



Sviluppo di un sistema di monitoraggio e controllo remoto nelle fasi di maturazione del compost: la sensoristica per il monitoraggio del processo di compostaggio - il CompostTalker

Andrea Vannini

SVILUPPO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO REMOTO NELLE FASI DI MATURAZIONE DEL COMPOST: LA SENSORISTICA PER IL MONITORAGGIO DEL PROCESSO DI COMPOSTAGGIO - IL COMPOSTTALKER

Andrea Vannini (Dipartimento per la Innovazione nei Sistemi Biologici Agroalimentari e Forestali dell'Università degli studi della Tuscia)

Settembre 2017

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 ed interazione con altri vettori energetici

Progetto: Sviluppo di un modello integrato di Smart District Urbano

Obiettivo: Gestione sostenibile e circolare dell'ambiente urbano

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “

Sviluppo di un sistema di monitoraggio e controllo remoto nelle fasi di maturazione del compost

Responsabile scientifico ENEA: dr. Pier Giorgio Landolfo

Responsabile scientifico Università: prof. Andrea Vannini

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	7
2.1 RISULTATI DELLA RICERCA BIBLIOGRAFICA SU PARAMETRI DI QUALITÀ E INDICI DI MATURAZIONE DEL COMPOST DEL COMPOST E STATO DELL'ARTE DI SENSORI E SOLUZIONI TECNOLOGICHE UTILIZZABILI IN RETI IoT	7
2.2 ASSEMBLAGGIO DELLA COMPONENTE SENSORISTICA E DELLE COMPONENTI DI GESTIONE DATI IN UN SISTEMA MULTI-SENSORE (COMPOST TALKER).....	11
2.3 UTILIZZO IN AMBIENTE CONFINATO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA MULTI SENSORE	12
3 CONCLUSIONI	15
4 ALLEGATI	16
4.1 ALLEGATO 1: SCHEDA SENSORE MQ4	16
4.2 ALLEGATO 2: SCHEDA SENSORE MHZ19	17
4.3 ALLEGATO 3: SCHEDA SENSORE MG811	18
4.4 ALLEGATO 4: SCHEDA SENSORE DHT22	18
4.5 ALLEGATO 5: SCHEDA 'RADIO MODULE' RFM95	19
4.6 ALLEGATO 6: SCHEDA GSM MODEM	20
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	21
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	22
7 APPENDICE.....	24

Sommario

Obiettivo di questa attività di ricerca in collaborazione tra ENEA e l'Università della Tuscia, Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici Agroalimentari e Forestali è stato quello di sviluppare un prototipo multi-sensore per il monitoraggio delle fasi di maturazione del compost attraverso l'acquisizione dei parametri essenziali per la valutazione del processo quali temperatura, umidità e respirazione microbica ed emissioni di GHG come il metano. Si è trattato di progettare realizzare e sperimentare un prototipo di sistema multi-sensore capace di rilevare i dati essenziali durante le fasi di compostaggio e maturazione dei cumuli ed elaborarli e renderli disponibili su apparati di diverso genere (smartphone, PC, tablet, etc.). La prima fase dell'attività ha riguardato il reperimento dei riferimenti bibliografici (inclusa 'grey literature') in particolare su 3 argomenti: a) parametri di maturazione; b) sensoristica per il monitoraggio; c) moduli di trasmissione e gestione del dato

La seconda fase dell'attività ha riguardato l'assemblaggio della componente sensoristica e delle componenti di gestione dati in un sistema multi-sensore per il controllo dei parametri del processo di compostaggio.

L'ultima fase del progetto ha riguardato la sperimentazione in ambiente confinato del sistema multi-sensore per verificarne la funzionalità e la trasmissione del dato. Le prove sono state svolte presso l'Azienda Didattico-Sperimentale dell'Università degli Studi della Tuscia. Si è operato secondo 2 tipologie di installazione del sistema multi-sensore: i) collocazione all'interno del cumulo; ii) collocazione all'esterno del cumulo, permettendo la misurazione dei parametri attraverso un'asta cava la cui estremità è stata inserita in profondità nel cumulo.

In questa fase i dati venivano trasmessi ad un PC portatile collocato all'interno di una serra a pochi metri dal cumulo.

In questa fase sono state assemblate diverse versioni del sistema ottimizzando la scelta dei singoli sensori. Le prove di misura hanno dato risultati soddisfacenti in termini acquisizione e trasmissione del dato.

1 Introduzione

Con riferimento all'Accordo di Collaborazione tra ENEA e l'Università della Tuscia, Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici Agroalimentari e Forestali (DIBAF) per l'attività di ricerca dal titolo: "Sviluppo di un sistema di monitoraggio e controllo remoto nelle fasi di maturazione del compost", inserito nell'ambito del Progetto: D.6 "Sviluppo di un modello integrato di Smart District Urbano" dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA Piano Annuale di Realizzazione 2016, si raccoglie nel presente documento il rapporto sulle attività svolte al 30 settembre 2017. In particolare, tali attività riguardano la gestione e rigenerazione della risorsa dei rifiuti e il loro impatto sulla efficienza e sulla sicurezza del sistema elettrico. Per quanto attiene al tema dei rifiuti, uno dei problema fondamentali è connesso al recupero del rifiuto organico. La produzione di ammendanti attraverso la fermentazione aerobica di matrici organiche, il cosiddetto compostaggio, è oramai pratica consolidata in tutti i territori dove viene applicata la raccolta differenziata dei rifiuti urbani (e non solo). La matrice organica rappresenta oltre 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. Applicando un principio di prossimità alla gestione del rifiuto organico effettuato il più vicino possibile ai luoghi di produzione che è il trend attuale, nel contesto di una "comunità smart" questa funzione può essere svolta con una rete di piccoli compostatori elettromeccanici che in relazione al D.M. n.266. del 29/12/2016 possono essere utilizzati sia in contesto di sistemi di compostaggio locale che di comunità. Le criticità di queste macchine elettromeccaniche riguardano la qualità delle matrici in entrata (assenza di sostanze contaminanti da matrici improprie) e la qualità del prodotto finito. 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. 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. L'individuazione del punto di maturazione del compost in queste macchine e in cumulo nella fase finale del processo, rappresenta un passaggio critico con conseguenze rilevanti sulla gestione e ottimizzazione del processo quali consumi elettrici maggiori, utilizzo del compost, fitotossicità, cattivo odore. La misura della respirazione all'interno della macchina durante il processo e del cumulo per la completa maturazione attraverso il consumo di ossigeno o della produzione di anidride carbonica (Sotto a 10 mg C-CO₂/g il compost si ritiene maturo) presenta tuttora limiti tecnologici e di gestione delle sonde (sensori) che misuravano il dato. L'introduzione nei processi produttivi delle reti IoT (Internet of Things) e la possibilità di gestire da remoto il flusso di dati acquisiti da numerosi sensori 'low cost' ha aperto nuove opportunità di gestione, archiviazione ed elaborazione anche spazializzata del dato finora estremamente complicate. Le reti IoT vengono oggi utilizzate nella 'precision farming' in agricoltura ma hanno enormi potenzialità anche in altre applicazioni che riguardano sistemi e processi associati all'ambiente.

Obiettivo di questo studio è stato quello di sviluppare un prototipo multi-sensore per il monitoraggio delle fasi di maturazione del compost attraverso l'acquisizione dei parametri essenziali per la valutazione del processo quali temperatura, umidità e respirazione microbica ed emissioni di GHG come il metano. Si tratta di progettare e realizzare un sistema multi-sensore capace di rilevare i dati essenziali durante le fasi di compostaggio e maturazione dei cumuli ed elaborarli e renderli disponibili su apparati di diverso genere (smartphone, PC, tablet, etc.)

Le attività hanno previsto lo sviluppo da parte del Dipartimento DIBAF di alcuni prototipi di sensori per l'acquisizione del dato di temperatura, umidità e respirazione microbica che soddisfino alcuni requisiti quali: la qualità del dato acquisito, la trasmissibilità del segnale, la funzionalità e durabilità dei sensori

anche nelle condizioni estreme di temperatura, umidità e 'aggressività' microbica verificabili nella massa in maturazione.

Il lavoro è stato strutturato in più fasi.

La prima fase ha riguardato una ricerca bibliografica su parametri di qualità e indici di maturazione del compost e sullo stato dell'arte di sensori utilizzabili in reti IoT, applicabili per la finalità proposta tenendo in considerazione i requisiti sopra esposti. Questa fase ha considerato, oltre ai sensori già disponibili sul mercato e i prototipi descritti in letteratura, anche la componentistica presente sul mercato per l'assemblaggio di sensori funzionali all'obiettivo preposto.

La seconda fase ha riguardato l'assemblaggio di alcuni prototipi di sensori e delle componenti di gestione dati in un sistema multisensore per il controllo dei parametri del processo di compostaggio (temperatura, umidità, respirazione microbica, emissioni di GHG) e l'avvio della sperimentazione per verificare l'efficacia e le prestazioni.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Risultati della ricerca bibliografica su parametri di qualità e indici di maturazione del compost del compost e stato dell'arte di sensori e soluzioni tecnologiche utilizzabili in reti IoT

La prima fase del progetto ha riguardato il reperimento dei riferimenti bibliografici su : i) parametri di qualità dei compost e indici di maturazione; ii) sensoristica e soluzioni tecnologiche per l'analisi e monitoraggio in continuo dei parametri del processo di compostaggio, acquisizione, trasmissione e gestione del dato per reti IoT.

Parametri di qualità dei compost e indice di maturazione

La ricerca bibliografica ha riguardato inizialmente l'acquisizione di informazioni sui parametri adottati e adottabili per la valutazione dei parametri di qualità dei compost. A tale riguardo Barnel et al. [1] 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
	Fitotossicità	Biomassa microbica 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

Parametri	Valore	Riferimento bibliografico
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 [2], il rapporto C/N [3][4][5], il contenuto in ioni ammonio o nitrati [6][7]. 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 [8] 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. E' 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 [9], 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)

<i>C/N ≤ 25</i>				
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. E' per questa ragione che uno dei parametri di riferimento scelti per lo sviluppo della piattaforma multi sensore di rilievo e valutazione del processo di compostaggio è appunto la produzione di CO₂. A tale sensore sono stati aggiunti un sensore di umidità, in quanto il contenuto in acqua del cumulo è direttamente associato all'attività di fermentazione microbica, un sensore di temperatura (anch'esso indici di attività microbica), e un sensore per il metano al fine di individuare eventuale fenomeni di fermentazione anaerobica non desiderabili.

Sensoristica e soluzioni tecnologiche

La ricerca bibliografica ha evidenziato che a tutt'oggi non esistono sistemi di monitoraggio in continuo di CO₂ e CH₄ per cumuli di compost. La maggior parte delle sperimentazioni hanno riguardato misure in laboratorio [10][11].

Il monitoraggio dei parametri di stabilità in relazione alla evoluzione, nel nostro caso di CO₂ e 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 [12], elettroliti solidi [13][14], fibre ottiche [15], diodi laser [16] e rivelatori a infrarossi non dispersivi (NDIR) per monitorare la concentrazione di CO₂ [17].

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 [17].

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 [17][18][19]. Solo pochi studi nel passato sono concentrati sui metodi di prestazione e calibrazione di piccoli sensori commerciali di CO₂. Tuttavia recentemente Yasuda, Yonemura and Tani [20] e Liu et al. [21] 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 [22]. Alla luce di queste considerazioni, per quanto riguarda la sensoristica, 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	CO ₂	300-5000 ppm	5V	PWM/Serial
MG811	CO ₂	300-10000 ppm	6V	Analog
MQ4	CH ₄	300-10000 ppm	6V	Analog
DHT22	T, Umidità relativa	-40 ÷ +125 ± 0.5 °C 0 – 100 % ± 2-5%	3.3 – 5V	Digital
humisol	Umidità suolo (%vol)	10-50% ± 5%	-	Digital

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 [23]. 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 [24]. 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 Vejlgard et al.(2017). 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 una flash memory card (8Mbit) per la memorizzazione e di una batteria.

2.2 Assemblaggio della componente sensoristica e delle componenti di gestione dati in un sistema multi-sensore (compost Talker)

La seconda fase del progetto ha riguardato l'assemblaggio della componente sensoristica e delle componenti di gestione dati in un sistema multi-sensore per il controllo dei parametri del processo di compostaggio.

Il sensore di CO₂ utilizzato in questo primo assemblaggio è il modello MHZ19 con un sensitività compresa tra 300 e 5000 ppm. Per quanto riguarda temperatura e umidità, in questa prima fase è stato utilizzato il sensore DHT22 (Figura 1).

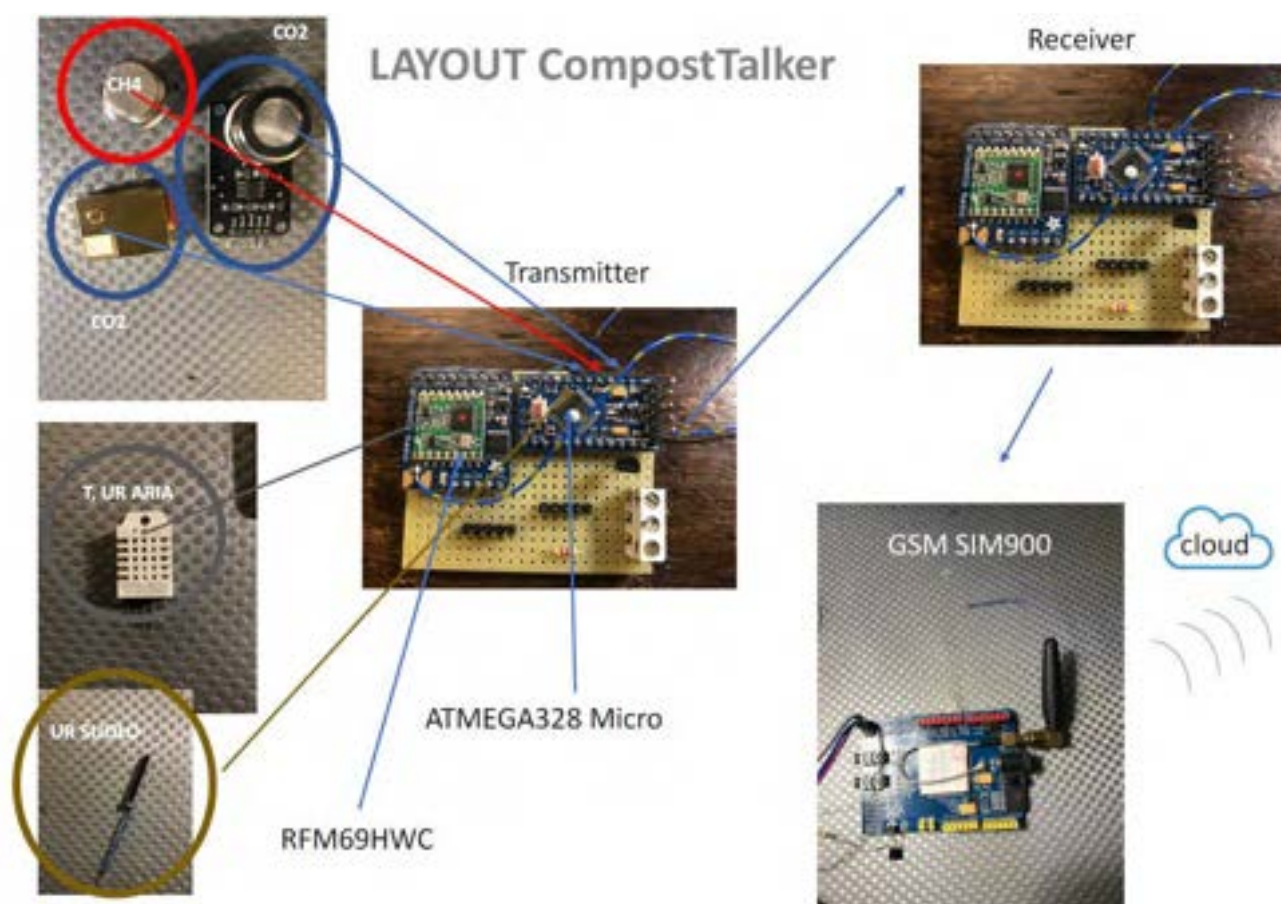


FIGURA 1. Layout del sistema multisensore - Compost Talker

La versione attuale del sistema è una pre-prototipale che è stata utilizzata in cumuli in ambiente confinato per verificarne la funzionalità (Figura 2).



FIGURA 2. Il sistema multi-sensore assemblato nella versione pre-prototipale

2.3 Utilizzo in ambiente confinato del prototipo del sistema multi sensore

La terza fase del progetto ha riguardato l'utilizzo in ambiente confinato del sistema multi-sensore per verificarne la funzionalità e la trasmissione del dato. Le prove sono state svolte presso l'Azienda Didattico-Sperimentale dell'Università degli Studi della Tuscia. Si è deciso di operare secondo 2 tipologie di installazione del sistema multi-sensore: i) collocazione all'interno del cumulo; ii) collocazione all'esterno del cumulo permettendo la misurazione dei parametri attraverso un'asta cava la cui estremità è stata inserita in profondità nel cumulo (Figura 3).



FIGURA 3. Sistema multi-sensore collocato su asta cava inserita nel cumulo

In questa fase i dati vengono trasmessi ad un PC portatile collocato all'interno di una serra a pochi metri dal cumulo.

Le prove di misura hanno dato risultati soddisfacenti in termini acquisizione e trasmissione del dato per tutti i parametri eccetto la CO₂ in quanto il sensore MHZ19 è andato velocemente in saturazione (Figura 4).

Le prove in campo hanno evidenziato i seguenti risultati:

1. E' possibile trasmettere con buon segnale di ricezione ($> -65\text{dB}$) dall'interno del cumulo di compost all'esterno (valori più positivi significano maggiore segnale).
2. Sono stati misurati i parametri di CO_2 , CH_4 , Temperatura e umidità dell'aria. Un andamento dei dati si vede in Figura 3. In particolare la CO_2 è saturata ($>5000\text{ ppm}$) dopo poco l'inserzione nel cumulo, mentre il CH_4 mostra un andamento di crescita regolare così pure la temperatura, mentre l'umidità dell'aria satura velocemente. Il segnale RSS mostra una riduzione subito dopo l'inserzione nel cumulo per poi rimanere costante fino alla sua rimozione in cui torna ad aumentare. N certo degrado del segnale si nota a circa metà dell'esperimento, comunque entro livelli ancora accettabili per la trasmissione. Infatti non si sono avuti pacchetti di dati persi.

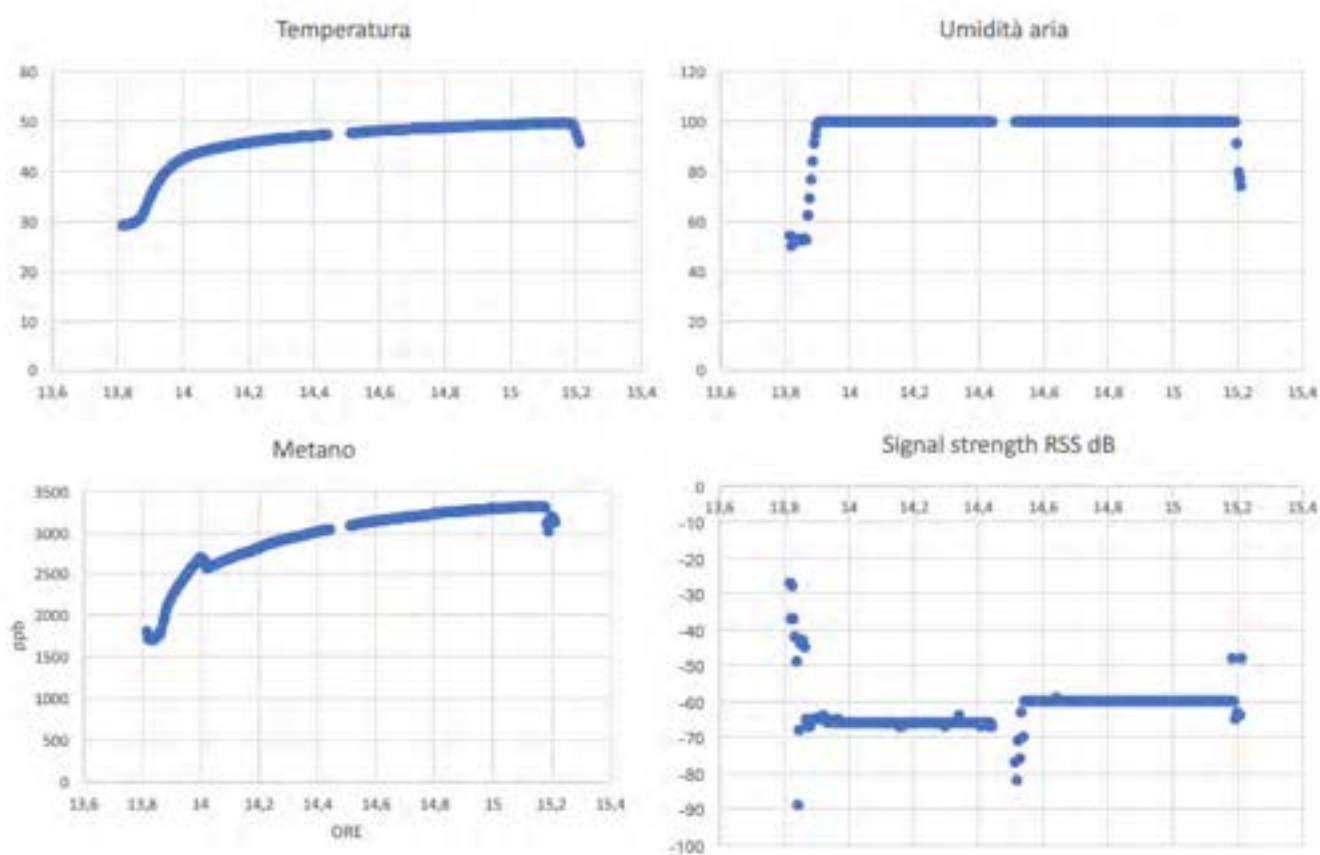
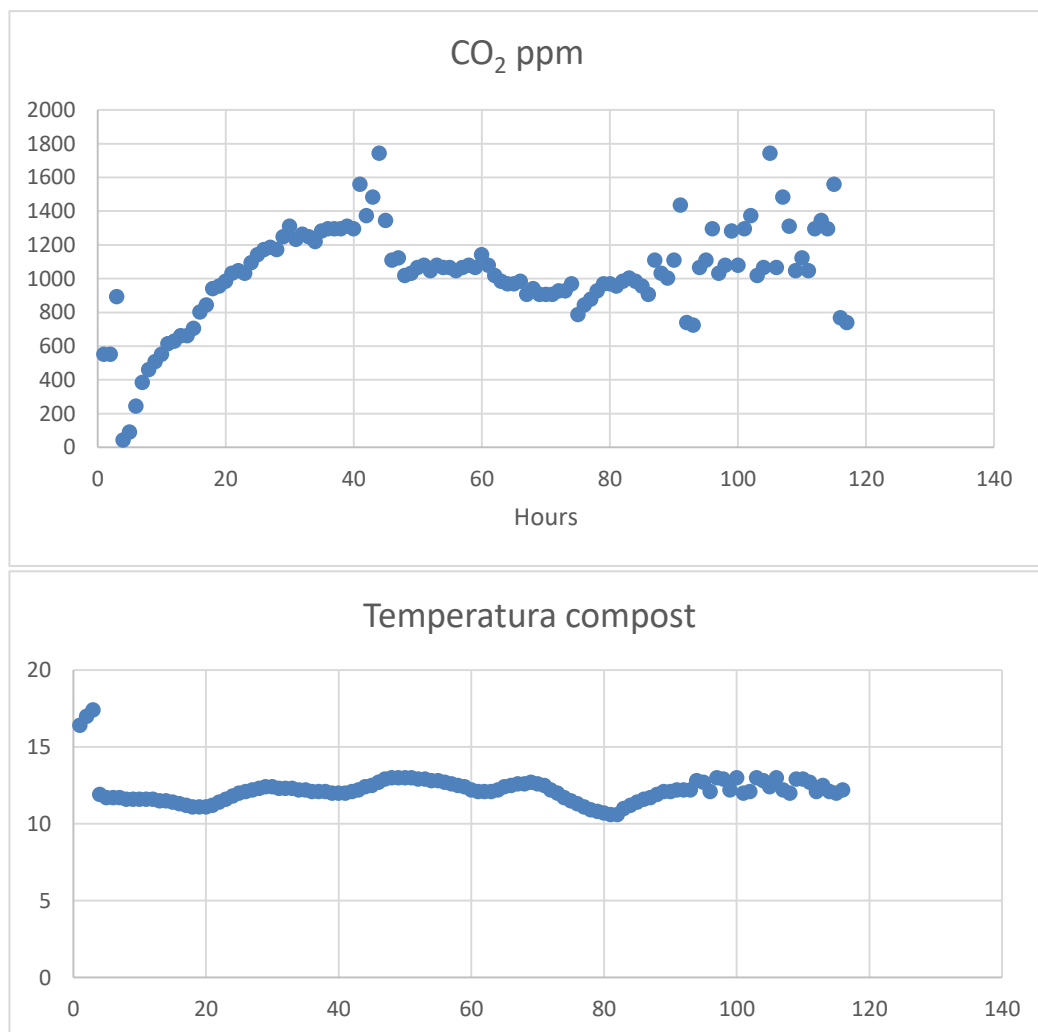


FIGURA 4. Andamento della temperatura, umidità, metano e della trasmissione del dato, misurati dal sistema multi-sensore collocato all'interno del cumulo

Sostituzione sensore CO_2 MHZ19 con MG811

Le attività sono proseguite mediante il test di nuovi sensori di CO_2 . In particolare è stato utilizzato il sensore MG811 per la CO_2 che ha un range di operazione fino a 10000ppm. Il sensore è montato su una 'evaluation board' e si presta ad una successiva ingegnerizzazione. Il consumo di corrente è di circa 150 mA in quanto necessita di riscaldamento. Le prove sono state eseguite su un cumulo all'aperto con il sensore inserito a circa un metro di profondità. In questo caso, rispetto alle prove precedenti, il microcontrollore e la parte di trasmissione dati sono all'esterno del cumulo evitando il problema della trasmissione attraverso il cumulo, comunque risolto mediante tecnologia LoRa a 432 MHz.

In Figura 5 si può notare che l'andamento della CO₂ aumenta nel tempo (dopo circa 2 giorni dall'inserimento per poi stabilizzarsi). La temperatura è comunque stabile con poche variazioni diurne ma, in relazione alla stagione piuttosto bassa da non permettere una significativa attività microbica.



[FIGURA 5.](#) Andamento CO₂ con il nuovo sensore MG811 e della temperatura

Il consumo in corrente del sensore è piuttosto elevato per essere alimentato a batteria per periodi lunghi, in quanto il sensore funziona con una reazione elettrochimica che avviene ad alta temperatura. Per questo motivo si stanno provando altri sensori come il MH-Z14 e MH-Z16 che funzionano con la tecnica NIR a dispersione e quindi a basso consumo di corrente.

3 Conclusioni

Con questa attività di ricerca è stato progettato e sviluppato un prototipo di sistema multi-sensore per il monitoraggio delle fasi di maturazione del compost attraverso l'acquisizione dei suoi parametri essenziali al fine di poterlo utilizzare, in un contesto di una "comunità smart", per il monitoraggio in continuo dei compostatori elettromeccanici, il sistema è basato sull'introduzione nei processi produttivi delle reti IoT.

E' stato implementato il protocollo GSM/GPRS per la trasmissione dei dati su *cloud*. Quindi il sensore a regime invia dati via radio LoRA ad un concentratore che a sua volta raccoglie altri sensori (fino a 256 nella configurazione attuale, comunque espandibile per multipli di 256 ed eventualmente implementabile in configurazione mesh).

In particolare, sono stati individuati i sensori e la piattaforma di gestione per l'assemblaggio del sistema multisensore. Sono state assemblate diverse versioni del sistema ottimizzando la scelta dei singoli sensori e il sistema di trasmissione dei dati.

Le diverse versioni sono state testate in successione in un cumulo di compost in ambiente confinato e valutata la qualità e trasmissione del dato.

Gli sviluppi futuri del prototipo al fine di ottimizzarne l'affidabilità prevede di:

1. Assemblare il prototipo definitivo.
2. Valutare la funzionalità del prototipo in cumulo.
3. Ottimizzare il software di gestione.

La fase conclusiva riguarderà l'upscaling tramite la messa in opera di una rete IoT.

4 ALLEGATI

4.1 ALLEGATO 1: SCHEDA SENSORE MQ4

Model			MQ-4
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Bakelite, Metal cap
Target Gas			Methane
Detection range			300~10000ppm(CH ₄)
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _L	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	26Ω±3Ω(room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤950mW
	Sensitivity	S	R _s (in air)/R _s (in 5000ppmCH ₄)≥5
	Output Voltage	V _S	2.5V~4.0V (in 5000ppm CH ₄)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{s0.0009%} /R _{s0.0001%} CH ₄)
Standard test conditions	Tem. Humidity	20℃±2℃; 55%±5%RH	
	Standard test circuit	V _L :5.0V±0.1V; V _H :5.0V±0.1V	
	Pre-heat time	Over 48 hours	

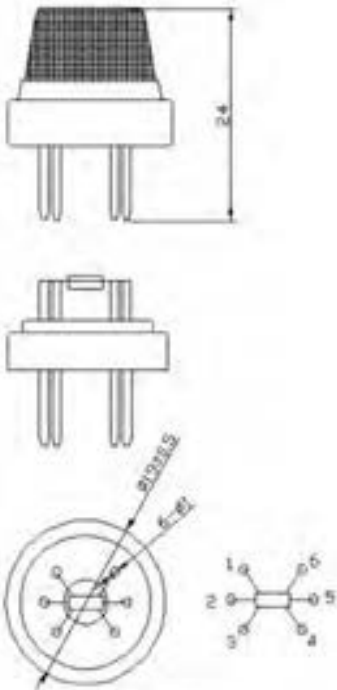


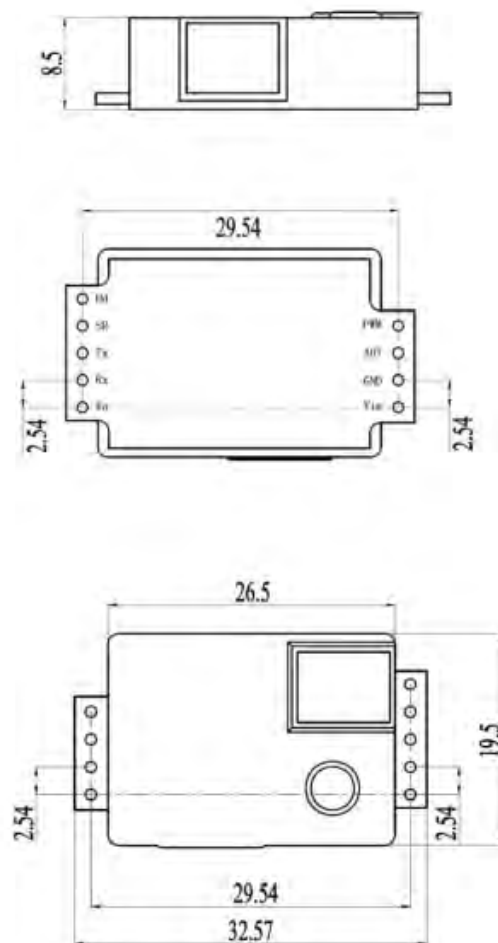
Fig1.Sensor Structure
 Unit: mm

4.2 ALLEGATO 2: SCHEDA SENSORE MHZ19

CO2 Sensor MHZ19

4. Technical Parameters and Structure

Product Model	MH-Z19
Target Gas	CO2
Working voltage	3.6 ~ 5.5 V DC
Average current	< 18 mA
Interface level	3.3 V
Measuring range	0 ~ 0.5% VOL optional
Output signal	UART
	PWM
Preheat time	3 min
Reponse Time	$T_{90} < 60$ s
Working temperature	0 ~ 50 °C
Working humidity	0 ~ 95% RH (No condensation)
Dimension	33 mm×20 mm×9 mm (L×W×H)
Weight	21 g
Lifespan	> 5 years



4.3 ALLEGATO 3: SCHEDA SENSORE MG811

MG-811 Specifications

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	REMARKS
V _H	Heating Voltage	6.0±0.1V	AC or DC
R _H	Heating Resistor	~30.0 Ohm	At room temperature
I _H	Heating Current	~200mA	
P _H	Heating Power	~1200mW	
T _{ao}	Operating Temperature	-20 – 50°C	
T _{as}	Storage Temperature	-20 – 70°C	
EMF	Output	100-600mV	400-10000ppm CO2

4.4 ALLEGATO 4: SCHEDA SENSORE DHT22

DHT22 T and Ur Sensor



TECHNICAL DETAILS

- Low cost
- 3 to 5V power and I/O
- 2.5mA max current use during conversion (while requesting data)
- Good for 0-100% humidity readings with 2-5% accuracy
- Good for -40 to 80°C temperature readings ±0.5°C accuracy
- No more than 0.5 Hz sampling rate (once every 2 seconds)
- Body size 27mm x 59mm x 13.5mm (1.05" x 2.32" x 0.53")
- 4 pins, 0.1" spacing
- Weight (just the DHT22): 2.4g

4.5 ALLEGATO 5: SCHEDA 'RADIO MODULE' RFM95



Features

- LoRa™ Modem.
- 168 dB maximum link budget.
- +20 dBm - 100 mW constant RF output vs. V supply.
- +14 dBm high efficiency PA.
- Programmable bit rate up to 300 kbps.
- High sensitivity: down to -148 dBm.
- Bullet-proof front end: IIP3 = -12.5 dBm.
- Excellent blocking immunity.
- Low RX current of 10.3 mA, 200 mA register retention.
- Fully integrated synthesizer with a resolution of 61 Hz.
- FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ and OOK modulation.
- Built-in bit synchronizer for clock recovery.
- Preamble detection.
- 127 dB Dynamic Range RSSI.
- Automatic RF Sense and CAD with ultra-fast AFC.
- Packet engine up to 256 bytes with CRC.
- Built-in temperature sensor and low battery indicator.
- Module Size : 16*16mm

4.6 ALLEGATO 6: SCHEDA GSM MODEM

SIM900

GSM / GPRS



SIMCom presents an ultra compact and reliable wireless module-SIM900. This is a complete Quad-band GSM/GPRS module in a SMT type and designed with a very powerful single-chip processor integrating AMR926EJ-S core, allowing you to benefit from small dimensions and cost-effective solutions.

Featuring an industry-standard interface, the SIM900 delivers GSM/GPRS 850/900/1800/1900MHz performance for voice, SMS, Data, and Fax in a small form factor and with low power consumption. With a tiny configuration of 24mm x 24mm x 3 mm, SIM900 can fit almost all the space requirements in your M2M applications, especially for slim and compact demands of design.

NB! SIM900 is EOL now. Limited quantity available. Please consider to use SIM800x series modules.

Downloads

SIM900

General features

- Quad-Band 850/900/1800/1900 MHz
- GPRS multi-slot class 10/8
- GPRS mobile station class B
- Compliant to GSM phase 2/2+
 - Class 4 (2 W @850/ 900 MHz)
 - Class 1 (1 W @ 1800/1900MHz)
- SAIC (Single Antenna Interference Cancellation) support
- Dimensions: 24 x 24 x 3 mm
- Weight: 3.4g
- Control via AT commands (GSM 07.07 ,07.05 and SIMCOM enhanced AT Commands)
- SIM application toolkit
- Supply voltage range : 3.2 ... 4.8V
- Low power consumption: 1.0mA (sleep mode&BS-PA-MFRMS=9)
- Operation temperature: -40°C to +85 °C

Specifications for Voice

- Tricodex
 - Half rate (HR)
 - Full rate (FR)
 - Enhanced Full rate (EFR)
- AMR
 - Half rate (HR)
 - Full rate (FR)
- Hands-free operation (Echo suppression)

Specifications for Fax

- Group 3, class 1

Interfaces

- Interface to external SIM 3V/ 1.8V
- Analog audio interface
- RTC backup
- SPI interface (option)
- Serial interface
- Antenna pad
- I2C
- GPIO
- PWM
- ADC

Specifications for GPRS Data

- GPRS class 10: max. 85.6 kbps (downlink)
- PBCCH support
- Coding schemes CS 1, 2, 3, 4
- PPP-stack

Compatibility

- AT cellular command interface

Specifications for CSD Data

- USSD
- Non transparent mode

Certifications:

- CE
- FCC
- GCF
- PTCRB
- IC
- ICASA
- ROHS
- REACH
- NCC
- Anatel
- A-TICK
- ATEX

Specifications for SMS via GSM/GPRS

- Point to point MO and MT
- SMS cell broadcast
- Text and PDU mode

Carrier Approvals

- Rogers
- Oranges
- AT&T
- Vodafone
- Deuts Telecom
- Telia Sonera
- TIM
- GMA

Software features

- 0710 MUX protocol
- Embedded TCP/UDP protocol
- FTP/HTTP

Special firmware

- Embedded AT
- FOTA
- MMS

5 Abbreviazioni ed acronimi

NIR- Near Infra Red

IoT – Internet of Things

GHG – Greenhouse Gas

GSM – Global System for Mobile Communications

GPRS – General Packet Radio Service

SMT - Surface Mount Technology

PCB – Printed Circuit Board

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. M.P. Bernal, J.A. Albuquerque, R. Moral "Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review" *Bioresource Technology* 100 (2009), 5444-5453.
2. S. Zmora-Nahum, O. Markovitch, J. Tarchitzky, Y. Chen "Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity" *Soil Biol. Biochem.* 37(2005) , 2109– 2116.
3. V.Chanyasak, H. Kubota "Carbon/organic nitrogen ratio in water extract as measure of compost degradation" *J. Ferment. Technol.* 59 (1981), 215–219.
4. S.P. Mathur, G. Owen, H. Diné, M. Schnitzer "Determination of compost biomaturity" Literature review. *Biol. Agric. Hortic.* 10(1993), 65–85.
5. M.P. Bernal, C. Paredes, M.A. Sánchez-Monedero, J. Cegarra "Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes" *Bioresour. Technol.* 63(1998), 91–99.
6. F. Zucconi, M. de Bertoldi "Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste" In: M. de Bertoldi, M.P. Ferranti, P. L'Hermite, F. Zucconi (Eds.), *Compost: Production, Quality and Use*. Elsevier, Barking, (1987) pp. 30–50.
7. L.R. Cooperband, A.G. Stone, M.R. Fryda, J.L. Ravet "Relating compost measures of stability and maturity to plant growth" *Compost Sci. Util.* 11(2003), 113– 124.
8. N.V. Hue, N.V., J. Liu "Predicting compost stability" *Compost Sci. Util.* 3(1995), 8–15.
9. F. Zucconi, A. Pera, M. Forte, M. de Bertoldi "Evaluating toxicity of immature compost" *Biocycle* 22(1981), 54–57.
10. I. Darby, C.Y. Xu, H.M. Wallace, S. Joseph, B. Pace, S.H. Bai "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(2016), 11267–11278.
11. T.G. Poulsen "Oxygen and carbon dioxide distribution and movement" In: *Passively Aerated Compost Piles, Compost Science and Utilization*, 19(2011), 25–32.
12. T. Asakawa, N. Kanno, K. Tonokura "Diode laser detection of greenhouse gases in the near-infrared region by wavelength modulation spectroscopy: Pressure dependence of the detection sensitivity" *Sensors*, 10(2010), 4686–4699.
13. Z. Jiao, F. Chen, R. Su, X. Huang, W. Liu, J. Liu "Study on the Characteristics of Ag Doped CuO-BaTiO₃ CO₂ Sensors" *Sensors*, 2(2002), 366–373.
14. C.S. Chu, Y.L. Lo. "Fiber-optic carbon dioxide sensor based on fluorinated xerogels doped with HPTS" *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 129(2008), 120–125.
15. G.G. Mandayo, J. Herran, I. Castri-Hurtado, E. Castano "Performance of a CO₂ impedimetric sensor prototype for air quality monitoring" *Sensors*, 11(2011), 5047–5057.
16. G.F. Fine. L.M. Cavanagh, A. Afonja, R. Bibions "Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring" *Sensors* 10(2010), 5469–5502.

17. Y. Wang, M. Nakayama, M. Yagi "The NDIR CO₂ monitor with smart interface for global networking" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54(2005), 1634–1639.
18. M. Segal, M., E. Amico Di Meane, M. Plassa "Stability of a NDIR analyser for CO₂ at atmospheric concentration" Ann Chim, 92(2002), 897–902.
19. R.J. Francey, L.P. Steele "Measuring atmospheric carbon dioxide – the calibration challenge" Accreditation and Quality Assurance, 8(2003), 200–204.
20. T. Yasuda, S. Yonemura, A. Tani "Comparison of the characteristics of small commercial NDIR CO₂ sensor models and development of a portable CO₂ measurement device" Sensors, 12(2012), 3641–3655.
21. Y. Liu, X. Ni, Y. Wu, W. Zhang "Study on effect of temperature and humidity on the CO₂ concentration measurement" IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 81(2017), 12083.
22. P.K. Sekhar, J. Kisar, E.L. Brosha, C.L. Creller "Development and testing of an electrochemical methane sensor" Sensors and Actuators, B: Chemical, 228(2016), 162–167.
23. B. Vejlgaard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I.Z. Kovacs, P. Mogensen, M. Sorensen "Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT" in 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, (2017) 1–5.
24. J.T. Lim, Y. Han "Spreading Factor Allocation for Massive Connectivity in LoRa Systems" IEEE Communications Letters, (2018) pp. 1–1.

7 APPENDICE

Curriculum Vitae del responsabile scientifico del Dipartimento DIBAF, Università degli studi della Tuscia
Prof. Andrea Vannini.

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; deperimenti forestali; diagnostica avanzata, lotta biologica e integrata; sistemi di monitoraggio fitopatologica; patogeni alieni invasivi; biotecnologie applicate all'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, MiPAF, FISR) e internazionale (EC CASCADE, EC PATHOAK, FAO, Cooperazione bilaterale ITALIA –USA, COST, EC FORTHREATS; EC BACCARA, EC ISEFOR).

E' 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).

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 18; citazioni degli ultimi 5 anni (2013-2017) 694, totali 1174