hanno una uscita analogica che viene acquisita con un partitore di tensione al fine di produrre una uscita compatibile con gli ingressi del convertitore analogico digitale del microprocessore (max 3.3 V). Il sensore CO2 ha una uscita digitale seriale a 9600 BAUD. Poiché il microprocessore ha una sola porta seriale disponibile che è anche utilizzata per upload del software e debugging, si è utilizzato un multiplexer digitale che viene attivato solo quando il sensore invia i dati di misurazione mentre rimane sull'uscita di debug in tutto gli altri casi. Esiste inoltre un sensore di temperatura del compost NTC1 e di umidità. Quest'ultima viene ricavata da un sensore capacitivo che viene collegato ad

una sezione con oscillatore pilotato da un 7555 CMOS la cui uscita in frequenza è in rapporto con umidità del compost. Inoltre, vengono acquisiti i dati di temperatura e umidità esterna mediante il sensore SI7006 con interfaccia I2C. Il sistema è dotato anche di un accelerometro sempre su bus I2C che permette di monitorare quando il sistema viene rimosso per effettuare le necessarie lavorazioni su compost.

Una seconda sezione riguarda la memorizzazione dei dati su memoria flash da 128 Mbit che è utilizzata solo in caso di back-up, in quanto comunque i dati vengono inviati in tempo reale ad un server in cloud. I dati vengono trasmessi ad un router Lora, sempre realizzato ad hoc per il progetto, mediante il Transceiver SEMTECH SX1262 a 868 MHz. La lunghezza del pacchetto dati è di 19 bytes.

2.3 Valutazione della funzionalità in cumulo e individuazione delle soglie di maturazione

La valutazione della funzionalità operativa del Compost Talker™ è stata fatta posizionando 3 apparati ciascuno su un cumulo distinto di matrici in fase di compostaggio. I 3 cumuli erano posizionati uno nel Comune di Vasanello, gli altri due presso l'Azienda Agraria didattico-sperimentale "Nello Lupori" dell'Università degli Studi della Tuscia di Viterbo (Figura 11). I tre apparati sono stati inseriti in rete IoT. Questo consentiva di poter visualizzare le misure sui tre cumuli contemporaneamente e in tempo reale su interfaccia smartphone.

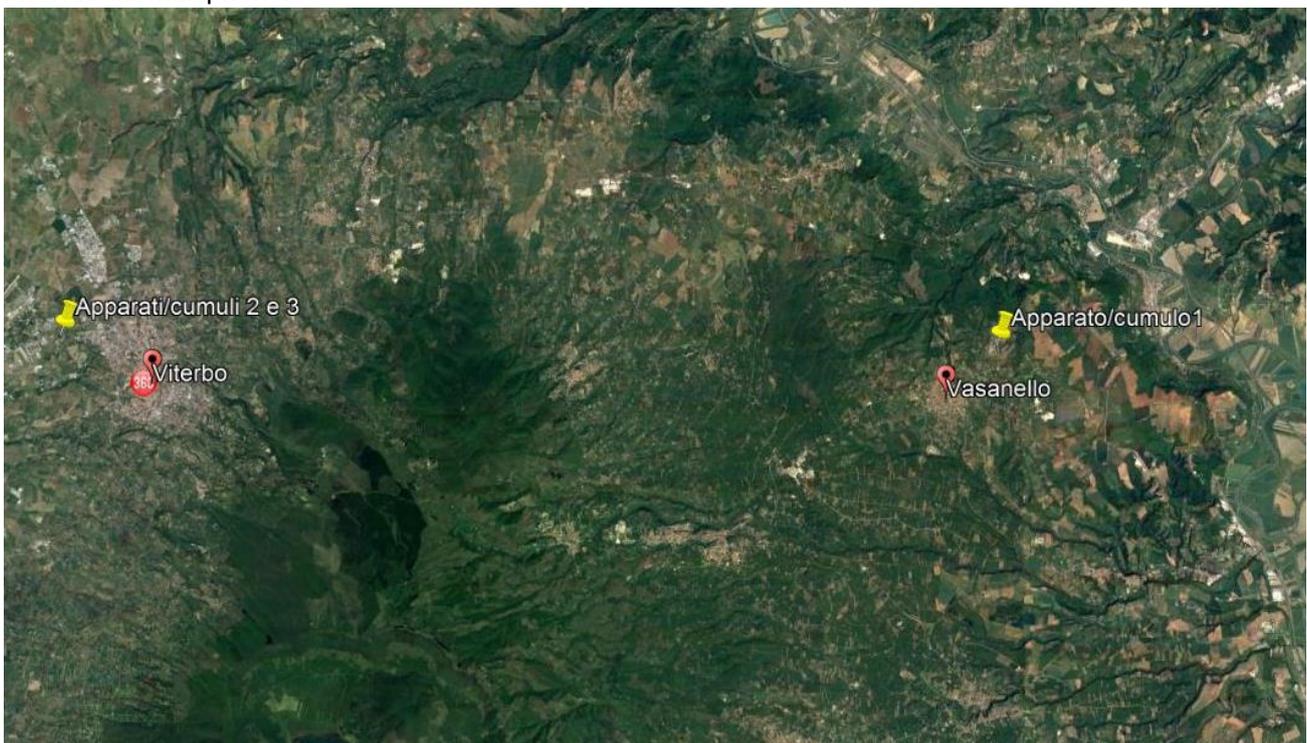


Figura 11. Localizzazione geografica dei 3 cumuli monitorati

Il cumulo presente a Vasanello era formato da matrici legnose, derivanti dalle potature delle alberature stradali del Comune stesso, queste sono state preventivamente sottoposte a cippatura. Il cippato ottenuto, con pezzatura medio-fine, è riferibile alla categoria cippato verde per la presenza di una percentuale di fogliame; questa matrice è la componente lignino-cellulosica della massa vegetale. Al cippato è stato aggiunto, in due momenti diversi, il residuo proveniente da sfalci di prati che ha così aumentato la componente azotata della massa in compostaggio (Figura. 12).



Figura 12: cumulo di matrici vegetali presso il sito di compostaggio di Vasanello

I cumuli presenti nell'Azienda Lupori dell'Università degli Studi della Tuscia sono formati da Ammendante Compostato Verde (ACV) (cumulo 3, Figura 13), e Ammendante Compostato Misto (ACM) (cumulo 2, Figura 14) in fase di maturazione.



Figura 13. Ammendante Compostato Verde



Figura 14. Ammendante Compostato Misto

Nei cumuli oggetto di studio durante il processo di compostaggio sono stati monitorati, A) i parametri di processo (attraverso l'uso dei sensori) e B) la flora microbica che è stata suddivisa in gruppi funzionali.

Il ciclo di misura degli apparati prevede l'accensione della pompa e dei sensori. Viene dapprima campionata aria esterna per 5 minuti, successivamente vengono effettuate una serie di 1000 misure dei parametri, i cui valori medi sono inviati alla memoria flash, successivamente con l'attivazione della elettrovalvola, viene campionata per 5 minuti l'aria del compost e successivamente alla fine del campionamento vengono acquisite 1000 misure dei parametri. Alla fine dei due cicli di misura vengono calcolati i valori medi, inviati alla memoria flash e trasmessi via radio al router Lora.

La stringa dei dati è così composta (in basso il numero dei bytes per variabile). In totale il pacchetto dati radio è di 19 bytes.

Data/Time	ID	Time ON	Volts	Signal Strength (RSSI)	Record	Tcomp	Ucomp	CH4 ref	O2 ref	CO2 ref	Rhair	Tair	CH4 compost	O2 compost	CO2 compost
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2

Il prototipo (Figura 15) è realizzato in una scatola stagna IP65 ed è dotato di un manometro per il controllo del regolare funzionamento del circuito pneumatico. La pressione di vuoto non può eccedere 0.2 bars altrimenti il sistema è occluso da polveri o altro materiale organico (anche insetti). Nella linea di aspirazione dell'aria è predisposto un filtro anticondensa con valvola di scarico che va azionata regolarmente (tipicamente ogni 15 gg). L'acqua si accumula in quanto l'aria aspirata dal compost è molto umida ma il vapore acqueo è in fase gassosa in quanto le temperature sono sempre superiori a 30 °C, mentre in ambiente esterno la temperatura cala rapidamente e l'acqua si condensa facilmente nei tubi esterni al cumulo.



Figura 15. Particolare del sistema di misura Compost Talker™ in funzione sul cumulo

Il sistema di ricezione dei dati è costituito da un modem/router anch'esso realizzato per il progetto ma che ha anche altri usi per diversi sensori IoT. Il modem è basato su processore ATMEGA2560, come accennato precedentemente, ha un flash memory di back-up con capacità di 128 Mbit, un modulo transceiver LoRa e un GPRS modem (SIM800C). Il compito del modem/router è di ricevere i dati dal sensore o più sensori (fino a 20 dispositivi) e di inviare i dati con protocollo http ad un server ion clouds. Da qui i dati sono inviati ad un database e possono essere visualizzati anche in tempo reale su WEB app lato client, usando diversi prodotti oggi già esistenti. Una interfaccia di visualizzazione dati real time è in corso di sviluppo su piattaforma python/dash (Figura 16).



Figura 16. Particolare del sistema ricevente modem/router con antenna

La composizione della comunità microbica durante il processo di compostaggio è stata monitorata ogni 15 giorni. Il monitoraggio microbiologico è stato fatto con tecniche di isolamento convenzionali; allo scopo, campioni di compost sono stati sottoposti a diluizioni seriali e piastrati su terreno agarizzato. I terreni di coltura utilizzati sono selettivi per diverse comunità microbiche quali funghi, batteri, attinomiceti e lieviti.

i) La popolazione batterica è stata isolata su terreno Plate Count Agar (PCA) (5g/l triptone, 2.5g/l glucosio, 1g/l estratto di lievito, 15 g/l agar, Cyclohexamide 100 mg/l) (Atlas, 2004).

ii) La popolazione fungina è stata isolata su Potato Dextrose Agar (PDA) addizionato dell'antibiotico streptomycin solfato.

iii) I lieviti sono stati isolati su Yeast Extract Peptone Dextrose agar (YEPD) (estratto di lievito 10 g/l, peptone 20 g/l, glucosio 20 g/l, agar 20 g/l).

iv) Gli attinomiceti sono stati isolati su Starch Casein Agar (SCA) (amido 10 g/l, nitrato di potassio 2 g/l, cloruro di sodio 2 g/l, fosfato di potassio 2 g/l, solfato di magnesio 0.05 g/l, carbonato di calcio 0.02 g/l, solfato di ferro 0.01 g/l, caseina 0.3 g/l, agar 15 g/l, addizionato dell'antibiotico rifampicina e dall'antimicotico cicloeximide) (Nimal kumar, 2010).

L'incubazione è stata fatta a 25 °C per 5 giorni, sono state poi contate le colonie dei diversi microrganismi presenti e in base alle diverse diluizioni seriali sono state calcolate le Unità Formanti Colonia (UFC) per grammo di compost

Vengono di seguito riportate le analisi combinate dei parametri fisico chimici e microbiologici dei 3 cumuli nel periodo agosto- ottobre, 2018

Cumulo 1. ACV Comune di Vasanello

Il cumulo 1 ha mostrato per gran parte del periodo di osservazione fino a circa metà del mese di ottobre valori di CO₂ oltre il fondo scala dello strumento (50000 ppm) a cui corrispondono valori di temperatura mediamente elevati (47.9 °C con massimi di 49.6 °C) e valori di O₂ bassi (coerente con l'alta concentrazione di CO₂) (Figura 17). Questo evidenzia una alta attività metabolica e quindi una fase precedente a quella di stabilizzazione/maturazione. Tali misure sono confermate dall'abbondante microflora microbica rilevata che indica una prevalente fase termofila del processo di compostaggio (Figura 18).

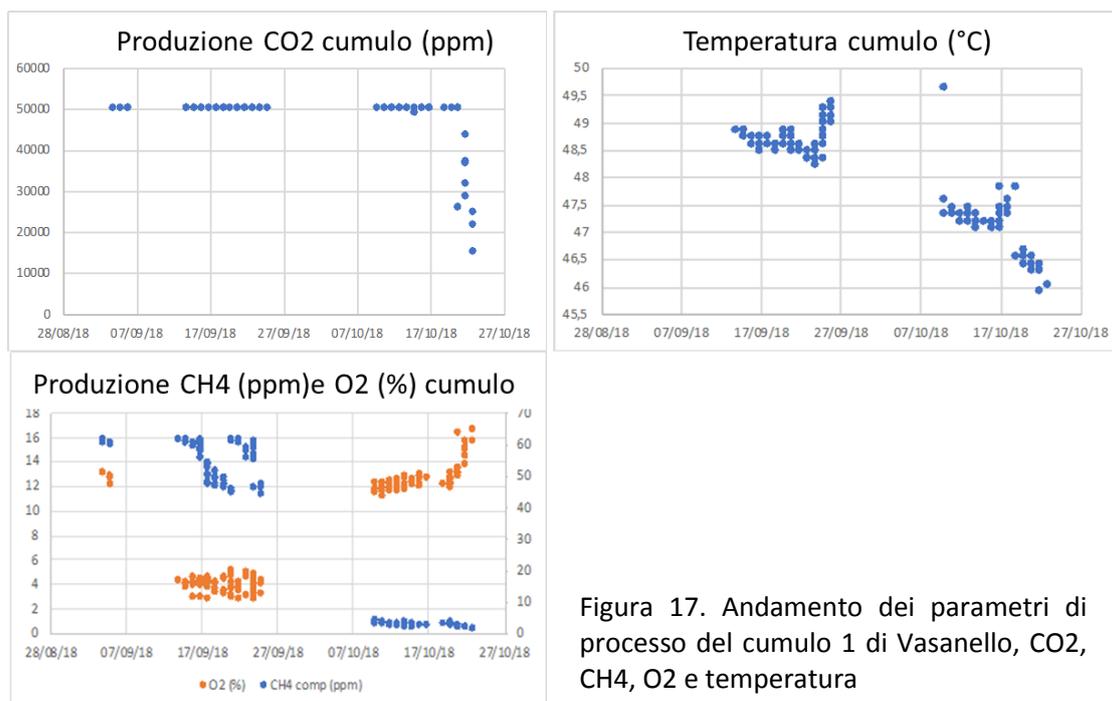


Figura 17. Andamento dei parametri di processo del cumulo 1 di Vasanello, CO₂, CH₄, O₂ e temperatura

I valori di metano sono mediamente alti (32,6 con massimo di 61.2 ppm), ben oltre i valori atmosferici, evidenziando presenza di sacche anaerobiche nel cumulo. La presenza di CH₄ a livelli oltre la soglia atmosferica è un indice importante per la gestione operativa del cumulo, indicando la necessità di areazione e quindi di rivoltare il cumulo (8.1%). Si nota comunque l'effetto della maturazione del compost nel tempo. Infatti, dopo circa 30 giorni di attività metabolica elevata la concentrazione diminuisce rapidamente scendendo sotto la soglia di 50000 ppm ed attestandosi intorno ai 15000 ppm. In concomitanza diminuisce la temperatura del compost, il metano torna ai valori quasi atmosferici (2.3 ppm) e l'ossigeno risale al 17% (Figura 17) (minore produzione di CO₂).

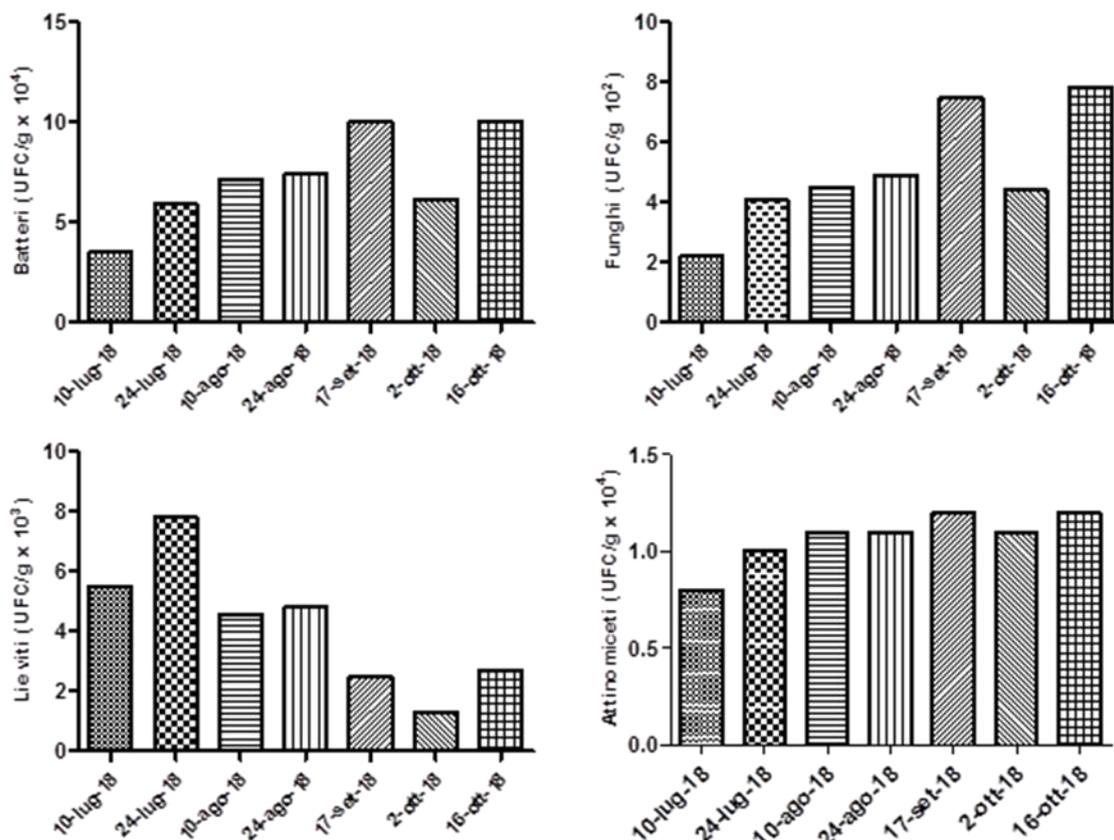


Figura 18. Andamento delle popolazioni microbiche durante il processo di compostaggio nel cumulo 1 di Vasanello (ACV)

Cumulo 2. ACM Azienda Didattico Sperimentale Nello Lupori – Università degli Studi della Tuscia

I dati in Figura 19 mostrano l'andamento dei CO₂, CH₄, O₂, temperatura del cumulo. Si nota come l'evoluzione della CO₂ sia in diminuzione durante il periodo di monitoraggio con valori comunque non elevati, il valore medio risulta essere di 2885 ppm mentre quello massimo di 4575ppm. Già questo, a fronte di una temperatura del cumulo in progressiva diminuzione, evidenzia una massa vicina alla stabilizzazione/maturazione. I dati di ossigeno e metano sono vicini ai valori atmosferici (valore medio O₂ = 20% e CH₄ 2ppm) evidenziando una massa stabile in equilibrio con l'ambiente esterno. La temperatura del compost è in diminuzione con il progredire della maturazione, passando da 34.8 a 30.8 °C. Si nota solo negli ultimi giorni una ripresa transitoria dell'attività metabolica ma sempre con valori assoluti molto bassi, e che tuttavia non si riflette sull'andamento della temperatura, anche in considerazione della parallela diminuzione della temperatura dell'aria.

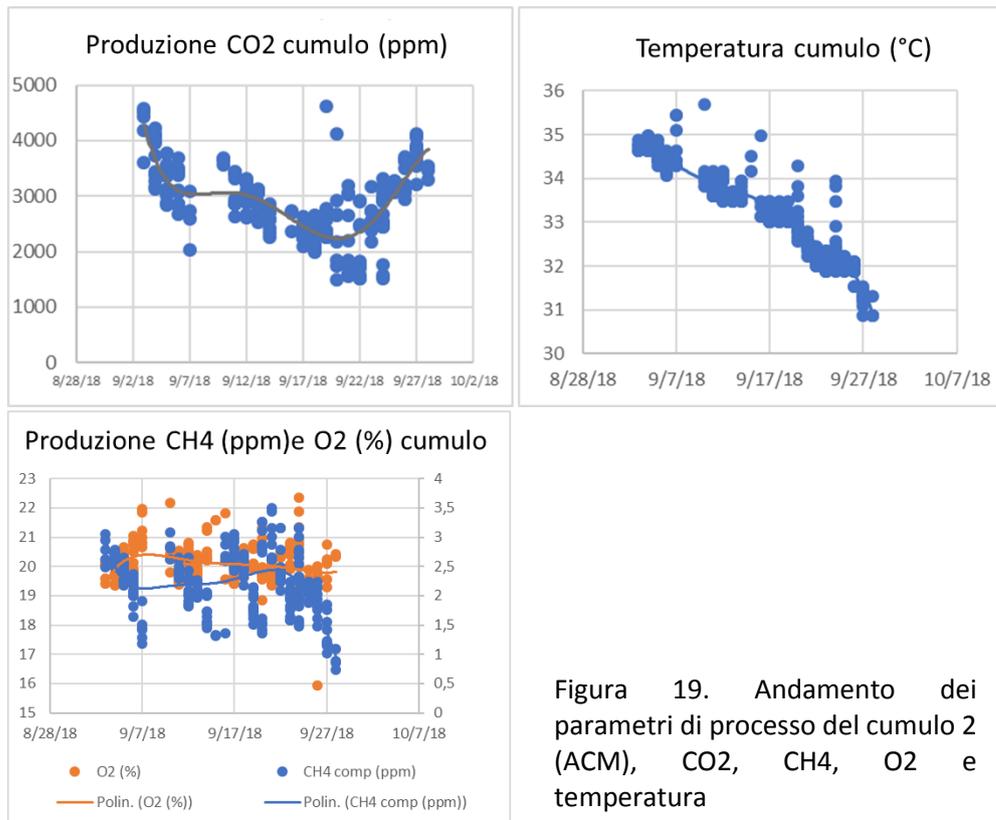


Figura 19. Andamento dei parametri di processo del cumulo 2 (ACM), CO₂, CH₄, O₂ e temperatura

I dati microbiologici, con la diminuzione progressiva delle comunità batteriche e dei lieviti, quelle più attive durante la fase termica del processo, supportano i risultati ottenuti con i sensori (Figura 20).

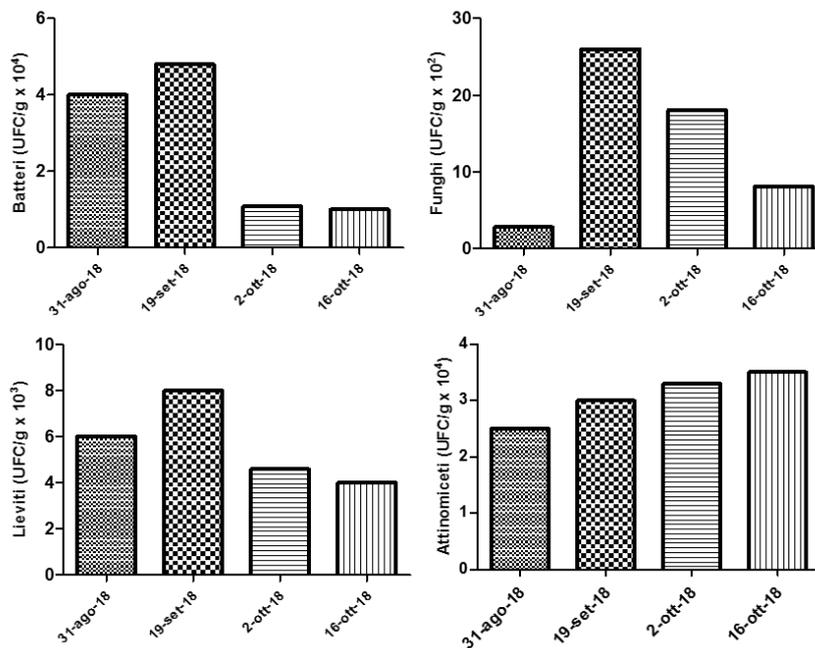


Figura 20. Andamento delle popolazioni microbiche durante il processo di compostaggio nel cumulo 2 (ACM)

Cumulo 3. ACV Azienda Didattico Sperimentale Nello Lupori – Università degli Studi della Tuscia

Nel caso del cumulo 3 (Figura 21) i valori di concentrazione di CO2 sono più elevati indicando una attività metabolica più intensa, in media 20265 ppm, compatibile con una fase termica. Si individuano delle chiare fasi cicliche di attività, indicate dalla più elevata concentrazione di CO2 e dalla variazione contemporanea di temperatura associata alle date di bagnatura del cumulo (4 settembre e 4 ottobre, 2018). La concentrazione di metano risulta più alta che nel caso del cumulo relativo al sensore 2, infatti la concentrazione massima è pari a circa 5ppm, ma comunque con valori che non giustificano la presenza di importanti sacche di attività anaerobica. La concentrazione dell'ossigeno è in diminuzione (intorno al 18%). La temperatura massima del cumulo è inizialmente superiore ai 40 °C supportando ulteriormente il dato di CO2 e la fase termica del processo. La diminuzione graduale delle temperature suggerisce il graduale passaggio da una fase termica ad una di stabilizzazione/maturazione.

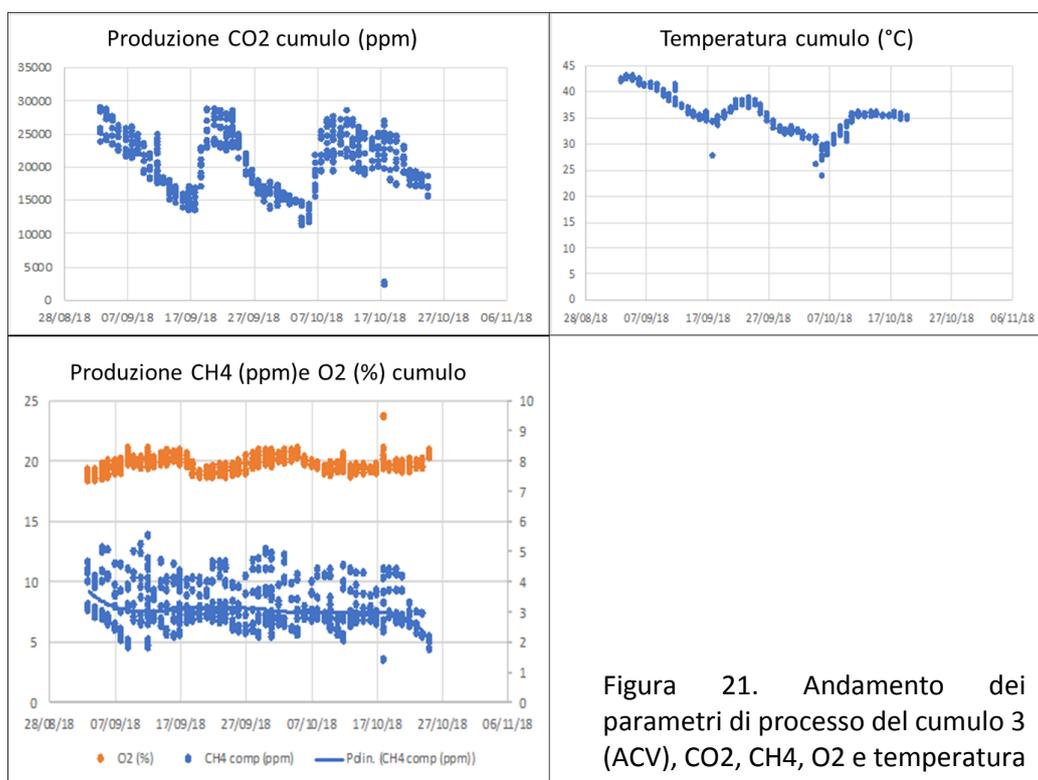


Figura 21. Andamento dei parametri di processo del cumulo 3 (ACV), CO2, CH4, O2 e temperatura

Le analisi delle comunità microbiche evidenziano una graduale flessione delle frazioni batteriche e dei lieviti e incremento di quelle fungine suggerendo l'ingresso anche di questa massa nella fase di stabilizzazione/maturazione (Figura 22).

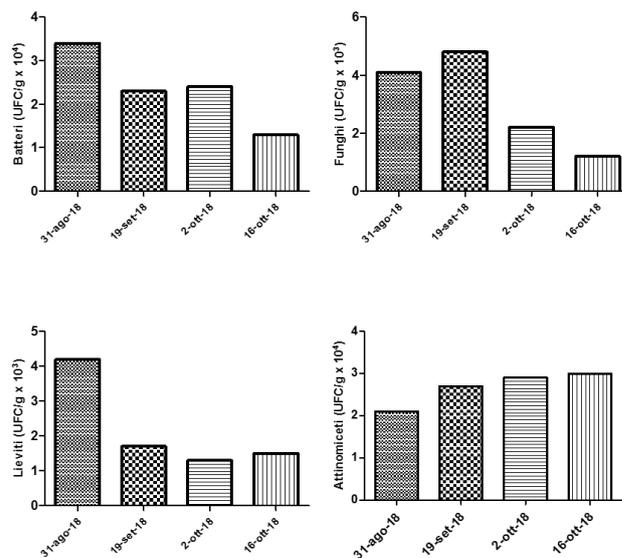


Figura 22. Andamento delle popolazioni microbiche durante il processo di compostaggio nel cumulo 3 (ACV)

2.4 Potenzialità di estrazione di calore dai cumuli durante i processi di compostaggio

Nei processi di compostaggio, nella fase termica, in coincidenza con i massimi di respirazione metabolica, si registrano comunemente temperature abbondantemente superiori ai 40 °C (range 40-60 °C). In teoria sarebbe possibile estrarre una buona parte di questo calore mantenendo tuttavia una temperatura costante ed efficiente per il metabolismo dei microrganismi. In generale i microrganismi (batteri e funghi) hanno diverse temperature ottimali di funzionamento in relazione alla specie ed alle condizioni del substrato (Madigan et al., 2016). Conoscendo la temperatura ottimale di funzionamento dei microrganismi coinvolti nell'attività metabolica in fase termica, assumendo per ora un valore unico per tutte le fasi metaboliche (T_{opt}), la temperatura effettiva del compost (T_{comp}), il calore specifico a pressione costante del materiale organico c_p (1920 J kg⁻¹ K⁻¹) si può stimare potenzialmente la quantità di calore estraibile secondo l'equazione:

$$E = m c_p \Delta T$$

$$\Delta T = T_{comp} - T_{opt}$$

Assumendo quindi una temperatura ottimale di 40°C (Madigan et al., 2016) si possono applicare i dati misurati nella stazione di Vasanello per stimare una produzione giornaliera teorica di calore, tenendo conto i 30 gg della fase di maturazione. Sulla base di questi dati sperimentali la stima della produzione giornaliera è di circa 9.6 KW ora per una tonnellata di materiale di compost. Chiaramente il valore reale di energia a disposizione sarà necessariamente più basso e dipendente dal tipo di impianto di conversione. Ad esempio, l'impiego di una pompa di calore con fluido circolante potrebbe raggiungere livelli elevati di efficienza. Il mantenimento della temperatura ottimale potrebbe essere controllato modulando la richiesta di calore, permettendo quindi di non alterare troppo i parametri necessari per la maturazione. Alternativamente potrebbe anche essere fatta la scelta di ritardare la maturazione del compost facendolo lavorare in condizioni sub-ottimali a fronte di un maggiore guadagno energetico.

Le scelte strategiche possono essere diverse così pure le diverse opzioni tecnologiche di conversione energetica, rimane comunque interessante l'impiego del compostaggio per la generazione di energia termica, soprattutto in piccoli impianti diffusi, come quelli di comunità.

3 Conclusioni

In conclusione, il presente progetto ha permesso di mettere a punto il sistema Compost Talker™ ad un livello TRL tra il 7 e 8. Infatti, il sistema Compost Talker™ ha solo bisogno di una ulteriore campagna di utilizzo in impianti di compostaggio per essere commercializzato e raggiungere quindi un TRL di 9.

Il sistema Compost Talker™ permette, per la prima volta, il monitoraggio continuo dei parametri di processo durante il compostaggio, superando i metodi a misura unica, che, per l'oggettiva variabilità del dato puntuale, possono spesso portare a valutazioni sbagliate sulle fasi di processo. Il Compost Talker™ invece restituisce un pattern facilmente interpretabile al di là della prevedibile variabilità del dato puntuale.

Il confronto dei valori dei parametri di processo con la dinamica delle popolazioni microbiche responsabili del processo di respirazione aerobica ha confermato la bontà e utilità dei dati forniti dal Compost Talker™ e del loro utilizzo per la valutazione delle fasi termiche e di stabilizzazione/maturazione.

Il sensore riesce anche, attraverso il dato di CH₄, a valutare l'eventuale presenza di sacche di respirazione anaerobica nei cumuli, fornendo quindi agli operatori le soglie temporali a cui effettuare il rivoltamento e aereazione delle masse.

È stata dimostrata la possibilità di gestione del sistema Compost Talker™ in rete IoT permettendo di tenere sotto controllo tramite device (PC o Smartphone) i parametri di processo di un numero anche rilevante di cumuli, e permettendo quindi di personalizzare gli interventi (bagnatura, rivoltamento etc.)

Il Compost Talker™ si rivela quindi un sistema efficace, facile da utilizzare e, soprattutto, grazie alla tipologia di componentistica utilizzata, un prodotto a basso costo e quindi facilmente utilizzabile nella implementazione di reti di rilevamento.

Il monitoraggio dei parametri di processo in continuo, permettono anche di poter prevedere l'estrazione di calore dalle masse durante la fase termica in quantità tali da non compromettere o rallentare i processi metabolici, offrendo una potenziale fonte di energia rinnovabile in un contesto di economia circolare.

4 Riferimenti bibliografici

Asakawa, T., Kanno, N. and Tonokura, K. (2010) 'Diode laser detection of greenhouse gases in the near-infrared region by wavelength modulation spectroscopy: Pressure dependence of the detection sensitivity', *Sensors*, 10, 4686–4699. doi: 10.3390/s100504686.

Atlas R.M., *Handbook of microbiological media*. London: CRC Press. PP.1390. Blanc M., Marilley L., Beffa T., Aragno M. (1999). Thermophilic bacterial communities in hot composts as revealed by most probable number counts and molecular (16SrDNA) methods. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 28, n. 2, pp. 141-149.

Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral R. (2009) Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review, *Bioresource Technology* 100, 5444-5453

Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A., Cegarra, J. (1998) Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresour. Technol.* 63, 91–99.

Chanyasak, V., Kubota, H. (1981) Carbon/organic nitrogen ratio in water extract as measure of compost degradation. *J. Ferment. Technol.* 59, 215–219.

- Chen Y., Inbar Y. (1993). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting in relation to compost maturity. In: Hotlink, H.A.J., Keener, H.M. (Eds.), *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*. Renaissance, Washington, OH, pp. 551–600.
- Chu, C. S. and Lo, Y. L. (2008) 'Fiber-optic carbon dioxide sensor based on fluorinated xerogels doped with HPTS', *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 129, 120–125. doi: 10.1016/j.snb.2007.07.082.
- Cooperband, L.R., Stone, A.G., Fryda, M.R., Ravet, J.L. (2003) Relating compost measures of stability and maturity to plant growth. *Compost Sci. Util.* 11, 113– 124.
- Corlay Chee L., Ferrera - Cerrato R., Etchevers Barra J.D., Echegaray Aleman A., Santizo Rincon J.A. (1999). Cinetica de grupos microbianos en el proceso de produccion de composta y vermicomposta. *Agro-Ciencia*, Vol. 33, n. 4, pp. 375-380.
- Darby, I. et al. (2016) 'Short-term dynamics of carbon and nitrogen using compost, compost- biochar mixture and organo-mineral biochar', *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Berlin Heidelberg, 23, 11267–11278. doi: 10.1007/s11356-016-6336-7.
- De Bertoldi M., Vallini G., Pera A. (1983). Biology of composting: A review. *Waste Management & Research* 1: 157-176.
- Fine, G. F. et al. (2010) 'Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring', *Sensors* 5469–5502. doi: 10.3390/s100605469.
- Francey, R. J. and Steele, L. P. (2003) 'Measuring atmospheric carbon dioxide – the calibration challenge', *Accreditation and Quality Assurance*, 8, 200–204. doi: 10.1007/s00769-003-0620-1.
- Haug R.T. (1980). *Compost Engineering: principles and practise*. Ann. Arbor. Science Publishers, Michigan, U.S.A. 53.
- Hoitink H.A.J., Boehm M.J., 1999. Biocontrol within the context of soil microbial communities: a substrate-dependent phenomenon. *Annual Review of Phytopathology* 37: 427- 446.
- Hoitink H.A.J., Grebus M.E. (1994). Status of biological control of plant diseases with composts. *Compost Science Utilization* 2: 6-12.
- Hue, N.V., Liu, J. (1995) Predicting compost stability. *Compost Sci. Util.* 3, 8–15.
- Jiao, Z. et al. (2002) 'Study on the Characteristics of Ag Doped CuO-BaTiO₃ CO₂ Sensors', *Sensors*, 2, 366–373. doi: 10.3390/s20900366.
- Lim, J.-T. and Han, Y. (2018) 'Spreading Factor Allocation for Massive Connectivity in LoRa Systems', *IEEE Communications Letters*, pp. 1–1. doi: 10.1109/LCOMM.2018.2797274.
- Liu, Y. et al. (2017) 'Study on effect of temperature and humidity on the CO₂ concentration measurement', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 81, 12083. doi: 10.1088/1755-1315/81/1/012083.

- Lyon P.F., Beffa T., Blanc M., Auling G., Aragno M. (2000). Isolation and characterization of highly thermophilic xylanolytic *Thermus thermophilus* strains from hot composts. *Canadian Journal of Microbiology*, Vol. 46, n. 11, pp. 1029-1035.
- Madigan M.T., Martinko J.m., Bender K.S., Buckeley D.H, Stahl D.A. (2016) Brock. *Biologia dei microrganismi. Microbiologia generale, ambientale e industriale*. Ediz. Mylab. pp169-171
- Mandayo, G. G. et al. (2011) 'Performance of a CO₂ impedimetric sensor prototype for air quality monitoring', *Sensors*, 11, 5047–5057. doi: 10.3390/s110505047.
- Mathur, S.P., Owen, G., Dinell, H., Schnitzer, M. (1990) Determination of compost biomaturity. Literature review. *Biol. Agric. Hortic.* 10, 65–85.
- Maynard A.A. (2000). *Compost: the process and research*. The Connecticut Agricultural Experiment Station, Bulletin n. 966, Luglio 2000, 14 pp.
- Nimal kumar K. (2010). Isolation screening and molecular characterization of antibiotic producing actinomycetes. Pondicherry University Chapter 3 p.33.
- Piontek M., Nguyen Thi Bich Loc (2000). The effect of sewage sludge composting on the quantitative state of some groups of bacteria and fungi. *Acta Microbiologica Polonica*, Vol. 49, n. 1, pp. 83-90.
- Poulsen, T. G. (2011) 'Oxygen and Carbon Dioxide Distribution And Movement in Passively Aerated Compost Piles', *Compost Science and Utilization*, 19, 25–32. doi: 10.1080/1065657X.2011.10736973.
- Sega, M., Amico Di Meane, E. and Plassa, M. (2002) 'Stability of a NDIR analyser for CO₂ at atmospheric concentration', *Ann Chim*, 92, 897–902.
- Sekhar, P. K. et al. (2016) 'Development and testing of an electrochemical methane sensor', *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 228, 162–167. doi: 10.1016/j.snb.2015.12.100.
- Senesi N. (1989). "Valutazione dei reflui delle industrie olearie come ammendanti organici per il terreno" Sem. Inter. Sul trattamento delle acque reflue degli oleifici. Lecce 16-17 novembre 1989.
- Sharma H.S.S., Lyons G., Chambers J. (2000). Comparison of the changes in mushroom (*Agaricus bisporus*) compost during windrow and bunker stages of phase I and II. *Annals of Applied Biology*, Vol. 136, n. 1, pp. 59-68.
- Tilston E.L., Pitt D., Groenhof A.C. (2002). Composted recycled organic matter suppresses soil-borne diseases of field crops. *New Phytologist* 154: 731-740.
- TMECC (2002) *Test Methods for the Examination of Composting and Compost*. US Composting Council, Bethesda, MD.
- Vallini G. (1995). Voce "Compost" (pp. 173-174). In: *Dizionario dell'Ambiente* (a cura di G. Gamba e G. Martinetti), ISEDI/ Utet Libreria, Torino
- Vejlgaard, B. et al. (2017) 'Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT', in 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 1–5. doi: 10.1109/VTCSpring.2017.8108666.
- Vuorinen A.H., Saharinen M.H. (1999). Cattle and Pig Manure and Peat Cocomposting in a Drum Composting System: Microbiological and Chemical Parameters. *Compost Science & Utilization*, Vol. 7, n. 3, pp. 54-65.

Wang, Y. et al. (2005) 'The NDIR CO₂ monitor with smart interface for global networking', IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54, 1634–1639. doi: 10.1109/TIM.2005.851474.

Yasuda, T., Yonemura, S. and Tani, A. (2012) 'Comparison of the characteristics of small commercial NDIR CO₂ sensor models and development of a portable CO₂ measurement device', Sensors, 12, 3641–3655. doi: 10.3390/s120303641.

Zmora-Nahum, S., Markovitch, O., Tarchitzky, J., Chen, Y. (2005) Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. Soil Biol. Biochem. 37, 2109–2116.

Zucconi, F., de Bertoldi, M. (1987) Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. In: de Bertoldi, M., Ferranti, M.P., L'Hermite, P., Zucconi, F. (Eds.), Compost: Production, Quality and Use. Elsevier, Barking, pp. 30–50.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., de Bertoldi, M. (1981) Evaluating toxicity of immature compost. Biocycle 22, 54–57.

5 CV dei partecipanti

CV BREVE ANDREA VANNINI

Nome, cognome: Andrea Vannini

Luogo e data di nascita: Roma 26 ottobre 1961

Residenza: Strada Cassia Cimina, Km 10,400 – 01030 Canepina (Viterbo)

Recapiti: Tel Ufficio +39 0761 357449; Mobile +39 320 4363554; E-mail: vannini@unitus.it

Posizione: Professore di prima fascia AGR/12 presso il Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali dell'Università degli Studi della Tuscia – Viterbo

Andrea Vannini è docente di discipline afferenti alla protezione delle piante e alle biotecnologie agrarie. Le attività di ricerca riguardano: eziologia, epidemiologia e dinamica delle popolazioni di patogeni vegetali; diagnostica avanzata, lotta biologica e integrata; sistemi di monitoraggio fitopatologica; patogeni alieni invasivi; biotecnologie applicate alla produzione di compost di qualità; gestione dei rifiuti urbani; biotecnologie applicate all'agroindustria.

In tali ambiti ha coordinato i oltre 30 progetti di ricerca in ambito nazionale (PRIN, PRAL, COFIN, MiPAAF, FISR) e internazionale (EC CASCADE, EC PATHOAK, FAO, Cooperazione bilaterale ITALIA –USA, COST, EC FORTHREATS; EC BACCARA, EC ISEFOR; EC LIFE SANFIX).

È consulente FAO e del MATTM per problemi ambientali. Svolge la propria attività di ricerca in Italia e in progetti di Cooperazione in Nepal (FAO e MAE) e Nord Africa - Algeria (MATT). Mantiene attività di collaborazione con Università e Enti di Ricerca nazionali (Università di Reggio Calabria, Palermo, Firenze, Ancona; CRA-PRA, CNR) e internazionali (University of California – Berkeley; Michigan State University MI; INRA-FR; INRA- Algeria; Forestry Commission – UK; Murdoch University –WA; Taiwan Forestry Research Institute - TW; University of Aberdeen –UK; RUDN University - RU; Zhejiang A&F University - Cina).

Appartenenza a reti di ricerca internazionali: Managing Committee (MC) and WG leader COST G4 1997/2001. "Multidisciplinary chestnut research", Chair Dr E. Wilhelm; MC and Vice Chair COST Action FP0801- 2008-2013: "Established and Emerging Phytophthora: Increasing Threats to Woodland and Forest Ecosystems in Europe", Chair Dr. Steve Woodward ; MC COST Action TD1209 'European Information System for Alien Species' Chair Dr. Helen Roy; MC COST Action FP 1401 'A global network of nurseries as early warning system against alien tree pests (Global Warning); deputy per lo IUFRO Working Party 7.02.09 Phytophthoras in Forest and Wild land Ecosystems; membro dell'Editorial Board e Expert scientist dell' European Alien Species Information Network (EASIN; <http://easin.jrc.ec.europa.eu/>) (EASIN): responsabile per la revision del catalogo EASIN per la EU.

E' autore di oltre 170 pubblicazioni scientifiche

H-index 20; citazioni degli ultimi 5 anni (2014-2018) 878, totali 1462

CV BREVE MARIA PIA ALEANDRI

Maria Pia Aleandri è post-doc presso il Laboratorio di Protezione delle Piante del Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali dell'Università degli Studi della Tuscia. Ha conseguito il diploma di laurea magistrale in Scienze Agrarie (20/06/2000) e il titolo di Dottore di ricerca (20/02/2006) presso l'Università degli Studi della Tuscia

Le sue esperienze lavorative si sono svolte presso il DIBAF con periodi di formazione presso Laboratori internazionali come Technische Universität di Monaco di Baviera, Freising e il Fusarium research Laboratory presso la Facoltà di Agraria dell'Università di Sydney.

Le attività di ricerca riguardano: microbiologia applicata alla protezione delle piante e alle biotecnologie agrarie. Lavora da anni sulla microbiologia delle matrici compostabili e sull'ottimizzazione dei processi di compostaggio, nonché sull'utilizzo dei compost come ammendanti, bio-fertilizzanti e substrati per le produzioni vegetali.

E' autrice di 21 pubblicazioni scientifiche indicizzate

H-index 7; citazioni degli ultimi 5 anni (2014-2018) 96, totali 138

6 Allegati



Si7006-A20

I²C HUMIDITY AND TEMPERATURE SENSOR

Features

- Precision Relative Humidity Sensor
 - ± 5% RH (max), 0–90% RH
- High Accuracy Temperature Sensor
 - ±1 °C (max), –10 to 85 °C
- 0 to 100% RH operating range
- –40 to +125 °C operating range
- Wide operating voltage (1.9 to 3.6 V)
- Low Power Consumption
 - 150 µA active current
 - 60 nA standby current
- Factory-calibrated
- I²C Interface
- Integrated on-chip heater
- 3x3 mm DFN Package
- Excellent long term stability
- Optional factory-installed cover
 - Low-profile
 - Protection during reflow
 - Excludes liquids and particulates

Applications

- HVAC/R
- Thermostats/humidistats
- Respiratory therapy
- White goods
- Indoor weather stations
- Micro-environments/data centers
- Automotive climate control and defogging
- Asset and goods tracking
- Mobile phones and tablets

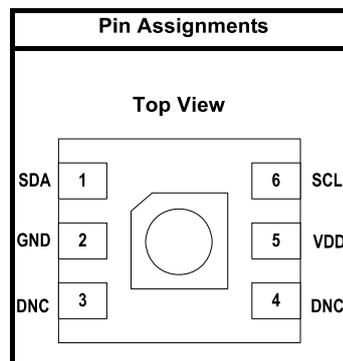
Description

The Si7006 I²C Humidity and Temperature Sensor is a monolithic CMOS IC integrating humidity and temperature sensor elements, an analog-to-digital converter, signal processing, calibration data, and an I²C Interface. The patented use of industry-standard, low-K polymeric dielectrics for sensing humidity enables the construction of low-power, monolithic CMOS Sensor ICs with low drift and hysteresis, and excellent long term stability.

The humidity and temperature sensors are factory-calibrated and the calibration data is stored in the on-chip non-volatile memory. This ensures that the sensors are fully interchangeable, with no recalibration or software changes required.

The Si7006 is available in a 3x3 mm DFN package and is reflow solderable. It can be used as a hardware- and software-compatible drop-in upgrade for existing RH/temperature sensors in 3x3 mm DFN-6 packages, featuring precision sensing over a wider range and lower power consumption. The optional factory-installed cover offers a low profile, convenient means of protecting the sensor during assembly (e.g., reflow soldering) and throughout the life of the product, excluding liquids (hydrophobic/oleophobic) and particulates.

The Si7006 offers an accurate, low-power, factory-calibrated digital solution ideal for measuring humidity, dew-point, and temperature, in applications ranging from HVAC/R and asset tracking to industrial and consumer platforms.



Patent Protected. Patents pending

1 Profile



Main functions and features :

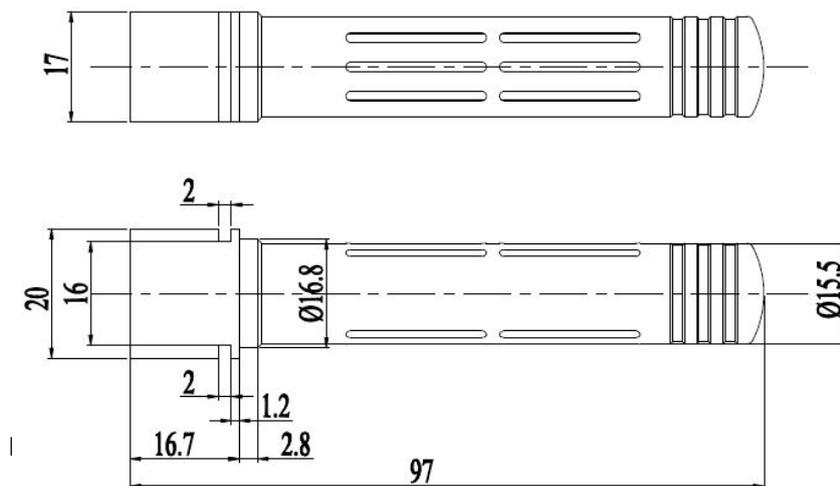
- High sensitivity,High resolution
- Low power consumption
- Output method:UART,analog voltage signal,PWM wave
- Quick response
- Temperature compensation,excellent linear output
- Good stability
- Long lifespan
- Anti water vapor interference
- No poisoning

2 Main technical parameters

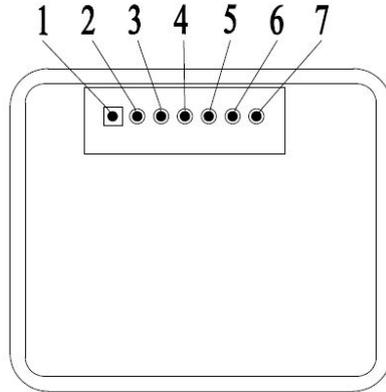
Working voltage	4.5 V ~ 5.5V DC
Average current	< 85 mA
Interface level	3.3 V
Measuring range	0~5%VOL optional
Output signal	PWM
	UART
Preheat time	3min
Reponse Time	$T_{90} < 30s$
Working temperature	0°C ~ 50°C
Working humidity	0~95%RH
Weight	21 g
Lifespan	>5 year

Target Gas	Measuring Range	Accuracy	Mark
Carbon Dioxide (CO2)	0~2000ppm	±(50ppm +5%reading value)	Temperature compensation
	0~5000ppm		Temperature compensation
	0~1%VOL		Temperature compensation
	0~3%VOL		Temperature compensation
	0~5%VOL		Temperature compensation

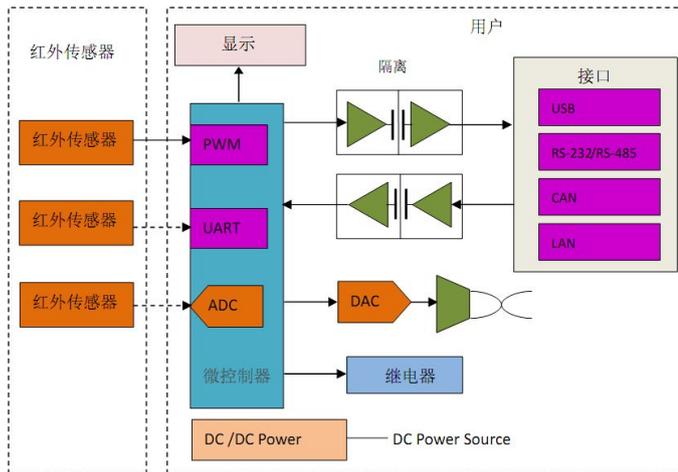
3.Structure



4.Pin



5.Circuit



6. Operating instruction

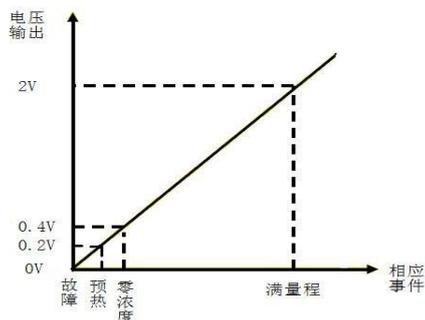
6.1 Analog output connections

The output value of Vout is 0.4-2.0V, which stands for 0 to full range

Vin -5V

GND- Power Ground

Vout-ADC input



6.2 PWM output (taking PWM output from 2000ppm as example):

CO2 output range: 0ppm-2000ppm

Cycle: 1004ms ± 5%

High level output for beginning: 2ms (in name)

Middle of cycle: 1000ms ± 5%

Low level output for ending: 2ms (in name)

Account formula for CO2 concentration which gets through PWM:

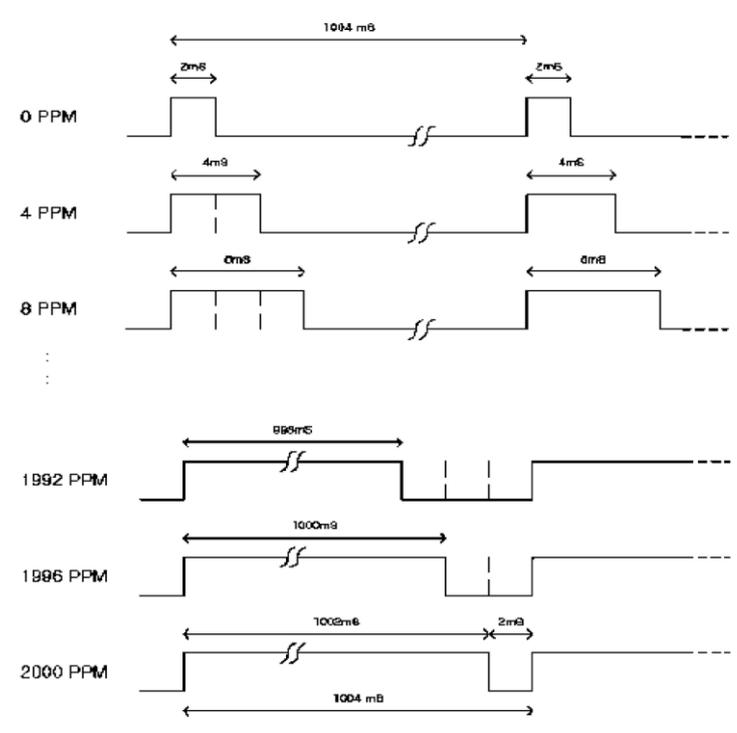
$$C_{ppm} = 2000 \times (T_H - 2ms) / (T_H + T_L - 4ms)$$

Among:

C_{ppm} is calculated CO2 concentration, unit is ppm;

T_H is time for high level during an output cycle;

T_L is time for low level during an output cycle.



6.3 Digital connects:

Vin-5V power

GND- Power Ground

RXD connect sensor TXD

TXD connect sensor RXD

You can read gas concentration via Uart, no need to calculate.

6.3.1 communication protocol

1.General Settings

2.Command

Each command or return

Contains 9 bytes (byte 0 ~ 8)

starting byte fixed 0 XFF

command contains sensor number (factory default to 0 x01)
to check and end

Command List:

Read gas concentration

Return value

Gas concentration= high level *256+low level

Calibrate zero point

No return value

Calibrate span point

No return value

3. Calibrate and calculate

The checksum = (invert (byte 1 +... + 7)) + 1

Reading gas concentration:

Send command								
Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8
Start ing byte	Sensor No.	command	-	-	-	-	-	Check value
0xFF	0x01	0x86	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x79

Except byte 0 ,add the other bytes together

$$0x1 + 0x86 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0x87$$

Get the value from the first step, then invert it.

$$0xff - 0x87 = 0x78$$

The second value plus one

$$0x78 + 0x01 = 0x79$$

Program :C language

```

char getChecksum(char *packet)
{
    char i, checksum;
    for( i = 1; i < 8; i++)
    {
        checksum += packet[i];
    }
    checksum = 0xff - checksum;
    checksum += 1;
    return checksum;
}
    
```

7. Notes for maintenance

- 7.1 The sensor should be calibrated regularly. The cycle time is better to be no more than 6 months.
- 7.2 Do not use the sensor in the high dusty environment for long time.
- 7.3 Please use the sensor with correct power supply.
- 7.4 Forbidden to cut the sensor pin.

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd
 Add.: NO.299 Jin Suo Road, National Hi-Tech Zone,
 Zhengzhou, 450001 China
 Tel.: 0086-371-67169097 67169670
 Fax:0371-60932988
 E-mail:sales@winsensor.com

ME2-O₂-Φ 20 Oxygen Sensor

ME2-O₂-Φ20 electrochemical sensor detect gas concentration by measuring current based on the electrochemical principle, which utilizes the electrochemical oxidation process of target gas on the working electrode inside the electrolytic cell, the current produced in electrochemical reaction of the target gas are in direct proportion with its concentration while following Faraday law, then concentration of the gas could be get by measuring value of current.

1. Features

- * Low consumption
- * High precision
- * High sensitivity
- * Wide linear range
- * Good anti-interference ability
- * Excellent repeatability and stability



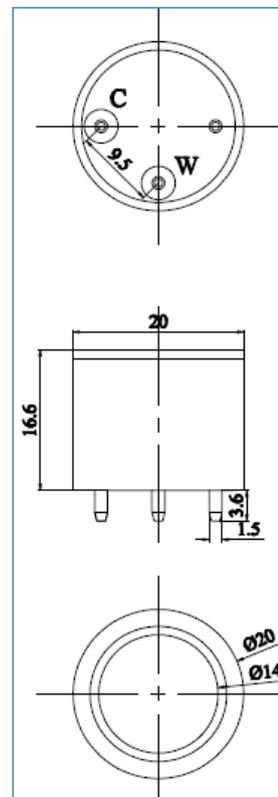
2. Application

Detecting O₂ in mine, industry and environmental protection field.

3. Technical Parameter

Item	Parameter
Detection gas	O ₂
Measurement Range	0~25%Vol
Max detecting concentration	30%Vol
Sensitivity	(0.1~0.3) mA (In air)
Response time (T ₉₀)	≤15S
Load resistance (recommended)	10kΩ
Repeatability	<2% output value
Stability (/ month)	<2%
Zero drift (-20℃~40℃)	≤0.1%vol
Storage temperature	-20℃~50℃
Storage Humidity	0%~99% RH
Pressure range	normal atmosphere ± 10%
Anticipated using life	2 years

4. External dimension



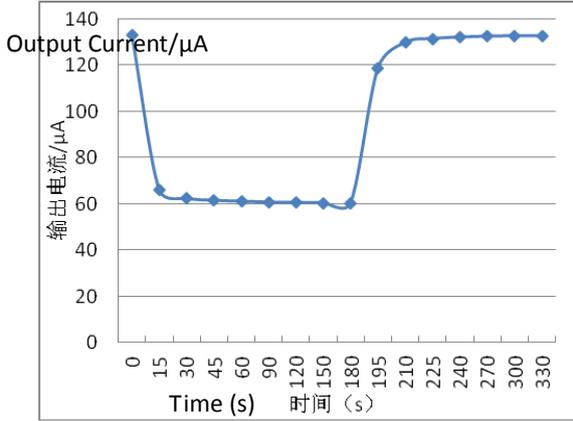


精盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

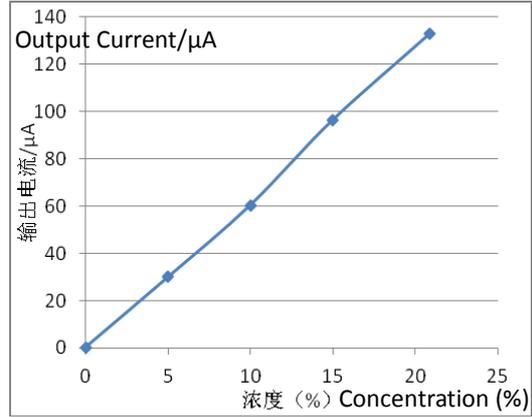
www.winsen-sensor.com

5.Characterization

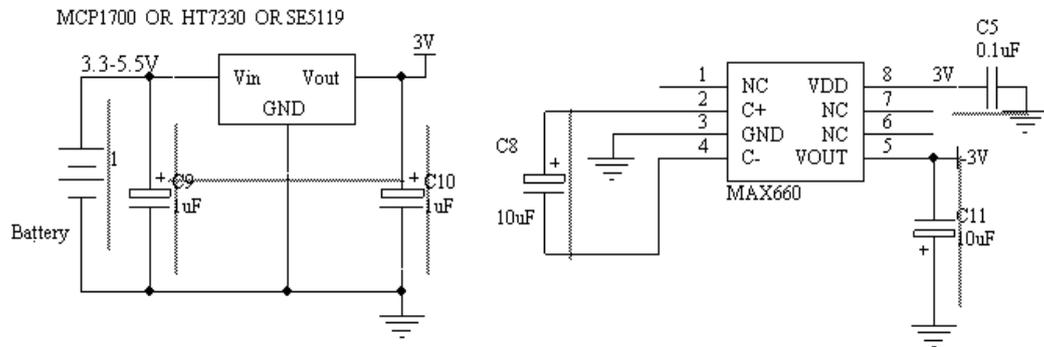
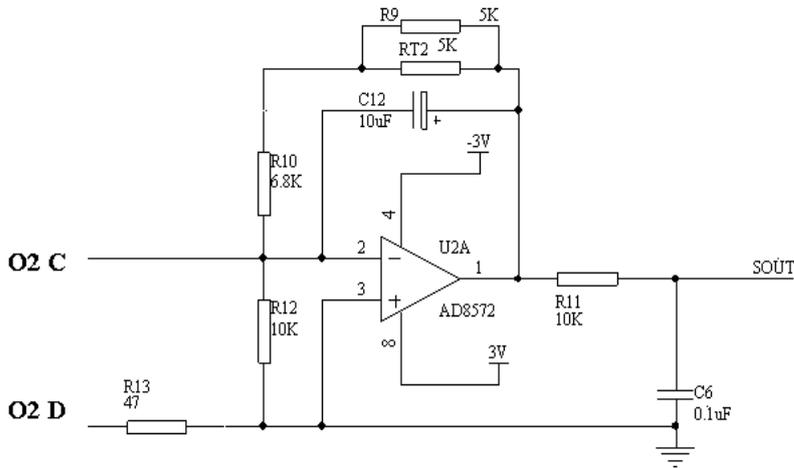
Features of Sensitivity, response and output signal



Data graph of concentration linearity features



6.Basic circuit



Tel: 86-371-67169097

Fax: 86-371-60932988

Email: sales@winsensor.com

Leading gas sensing solutions supplier in China

7. Application Notes:

- Sensor shall Avoid organic solvent, coatings, medicine, oil and high concentration gases;
- All ME Sensors shall not be encapsulated completely by resin materials, and shall not immerse in pure oxygen environment, otherwise, it will damage the function of sensor;
- All ME sensors shall not be applied in corrosive gas environment, or the sensor will be damaged;
- Please test the sensitivity of gas sensors in clean atmosphere;
- Sensors Shall be avoided to face the gas, which flow directly from front side;
- To avoid to bend and break of pins;
- Blowhole of the sensor should not be blocked and polluted, which will cause the sensitivity decrease;
- Excessive impact or vibration should be avoided;
- Do not use the sensor when the shell is damaged;
- It takes some time for the sensor to return to normal state After applied in high concentration gas;
- Do not take apart the sensor, otherwise electrolyte leakage can cause sensor damage;
- Working electrode and reference electrode of the sensor shall be in short circuit when stored.;
- To preheat over 48hs before using and soldering forbidden;

Note: To keep continual product development, we reserve right to change design features without prior notice !

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

Add.: NO.299 Jin Suo Road, National Hi-Tech Zone,
Zhengzhou, 450001 China

Tel.: 0086-371-67169097 / 67169670

Fax: 0371-60932988

E-mail: sales@winsensor.com

Website: www.winsen-sensor.com

TECHNICAL DATA

MQ-4 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to CH₄, Natural gas.
- * Small sensitivity to alcohol, smoke.
- * Fast response . * Stable and long life * Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of CH₄, Natural gas, LNG, avoid the noise of alcohol and cooking fumes and cigarette smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
P _L	Load resistance	20K Ω	
R _H	Heater resistance	33 Ω ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 750mw	

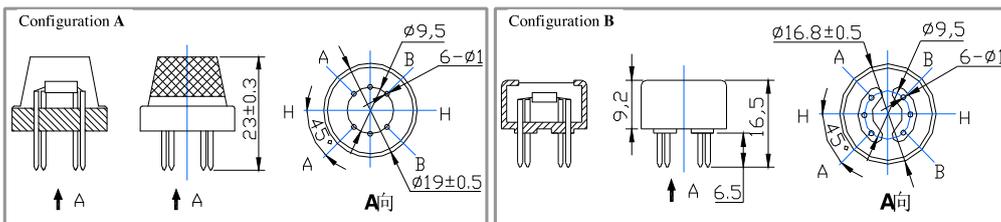
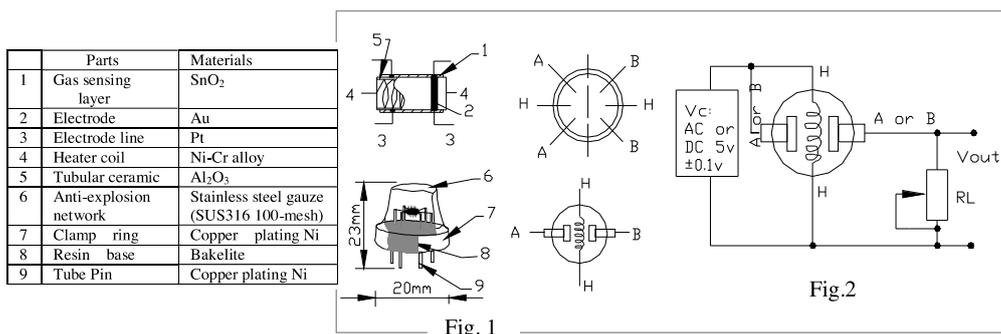
B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-10℃-50℃	
Tas	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Ramark 2
R _s	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (1000ppm CH ₄)	Detecting concentration scope: 200-10000ppm CH ₄ , natural gas
α (1000ppm/ 5000ppm CH ₄)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20℃ ± 2℃ Humidity: 65%±5%	V _c :5V±0.1 V _H : 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

D. Strucyure and configuration, basic measuring circuit



Structure and configuration of MQ-4 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-4 have 6 pin, 4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

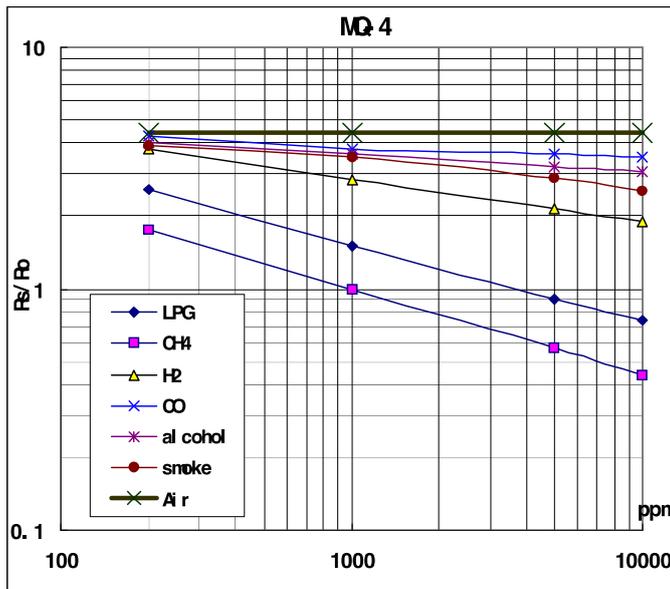


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-4

Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-4 for several gases.

in their: Temp: 20°C,
Humidity: 65%,
O₂ concentration 21%
RL=20k Ω

R₀: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in the clean air.
R_s:sensor resistance at various concentrations of gases.

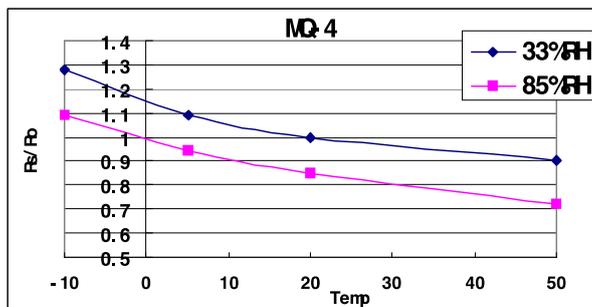


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-4 on temperature and humidity.
R₀: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in air at 33%RH and 20 degree.

R_s: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in air at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-4 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 5000ppm of CH₄ concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about 20K Ω (10K Ω to 47K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.