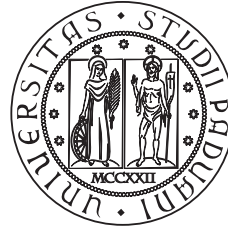


# THRUST

Transdisciplinary Hybrid Rocket  
University Students' Training



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## Catena di misura

Nome documento: THRUST\_PD\_20201029\_Catena-misura-v0.pdf

Jacopo Irone, Alberto Scomparin

Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Università degli Studi di Padova

# Indice

1	Sommario	2
2	Introduzione	2
3	Obiettivi formativi	3
4	Requisiti	3
4.1	Requisiti funzionali . . . . .	3
4.2	Requisiti prestazionali . . . . .	3
5	Componenti selezionati	4
5.1	Microcontrollore . . . . .	4
5.2	Sensori di pressione . . . . .	4
5.3	Convertitori analogico digitali per sensori di pressione . . . . .	4
5.4	Sensori di temperatura . . . . .	4
5.5	Amplificatori per sensori di temperatura . . . . .	4
5.6	Sensori di forza . . . . .	5
5.7	Amplificatore per cella di carico . . . . .	5
5.8	Convertitore analogico digitale per cella di carico . . . . .	5
5.9	Modulo archivio dati . . . . .	5
5.10	Componentistica aggiuntiva . . . . .	5
6	Test previsto per prima fase	5
7	Resoconto spese	6
8	Conclusione	6
A	Esempio di schema elettronico	7

# 1 Sommario

In questo documento vengono elencati i requisiti per il sistema di acquisizione della catena di misura. Viene illustrato uno schema preliminare. Vengono individuati sensori che soddisfano i requisiti. Viene compilata una lista di prodotti da acquistare e riferimenti sul dove reperire gli stessi.

## 2 Introduzione

Gli obiettivi di missione sono costituiti dalla cattura, registrazione ed analisi di pressione, temperatura e spinta del sottosistema propulsivo.

Per garantire la sicurezza degli utilizzatori e progettare in direzione di una catena di misura ricaricabile in volo, la catena di misura deve essere alimentata indipendentemente, ed essere in grado di acquisire i dati nei diversi tipi di test. La catena è suddivisibile nei tre diversi tipi di misura da effettuare: spinta, pressione e temperatura.

Dato l'ordine dei test da eseguire per la validazione al volo del sistema propulsivo, la prima grandezza da studiare è la pressione (nel serbatoio e successivamente anche nella camera a freddo), in seguito la temperatura ed infine la spinta.

L'acquisto e le tarature delle catene di temperatura e di spinta possono essere effettuate in un secondo momento in parallelo ai test del serbatoio.

I componenti essenziali sono:

- Trasduttori di pressione, in grado di effettuare una misurazione della pressione pre e post camera di combustione;
- Sensori di temperatura, per la misurazione della temperatura del sistema;
- Celle di carico, per la misurazione della spinta del motore;
- Sistema di acquisizione, in grado di registrare i dati ottenuti dai diversi sensori;
- Dispositivo di alimentazione, in grado di fornire la corrente necessaria ai vari componenti.

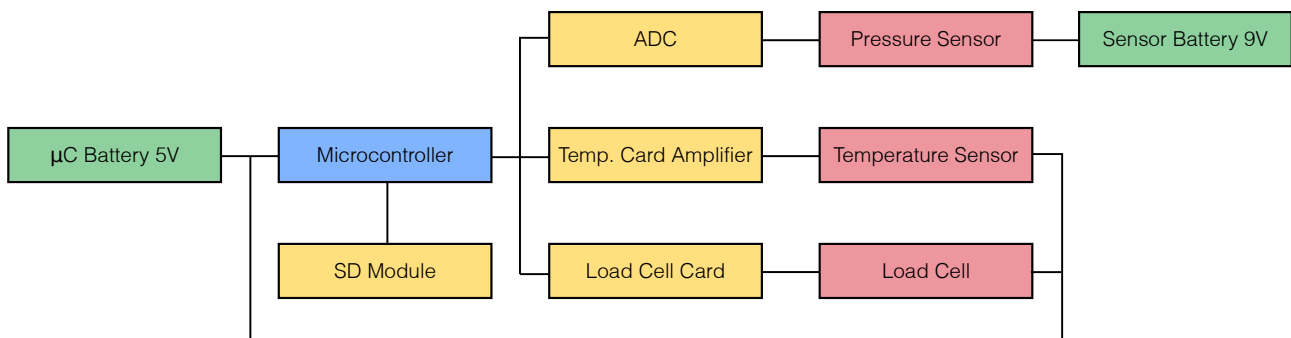


Figura 1: Schema riassuntivo della configurazione della catena di misura

### 3 Obiettivi formativi

- Interpretazione requisiti catena di misura
- Progettazione catena di misura per banco di test
- Ricerca e compilazione lista di prodotti accessibili
- Assemblaggio catena di misura per banco
- Test catena di misura per banco indipendente
- Test catena di misura per banco su componenti razzo
- Analisi dati catena di misura per banco

In fase post PDR:

- Progettazione catena di misura per modello di volo
- Recupero sensori e eventuale lista di prodotti accessibili
- Assemblaggio catena di misura da volo
- Test catena di misura per volo prima del lancio
- Test catena di misura per volo su componenti razzo in banco
- Analisi dati catena di misura di volo

### 4 Requisiti

#### 4.1 Requisiti funzionali

FunReq-Measure-1 Sistema alimentabile a batteria

FunReq-Measure-2 Sistema di acquisizione per elaborazione dati

FunReq-Measure-3 Misura assiale spinta

FunReq-Measure-4 Misura di pressione interna

FunReq-Measure-5 Misura di temperatura a contatto

FunReq-Measure-6 PSD ricavabile dai dati raccolti

FunReq-Measure-7 I sensori di volo non devono richiedere aumento di dimensioni del calibro per la loro presenza

#### 4.2 Requisiti prestazionali

PerfReq-Measure-1 Misura di spinta 0 – 1kN con frequenza 1kHz

PerfReq-Measure-2 Misura di pressione relativa 0 – 60 bar con frequenza 10Hz

PerfReq-Measure-3 Misura di temperatura in range 0 – 40 °C per serbatoio con frequenza 10Hz

PerfReq-Measure-4 Misura di temperatura in range 0 – 500 °C per esterno camera combustione con frequenza 10Hz

## **5 Componenti selezionati**

### **5.1 Microcontrollore**

La scelta del microcontrollore è ricaduta su di un ESP32, il quale è in grado di ricevere i dati di tutti i sensori e archivarli in una scheda SD con opportuno modulo SD. La capacità di calcolo elevata del modulo permette un ampio margine di risorse, utilizzabili nel caso in cui il software sviluppato lo richieda. Inoltre presenta la capacità di connessione via WiFi e Bluetooth, utile per un'eventuale utilizzo contemporaneo da remoto in caso di necessità di connessione senza fili. In Tabella 1 è possibile individuare le opzioni considerate.

### **5.2 Sensori di pressione**

I trasduttori di pressione si sono ricercati all'interno del catalogo della ditta IFM.

La scelta è ricaduta sul sensore PT5023, il quale fornisce in uscita l'informazione di pressione in corrente attraverso lo standard 4-20mA e ha come range di funzionamento le pressioni da 0 a 60 bar. Nonostante nel ciclo di test del serbatoio si possa salire sopra la pressione massima, è preferibile avere più precisione nel range di funzionamento previsto in fase di volo. Per questo motivo sono stati scartati i sensori che raggiungono i 100 bar.

Questi sensori richiedono alimentazione a parte da una tensione superiore agli 8 V. La scelta ricade, con obiettivo di rendere il sistema alimentabile autonomamente, su di una semplice batteria da 9V reperibile in negozi ordinari.

### **5.3 Convertitori analogico digitali per sensori di pressione**

Per il sensore di pressione non è richiesta un'alta frequenza di campionamento, perciò la scelta ricade su un ADC semplice da 16 bit venduto da Adafruit facilmente reperibile online: ADS1115. Questo tipo di elettronica è molto semplice e poco costosa dunque non è stato effettuato un confronto dettagliato con altri simili. Inoltre, l'ampia disponibilità di queste schede fa sì che sia disponibile una estensiva documentazione e un diffuso supporto software.

### **5.4 Sensori di temperatura**

Sono stati considerati due tipi di sensori di temperatura: termocoppie e RTD. Gli RTD, nonostante siano più precisi, hanno un range di temperature misurabili più limitato, sono generalmente più costosi e presentano problemi legati al tempo di risposta. Soprattutto questo ultimo fattore è stato determinante nella scelta dell'utilizzo di termocoppie.

In particolare, per lo studio della temperatura interna al serbatoio è necessaria una termocoppia concepita come sonda. La scelta ricade sul sensore fornito da Omega Engineering Inc. (USA), provvisto di montaggio con filettatura per applicazione in tenuta per l'interno del serbatoio. Per il resto delle componenti (tubo e camera), che verranno studiate dall'esterno, una termocoppia a contatto semplice (reperibile sempre da Adafruit) è sufficiente.

### **5.5 Amplificatori per sensori di temperatura**

Le termocoppie richiedono un circuito di gestione della stessa. Si sono considerati circuiti reperibili su Adafruit e la scelta è ricaduta sul MAX31856, con convertitore analogico digitale a 19 bit e frequenza di campionamento superiore a 10 Hz.

## 5.6 Sensori di forza

Le celle di carico individuate sono essenzialmente tre tipologie diverse: una a carico puntuale, una ad forma di S ed una a bottone. Le prestazioni sono molto simili. Siamo aperti a suggerimenti su quale sia quello più opportuno nel caso di un motore del calibro di 10 cm.

## 5.7 Amplificatore per cella di carico

L'output della cella di carico per il campionamento richiede un amplificatore di segnale. La scelta ricade sul più facilmente reperibile ed economico INA 122P della Texas Instruments. La decisione è motivata dal fatto che questo chip può funzionare con un'alimentazione single-rail ed è disponibile in un pacchetto THT (Through hole technology) che permette più facilmente il testaggio in una breadboard e la connessione ad una scheda tramite saldatura.

## 5.8 Convertitore analogico digitale per cella di carico

Il requisito di campionamento richiesto per la cella di carico di 1kHz richiede di impiegare un ADC con meno precisione a 12 bit ma frequenza superiore al kHz. La scelta ricade sul ADS1015 per le stesse motivazioni riportate per il chip ADS1115.

## 5.9 Modulo archivio dati

Il microcontrollore ESP32 può essere programmato per salvare i dati su una scheda SD di archiviazione. Il modulo individuato è un modulo SD economico di Adafruit codice 254 che supporta alimentazione a 5V e contiene un riduttore per alimentare la SD, che generalmente richiede 3.3V. La scheda SD è reperibile in qualunque negozio o su Amazon a prezzi esigui.

## 5.10 Componentistica aggiuntiva

Per l'assemblaggio della catena sono richiesti cavi, batterie, portabatterie, morsetti, breadboard, stagnatore, stagno, resistenze varie.

Chiediamo informazioni sulla disponibilità di queste componenti nel Laboratorio di Propulsione. Se non fossero disponibili verrà aggiunto un kit di sviluppo simil Arduino che comprende buona parte di queste componenti.

Lo stagnatore presenta rischi di sicurezza, nonostante ciò l'obiettivo formativo di assemblaggio di catena di misura comprende l'abilità di saldare con stagnatore. Chiediamo informazioni sulla possibilità di reperire lo strumento e quali documenti serve compilare per utilizzarlo.

# 6 Test previsto per prima fase

La prima fase della catena di misura prevede l'assemblaggio e il test del serbatoio nel suo funzionamento. La catena deve misurare pressione e temperatura funzionare nei seguenti casi:

- A secco (statica)
- In riempimento del serbatoio (dinamica)
- In svuotamento del serbatoio (dinamica)

## 7 Resoconto spese

Nella prima fase della catena di misura sono ritenute essenziali:

Funzione	Numero	Pezzo	Prezzo	Subtotale
Control	1	ESP32 [12] [5]	€17,00	€17,00
ADC	1	ADS1115 [8] [2]	€13,00	€13,00
Pressure Sensor	1	PT5023 [10] [11]	€101,30	€101,30
MicroSD Module	1	Adafruit 254 [3] [4]	€3,00	€3,00
Temp Sensor	1	Omega Thermocouple M12 Probe [6] [7]	€50,00	€50,00
Temp Amp	1	MAX31856 [9] [1]	€15,00	€15,00
SD Card	1	Sandisk 16 GB	€10,00	€10,00
Development	1	Wires, resistors, tools	€?	€?
Totale				€209,30

Nella seconda fase della catena di misura sono richiesti i seguenti componenti:

Funzione	Numero	Pezzo	Prezzo	Subtotale
Temp Sensor	3	Termocoppia RS Pro	€30,00	€90,00
Temp Amp	3	MAX31856	€15,00	€45,00
ADC	1	ADS1015	€8,50	€8,50
Load Cell	1	TE connectivity	€115,00	€115,00
Load Cell Amp	1	INA 122P	€6,00	€6,00
Totale				€264,50

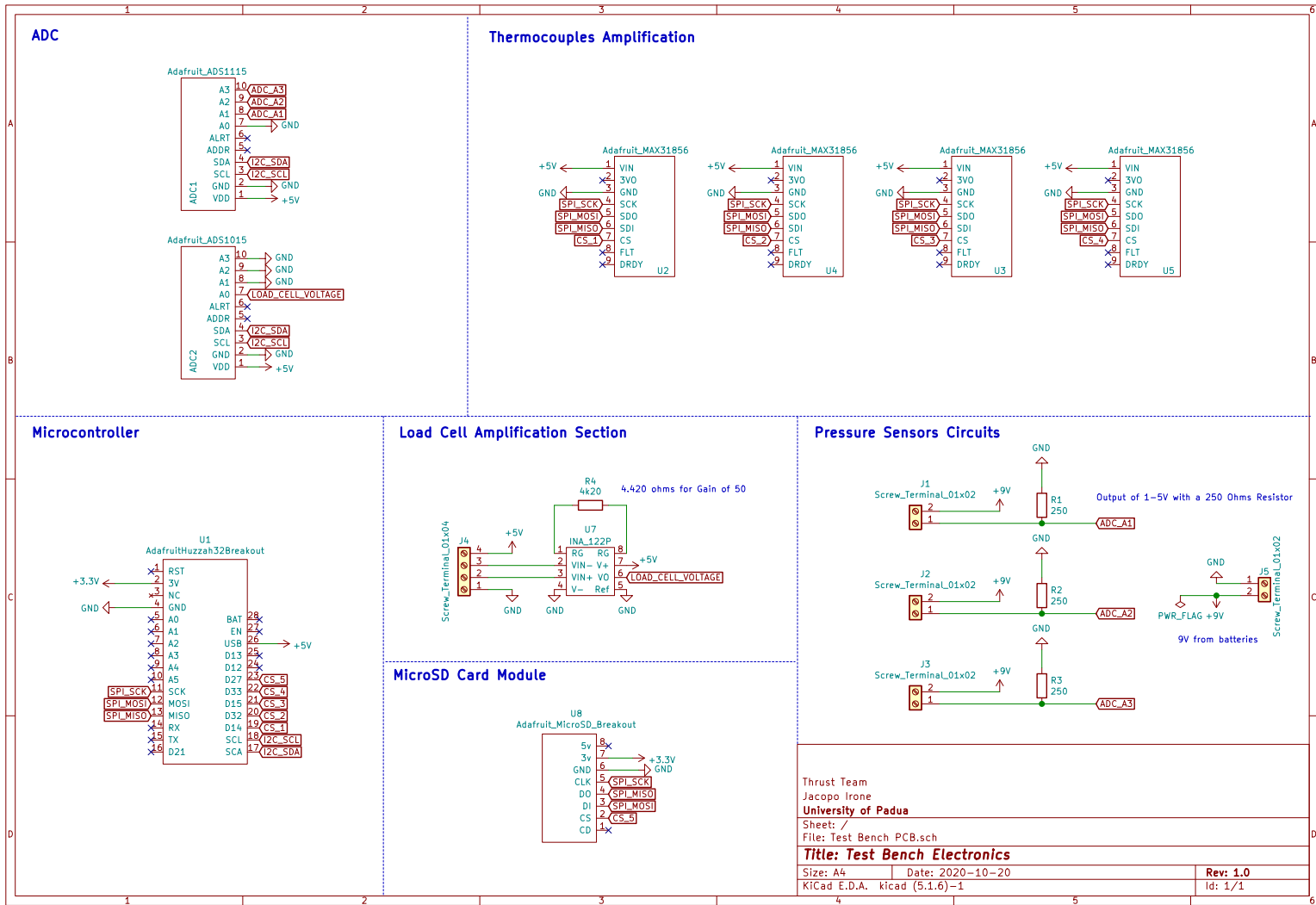
## 8 Conclusione

Chiediamo conferma della scelta dei componenti, indicazioni sull'acquisto ed infine informazioni sulla disponibilità di strumenti che possono essere utilizzati per il progetto in fase di assemblaggio e test della catena di misura.

La scelta di sensori effettuata richiede il 10% (essenziali) ed un ulteriore 15% del budget iniziale stimato per l'acquisto di sensori e di elettronica. Riteniamo prudente ordinare sensori di riserva in particolare per quanto riguarda i sensori di pressione applicati in situazione di stress maggiore.

Per nessuno tra i sensori individuati è previsto il contatto con l'interno della camera di combustione.

# A Esempio di schema elettronico





## Riferimenti bibliografici

- [1] Adafruit. URL: <https://www.adafruit.com/product/3263>.
- [2] Adafruit. ADS1115 16-Bit ADC. URL: <https://www.adafruit.com/product/1085>.
- [3] Adafruit. Micro SD Card Breakout Board Tutorial. URL: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-micro-sd-breakout-board-card-tutorial.pdf>.
- [4] Adafruit. MicroSD card breakout board+. URL: <https://www.adafruit.com/product/254>.
- [5] Amazon. Adafruit HUZZAH32 - Feather Board ESP32. URL: <https://www.adafruit.com/product/3405/>.
- [6] Omega Engineering Inc. Datasheet - Thermocouple Probes With Mounting Threads and M12 Connectors. URL: <https://assets.omega.com/pdf/test-and-measurement-equipment/temperature/sensors/thermocouple-probes/M12probes.pdf>.
- [7] Omega Engineering Inc. Thermocouple Probes With Mounting Threads and M12 Connectors+. URL: <https://www.omega.com/en-us/temperature-measurement/temperature-probes/probes-with-integral-connectors/m12probes/p/M12JSS-1-8-U-6-B>.
- [8] Texas Instruments. ADS115 Datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1113.pdf>.
- [9] Maxim Integrated. Datasheet MAX31856. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31856.pdf>.
- [10] ifm electronic Ltd. PT5023 Datasheet. URL: <https://www.ifm.com/restservices/ie/en/assets/c3VwcGxpZXJzL2lmbS9kb2N1bWVudHMvcHJvZHVjdC9QVDUwMjMtMDAvZGF0ZW5ibGFldHRlci9QVDUwMjMtMDBfRU4tR0IucG>
- [11] ifm electronic Ltd. PT5023 Pressure transmitter. URL: <https://www.ifm.com/ie/en/product/PT5023>.
- [12] Espressif Systems. ESP32 Datasheet. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).

Product	CPU	CPU Speed	RAM	Flash	Power	Price
Arduino Uno	8 Bit ATmega328P	16 MHz	2 KB	32 KB + 1 KB EEPROM	~50 mA	€25,00
Arduino Due	32 Bit ATSAM3X8E	84 MHz	96 KB	512 KB	~100 mA	€40,00
ESP8266	32 Bit Xtensa L106	80 - 160 MHz	160 KB	~4 MB (Not on Chip)	10 ~20 mA (Wifi OFF)	€16,00
ESP32	32 Bit Xtensa dual-core LX6	160 - 240 MHz	520 KB	4 MB	30 mA ~68 mA	€17,00
Teensy 3.2	32 Bit ARM Cortex M4	72 MHz	64 KB	256 KB	~40 mA	€17,00
Teensy 3.5	32 Bit ARM Cortex M4F	120 MHz	256 KB	512 KB	~50 mA	€20,50
Teensy 3.6	32 Bit ARM Cortex M4F	180 MHz	256 KB	1024 KB	~70 mA	€25,00
Teensy 4.0	32 Bit ARM Cortex M7	600 MHz	1 MB	2 MB	~100 mA	€17,00
Teensy 4.1	32 Bit ARM Cortex M7	600 MHz	1 MB	8 MB	~100 mA	€22,00

Tabella 1: Selezione microcontrollori

Product	Connector	Max Pressure	Output	Fluid Temperature	Operating Voltage	Price (IFM)
PT5502	M12	100 bar	4-20 mA	-40 to 125 °C	8-32 DC	€109,20
PT5702	DEUTSCH (DT04-3P)	100 bar	4-20 mA	-40 to 125 °C	8-32 DC	€109,20
PT5602	AMP-Superseal	100 bar	4-20 mA	-40 to 125 °C	8-32 DC	€109,20
PT5002	A DIN (EN17501-803-A)	100 bar	4-20 mA	-40 to 125 °C	8-36 DC	€101,30
PU8502	M12	100 bar	0.5-4.5V	-40 to 125 °C	8-32 DC	€109,20
PU8702	DEUTSCH (DT04-3P)	100 bar	0.5-4.5V	-40 to 125 °C	8-32 DC	€109,20
PU8523	M12	60 bar	0.5-4.5V	-40 to 125 °C	8-32 DC	€109,20
PT5023	A DIN (EN17501-803-A)	60 bar	4-20 mA	-40 to 125 °C	8-36 DC	€101,30

Tabella 2: Selezione sensori di pressione

Product	Bit Resolution	Sampling Speed	Interface	Number of Channel	Operating Voltage	Price
ADS1115	16 Bit	860 Hz	I2C	4 Channels	2-5V	€13,00
ADS1015	12 Bit	3.3 kHz	I2C	4 Channels	2-5V	€8,50

Tabella 3: Convertitori analogico digitale

Thermocouples	Sensor Dimension	Operating Temperature	Cable Lenght	N of Wires	Price
Termocoppia a fascetta		-100 a 400	K		€22,00
Termocoppia in fibra di vetro		400	K		€10,00
Termocoppia incollabile		-250 a 300	K		€80,00
Termocoppia incollabile		-30 a 220	K		€37,00
Termocoppia adesiva		-50 a 250	K		€8,00
Termocoppia piccola diametro		-100 a 800	K		€40,00
Adafruit Thermocouple	2mm x 20mm	500 °C	K 1m	2 Wire	€8,50
Termocoppia RS Pro	5mm x 5mm	750 °C	K 2.5m	2 Wire	€30,00
Omega Thermocouple Probes	3mm x 200 mm	520 °C	J NA		€50,00
Pt100	Sensor Dimension	Operating Temperature	Cable Lenght	N of Wires	Price
Adafruit Platinum RTD	4mm x 30mm	-200 a 550 °C	1 m	3 Wire	€10,00
IFM TS2451	6mm x 50mm	-100 a 600 °C	2m		€90,00

Tabella 4: Selezione sensori di temperatura

Product	Temperature Sensor	Sampling Speed	Interface	Channel N.	Operating Voltage	ADC	Price (Adafruit)
MAX31865	Platinum RTDs	~40 Hz	SPI	1	3.3-5V	15 Bit	€12,50
MAX31855	Type K - Thermocouple	~14 Hz	SPI	1	3.3-5V	14 Bit	€12,50
MAX31850K	Type K - Thermocouple	~14 Hz	1-Wire	1	3.3-5V	14 Bit	€12,50
MAX31856	All Thermocouple	~12.5 Hz	SPI	1	3.3-5V	19 Bit	€15,00

Tabella 5: Selezione amplificatori per sensori di temperatura

Load Cell	Cell Type	Capacity	Rated Output	Excitation Voltage	Price
Cella di carico Tedeo Huntleigh	Compressione - Single point	100 kg	2mV/V	15 V (Max)	€156,00
Cella di carico Phidgets	Compressione - S Type	100 kg	NA	5-18V	€68,00
Cella di carico TE connectivity	Compressione - Button	250 lb	20mV/V	2-10V	€114,87

Tabella 6: Selezione celle di carico

Instrument Amplifier	Gain Range	CMRR	Noise	Power Consumption	Operating Voltage	Price (RS Components) (Units)
INA 826	1-1000	120 dB (Min)	0.52 $\mu$ Vpp	200 $\mu$ A	$\pm$ 3 to 36V	€2,45
INA 333	1-1000	100 dB (Min)	1 $\mu$ Vpp	50 $\mu$ A	$\pm$ 1.8 to 5.5V	€4,45
AD 620	1-10000	100 dB (Min)	0.28 $\mu$ Vpp	1mA	$\pm$ 2.3 to 18V	€10,00
INA 131	Fixed Gain of 100	110 dB (Min)	0.4 $\mu$ Vpp	3mA	$\pm$ 2.5 to 18V	€10,00
INA 122P	5-10000	83 dB (Min)	2 $\mu$ Vpp	60 $\mu$ A	$\pm$ 2.2 to 36V	€6,00

Tabella 7: Selezione amplificatori

Memory Options	Breakout Type	Interface	Operating Voltage	Price
Adafruit 254	MicroSD Card Breakout Board	SPI Only	3.3/5V	€7,00
Adafruit 4682	MicroSD Card Breakout	SPI/SDIO	3.3V	€3,00

Tabella 8: Selezione moduli per scheda SD