

**POLITECNICO DI MILANO**  
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica



**POLITECNICO**  
**MILANO 1863**

**APPARATO WIRELESS PER LA MISURA DI FORZE E MOMENTI A  
SEI GRADI DI LIBERTÀ PER APPLICAZIONI DI ROBOTICA  
COLLABORATIVA**

**Relatore: Prof. Pietro Cerveri**  
**Correlatore: Ing. Matteo Rossi**

**Tesi di laurea di:**  
**Andrea Ditalia**  
**Matr.: 895993**

**Anno accademico 2018/2019**

*Alla mia Famiglia*

# Sommario

Negli ultimi anni l'industria mondiale si sta rivoluzionando, dando vita a quella che viene definita "Industria 4.0". Tra i capisaldi di questa rivoluzione vi è la collaborazione tra tutti gli elementi presenti nel processo produttivo, ovvero gli operatori, le macchine e i sistemi informatici. È necessario pertanto studiare delle soluzioni per il problema della sicurezza sul lavoro, introdotto proprio dall'interazione diretta tra uomini e macchine.

L' "International Organization for Standardization" ha rilasciato recentemente alcuni documenti di specifiche per garantire al meglio la sicurezza degli operatori. In essi vengono illustrati il processo di valutazione e riduzione dei rischi, da eseguire prima di mettere in funzione il sistema robotico, e le misure di protezione che ne devono conseguire. Tra queste si fa riferimento, tra le altre cose, all'utilizzo di sensori di forza posizionati sull'interfaccia meccanica dei manipolatori per la rilevazione di eventuali contatti, desiderati o indesiderati, tra le parti. Durante applicazioni collaborative, infatti, può essere richiesto un certo livello di contatto fisico, ragione per cui la prevenzione delle collisioni può risultare troppo restrittiva. Lo scopo della tesi è stato dunque quello di realizzare un sensore di carico a sei gradi di libertà capace di misurare forze risultanti fino a 20N e momenti risultanti fino a 1000Nmm circa per poter rilevare il preludio di eventuali collisioni tra sistemi robotici e operatori in ogni circostanza, così da poter mettere in atto le adeguate strategie di sicurezza. In particolare il dispositivo doveva risultare, oltre che il più accurato possibile, meno fragile e costoso di quelli presenti sul mercato, dal momento che questi incidono in maniera considerevole sul prezzo complessivo del sistema robotico.

La struttura del sensore è stata studiata per favorirne la sensorizzazione tramite l'utilizzo di trasduttori artigianali di tipo capacitivo, tecnologia individuata come la più adatta per applicazioni robotiche. Questi sono quindi utilizzati per misurare le deformazioni causate dall'applicazione dei carichi nelle direzioni perpendicolari alle rispettive armature piane, posizionate parallelamente. Inoltre, il dispositivo è stato reso in grado di resistere ai carichi applicatigli in maniera sicura e le dimensioni sono state contenute il più possibile, così come il peso. Esso doveva infine risultare agevole da montare su diversi bracci robotici e simulare l'interfaccia meccanica per non limitarne l'utilizzo in alcun modo. I materiali per la sua realizzazione sono stati scelti sulla base della conformità delle loro proprietà meccaniche alle necessità costruttive. Nello specifico, è stata condotta una ricerca per individuare il materiale più adatto ai requisiti dell'elemento sensibile ai carichi, il quale doveva essere allo stesso tempo sufficientemente resistente e il più flessibile possibile, in modo tale da massimizzare la sensibilità del sensore. Per la stessa ragione esso è stato sottoposto a un processo di ottimizzazione, in modo tale da risalire alla combinazione migliore dei parametri del modello. È stata quindi simulata l'applicazione di alcuni sistemi di carico massimali, stabiliti alla luce dei limiti strutturali degli strumenti a disposizione per la calibrazione, sulle diverse strutture ottenute facendo variare i suddetti parametri, per quanto possibile. È stata infine selezionata, tra quelle ammissibili, la configurazione associata alle deformazioni maggiori così ottenute. La struttura è stata quindi realizzata con una stampante 3D e schermata per ridurre l'influenza

delle sorgenti di rumore elettromagnetico sulle misure dei trasduttori. Sebbene essa sia stata studiata per limitarne il prezzo anche nell'eventualità che questa venga prodotta con metodi differenti, proprio la tecnologia di produzione additiva ha consentito di contenere il costo del dispositivo in questa fase. L'inserimento nello stesso del circuito elettronico stampato e dello stadio di alimentazione ha permesso invece di eliminare quel cavo tipicamente connesso ai sensori di carico che contribuisce ad aumentarne la fragilità. Il circuito integrato basato su microcontrollore si occupa principalmente di campionare i valori di capacità dei trasduttori e di filtrarli opportunamente per ridurre ulteriormente il rumore captato dagli stessi. Questi sono quindi inviati attraverso protocollo Bluetooth all'interfaccia grafica realizzata, la quale li elabora ulteriormente per fornire in tempo reale all'utente i valori dei carichi applicati al sensore, inviando inoltre una segnalazione al robot al quale il dispositivo è connesso qualora vengano oltrepassati i limiti massimi consentiti, impostabili a seconda della tipologia di attività collaborativa. L'interfaccia consente inoltre di personalizzare i grafici e di salvare i valori mostrati in un file opportunamente formattato. La conversione è resa possibile dalla moltiplicazione degli input ricavati dai valori di capacità ricevuti dall'interfaccia per la matrice di calibrazione, ottenuta mediante il metodo dei minimi quadrati a partire dai dati acquisiti applicando vari pesi al dispositivo. Questo è stato orientato in diversi modi utilizzando il robot al quale è stato connesso, in modo tale da generare dei sistemi di carico variabili nella maniera più esaustiva possibile all'interno dello spazio a sei dimensioni da campionare. Nella procedura sono stati adottati anche altri accorgimenti per risolvere il problema legato all'accoppiamento dei segnali, ovvero la variazione di un tracciato o della sensibilità della struttura associate all'applicazione di un carico differente da quello al quale il sensore è effettivamente sottoposto, causato dalla non-linearità del comportamento meccanico del dispositivo.

Come detto, il sensore realizzato risulta essere meno fragile rispetto ad altri, non tanto per la struttura, che comunque appare piuttosto resistente, quanto per la rimozione del tipico cavo di connessione con lo stadio di alimentazione e acquisizione del segnale, integrati all'interno del dispositivo realizzato. Esso, inoltre, risulta essere notevolmente più economico rispetto ai dispositivi commerciali, in particolare grazie all'utilizzo della tecnologia additiva per la produzione. Per quanto riguarda le sue prestazioni, il sensore mostra un'accuratezza media calcolata come percentuale del fondo scala intorno al 93% nella stima dei diversi tipi di carichi, a parte il momento intorno all'asse uscente dal dispositivo. Esso è infatti in grado di misurare fino a 22N di forza risultante e 500Nmm di coppia attorno a ogni asse con errori medi di circa 3.17N e 120Nmm in ogni direzione.

In definitiva, quello realizzato risulta essere un apprezzabile sensore di carico a cinque gradi di libertà piuttosto che a sei, in grado di segnalare il superamento dei carichi massimi ammissibili così da poter mettere in atto le adeguate strategie per garantire la sicurezza degli operatori durante applicazioni di robotica collaborativa. Sebbene le sue prestazioni non siano confrontabili con quelle dei sensori commerciali, i suoi punti di forza risiedono nell'elevato rapporto qualità/prezzo e nell'innovazione introdotta rendendo il dispositivo completamente wireless. Grazie a questo, inoltre, l'apparato è stato reso meno soggetto a eventuali guasti, i quali aggravano quindi ulteriormente il suddetto rapporto a sfavore dei dispositivi commerciali.



# Abstract

In the last few years global industry has been revolutionised, coming up with what is known as “Industry 4.0”. Among the cornerstones of this revolution there is cooperation between all the elements present in the production process, namely operators, machines and IT systems. Therefore it is necessary to study solutions for the problem of safety at work, introduced precisely by the direct interaction between men and machines.

The “International Organization for Standardization” has recently released some documents of specifications to ensure operators’ safety. They illustrate the risk assessment and reduction process to be performed before putting the robotic system into operation and the protective measures that must follow. Among these, reference is made to the use of force sensors positioned on the mechanical interface of the manipulators to detect any contact between the parts, either desired or unwanted. In fact, during collaborative applications a certain level of physical contact may be required, which is why collision prevention can be too restrictive.

For this reason, the aim of the thesis was to create a load sensor with six degrees of freedom capable to measure resulting forces up to 20N and resulting moments up to 1000Nmm approximately in order to detect the prelude of any collision between robotic systems and operators in all circumstances, so as to be able to carry out the appropriate safety strategies. In particular, the device had to be as accurate as possible but also less fragile and expensive than those on the market, since these have a considerable impact on the overall price of robotic systems.

The structure of the sensor has been studied to favour sensorization through the use of handcrafted capacitive transducers, technology identified as the most suitable for robotic applications. Then these are used to measure deformations caused by the application of loads in the directions perpendicular to the respective flat plates, positioned in parallel. In addition, the device has been made able to safely withstand applied loads and the dimensions have been kept as small as possible, as well as the weight. Finally, it had to be easy to be mounted on different robotic arms and to simulate their mechanical interface in order not to limit their use in any way. The materials for its construction have been chosen on the basis of the conformity of their mechanical properties to the construction needs. Specifically, a research has been carried out to identify the most suitable material for the requirements of the load-sensitive element, which had to be at the same time resistant and as flexible as possible, in order to maximise the sensitivity of the sensor. For the same reason it has been the subject of an optimisation process, so as to trace the best combination of the parameters of the model. The application of some maximum load systems on the different structures obtained varying, as far as possible, the aforementioned parameters has been simulated. Those have been established considering the structural limits of the instruments available for calibration. Finally, the configuration associated with the major deformations thus obtained has been selected among the eligible ones. Then the structure has been 3D printed and shielded to reduce the influence of electromagnetic noise on the measurements of the transducers. Although it has been designed to limit the price even in the event that it

is produced with different methods, the additive production technology precisely has allowed to keep low the cost of the device in this phase. The integration of the electronic circuit and the power supply inside it has allowed to eliminate that cable typically connected to the load sensors which contributes to increase their fragility. The printed electronic circuit, based on a microcontroller, mainly deals with sampling the capacity values of the transducers and filtering them appropriately to further reduce the noise picked up by the same. Then these are sent via Bluetooth protocol to the graphical interface created, which further processes them to provide the user with the values of the loads applied to the sensor in real time, also sending a signal to the robot to which the device is connected if the maximum allowed limits, which can be set according to the type of collaborative activity performed, are exceeded. The interface also allows to customise the graphs and save the values shown in a suitably formatted file. The conversion is done through the multiplication of the inputs obtained from the capacity values received by the interface with the calibration matrix, computed by the least squares method starting from the data acquired applying some weights to the device. This has been oriented in different ways using the robot to which it has been connected, in order to generate different loading systems variable in the most exhaustive way possible within the six-dimensional space to be sampled. In the procedure, some measures have been adopted to solve the problem due to the coupling of the signals, that is the variation of a graph or of the sensitivity of the structure associated with the application of a load different from that to which the sensor is actually subjected, caused by the non-linearity of the mechanical behaviour of the device.

As said before, the developed sensor seems less fragile than others, not much for the structure, which appears quite resistant anyway, but for the removal of the typical cable connecting the sensor itself with the power supply and signal acquisition stage, integrated within the created device. It also appears to be significantly cheaper than commercial devices, in particular thanks to the use of additive manufacturing technology for its production. Regarding its performance, the sensor shows an average accuracy computed as percentage of the full scale of around 93% in estimating the different types of loads, apart from the moment around the axis exiting the device. In fact it is capable of measuring up to 22N of resulting force and 500Nmm of torque around each axis with average errors of approximately 3.17N and 120Nmm in each direction.

Ultimately, the one produced turns out to be an appreciable load sensor with five degrees of freedom rather than six, capable to report the exceeding of the maximum permissible loads so as to be able to carry out the appropriate strategies to guarantee operators' safety during collaborative robotic applications. Although its performance is not comparable with that of commercial sensors, its strengths lie in the high value for money and in the innovation introduced making the device completely wireless. Moreover, thanks to this the apparatus has been made less subject to possible failures, which therefore further worsen the aforementioned ratio against commercial devices.



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>VI</b>
<b>Indice</b>	<b>X</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>XIII</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>XIV</b>
<b>Elenco delle abbreviazioni</b>	<b>XV</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 Stato dell'arte</b>	<b>8</b>
2.1 Principi di sicurezza in robotica collaborativa . . . . .	8
2.1.1 Valutazione e riduzione dei rischi . . . . .	9
2.1.2 Misure di protezione per le applicazioni di sistemi robotici collaborativi	12
2.1.2.1 Arresto controllato di sicurezza . . . . .	13
2.1.2.2 Controllo manuale . . . . .	14
2.1.2.3 Monitoraggio della velocità e della distanza tra operatori e	
robot . . . . .	14
2.1.2.4 Limitazione della potenza e della forza . . . . .	16
2.1.3 Limiti per contatti quasi statici e temporanei . . . . .	17
2.1.4 Metodi post-collisione . . . . .	21
2.2 Sensori di forza commerciali . . . . .	23
2.2.1 Tecnologia di trasduzione . . . . .	23
2.2.2 Sensore ATI Nano17 . . . . .	25
2.2.3 Limiti . . . . .	26
<b>3 Architettura del sistema</b>	<b>28</b>
3.1 Impostazione del progetto . . . . .	28
3.2 Struttura del sensore . . . . .	31
3.2.1 Disegno tecnico . . . . .	31
3.2.1.1 Interfaccia meccanica . . . . .	31
3.2.1.2 Elemento sensibile ai carichi . . . . .	32
3.2.1.3 Base . . . . .	35
3.2.1.4 Supporto . . . . .	36
3.2.1.5 Sportelli . . . . .	37
3.2.2 Materiali . . . . .	38

3.2.3	Ottimizzazione . . . . .	40
3.3	Hardware . . . . .	46
3.3.1	PSoC . . . . .	47
3.3.2	Convertitori digitali di capacità . . . . .	47
3.3.3	Modulo Bluetooth . . . . .	49
3.3.4	Batteria ricaricabile . . . . .	50
3.3.5	Regolatore . . . . .	51
3.3.6	Altri componenti . . . . .	51
3.3.7	PCB . . . . .	52
3.3.8	Consumi di corrente e durata della batteria . . . . .	53
3.4	Firmware . . . . .	54
3.4.1	Top Design . . . . .	54
3.4.1.1	Rete $I^2C$ . . . . .	54
3.4.1.2	Porta UART . . . . .	55
3.4.1.3	Timer . . . . .	56
3.4.1.4	Altre periferiche . . . . .	56
3.4.2	Algoritmo di funzionamento . . . . .	57
3.5	Interfaccia grafica . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Realizzazioni sperimentali e valutazione</b>	<b>63</b>
4.1	Calibrazione . . . . .	63
4.2	Risultati . . . . .	69
4.3	Discussione . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Conclusioni e prospettive future</b>	<b>77</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>83</b>

# Elenco delle figure

1.1	I nove pilastri dell'Industria 4.0 [1]. . . . .	2
1.2	Mercato dei robot, tradizionali vs collaborativi [2]. . . . .	3
1.3	Componenti di un sistema robotico [4]: (a) manipolatore; (b) controllore; (c) teach pendant. . . . .	4
1.4	Spazio di lavoro di un robot convenzionale (a) e di un robot collaborativo (b) [6]. . . . .	4
1.5	Workflow (sez. 3.1): la struttura del sensore, dopo essere stata progettata e ottimizzata, é stata stampata in 3D con dei materiali selezionati in seguito ad una approfondita analisi delle loro proprietà. Realizzato il circuito elettronico e programmato il controllore del dispositivo, così come l'interfaccia grafica per PC, il sensore é stato infine calibrato. . . . .	6
2.1	Schematizzazione dello spazio di lavoro collaborativo [5]. . . . .	8
2.2	Rappresentazione schematica del processo di riduzione dei rischi [10]. . . . .	9
2.3	Tabella di verità per le operazioni in arresto controllato di sicurezza [5]. . . . .	13
2.4	Rappresentazione grafica dei contributi alla distanza di protezione tra un operatore e un robot [5]. . . . .	15
2.5	Rappresentazione grafica di forze o pressioni accettabili e non accettabili per contatti temporanei e quasi statici [5]. . . . .	17
2.6	Impianto di prova con algometro per la determinazione delle pressioni massime esercitabili sulle diverse aree corporee [12]. . . . .	18
2.7	Esempio di rappresentazione grafica di forze e pressioni accettabili e non accettabili per la regione della mano [8]. . . . .	19
2.8	Esempio di collisione tra uomo e robot, dotato di sensore di forza per la rilevazione dei contatti, e andamento della velocità della parte del manipolatore in funzione della distanza dall'area colpita [8]. . . . .	21
2.9	Struttura dell'hardware elettronico del sensore ATI Nano17 [17]. . . . .	25
3.1	Una delle piastre realizzate e utilizzate per creare dei trasduttori capacitivi. . . . .	28
3.2	Rappresentazione in SOLIDWORKS della struttura del sensore realizzato. . . . .	31
3.3	Rappresentazione in SOLIDWORKS dell'interfaccia meccanica del sensore realizzato. . . . .	31
3.4	Rappresentazione in SOLIDWORKS dell'elemento sensibile ai carichi del sensore realizzato. . . . .	32
3.5	Tipologie ricorrenti di strutture degli elementi sensibili ai carichi di sensori a sei gradi di libertà [9]. . . . .	32
3.6	Componenti della tipologia di elemento sensibile selezionata [19]: (1) bordo esterno; (2) piattaforma centrale; (3) bracci; (4) travi sottili. . . . .	33
3.7	Tipico sistema di protezione contro i sovraccarichi [20]: (1) base; (2) elemento elastico; (3) struttura di sostegno; (4) puntale. . . . .	34

3.8	Rappresentazione in SOLIDWORKS della base del sensore realizzato. . . . .	35
3.9	Rappresentazione in SOLIDWORKS del supporto del sensore realizzato. . . . .	36
3.10	Rappresentazione in SOLIDWORKS degli sportelli utilizzati per chiudere le fessure sul supporto del sensore realizzato. . . . .	37
3.11	Stampante 3D robox della CEL [23]. . . . .	38
3.12	Rappresentazione grafica in CES EduPack dei moduli e dei limiti elastici di alcuni dei materiali presi in considerazione per la realizzazione della struttura del sensore. . . . .	39
3.13	Schematico del processo di ottimizzazione svolto in ANSYS Workbench. . . . .	40
3.14	Rappresentazione in SpaceClaim delle componenti del sensore utilizzate per eseguire l'ottimizzazione dell'elemento sensibile e parametri geometrici di quest'ultimo (fig. a). . . . .	41
3.15	Rappresentazione in Mechanical della mesh generata dal sistema per eseguire l'analisi agli elementi finiti. . . . .	42
3.16	Rappresentazione in Mechanical dei sistemi di carico simulati durante l'esecuzione dell'ottimizzazione. . . . .	45
3.17	Rappresentazione in Mechanical delle deformazioni subite da una delle strutture testate durante l'esecuzione dell'ottimizzazione. . . . .	45
3.18	Rappresentazione in Mechanical dei valori assunti dal margine di sicurezza su una delle strutture testate durante l'esecuzione dell'ottimizzazione. . . . .	45
3.19	Schematico dell'hardware presente nel dispositivo realizzato con EAGLE. . . . .	46
3.20	PSoC 5LP della Cypress Semiconductor. . . . .	47
3.21	Convertitore digitale di capacità FDC1004Q della Texas Instruments. . . . .	47
3.22	Adattatore generico da SOP a DIP W9583RC della Winslow Adaptics. . . . .	48
3.23	Esempio di bus I <sup>2</sup> C [28]. . . . .	49
3.24	Modulo Bluetooth HC-05. . . . .	50
3.25	Batteria ricaricabile ai polimeri di litio FT103450P di RS Pro. . . . .	51
3.26	Regolatore di tensione LDO MCP1700 della Microchip Technology. . . . .	51
3.27	Caricatore LiPo MCP73831/2 della Microchip Technology. . . . .	52
3.28	Rappresentazione della PCB in EAGLE. . . . .	52
3.29	Periferiche per la comunicazione con i convertitori basata sul protocollo I <sup>2</sup> C. . . . .	54
3.30	Porta UART per la comunicazione col modulo Bluetooth. . . . .	55
3.31	Timer per la temporizzazione dell'invio dei dati sui carichi all'interfaccia grafica. . . . .	56
3.32	Periferica deputata al controllo del livello di carica della batteria. . . . .	57
3.33	Multiplexer analogico utilizzato come interruttore tra i pin ausiliari per la sincronizzazione dei dati salvati dal dispositivo sviluppato e dal sensore di riferimento durante la calibrazione. . . . .	57
3.34	Algoritmo di funzionamento. . . . .	60
3.35	Interfaccia grafica sviluppata con Processing. . . . .	61
4.1	Esempio di setup sperimentale per confrontare i dati forniti da un sensore in via di sviluppo con i dati ottenuti da uno strumento di riferimento [16]. . . . .	63
4.2	Esempi di setup sperimentali per l'applicazione dei carichi durante la calibrazione dei sensori. . . . .	64
4.3	Setup sperimentale realizzato per la calibrazione del sensore. . . . .	65
4.4	Rappresentazione dei design points simulati da ANSYS Workbench durante l'esecuzione dell'ottimizzazione. . . . .	69
4.5	L'elemento sensibile ai carichi del sensore realizzato. . . . .	70
4.6	Il sensore di carico realizzato. . . . .	70
4.7	Viste dell'interno del supporto del sensore realizzato. . . . .	70

4.8	Confronto tra i carichi calcolati dal sensore sviluppato e i valori di riferimento teorici. . . . .	72
4.9	Valore assoluto degli errori teorici commessi dal sensore sviluppato nella determinazione dei carichi applicatigli. . . . .	72

# Elenco delle tabelle

2.1	Limiti biomeccanici delle diverse aree corporee [5]. . . . .	20
2.2	Tecniche di trasduzione più ricorrenti e relativi vantaggi e svantaggi [13]. . . . .	23
2.3	Alcune specifiche del sensore ATI Nano17, SI-50-0.5 [18]. . . . .	26
3.1	Requisiti di progetto: prescrizioni e desideri. . . . .	30
3.2	Alcune specifiche della stampante roblox della CEL [24]. . . . .	38
3.3	Parametri del modello dell'elemento sensibile ai carichi (fig. 3.14a) con i diversi valori assunti durante il processo di ottimizzazione. . . . .	42
3.4	Alcune specifiche dei convertitori digitali di capacità FDC1004Q della Texas Instruments [26]. . . . .	48
3.5	Specifiche del modulo Bluetooth HC-05. . . . .	50
3.6	Alcune specifiche del regolatore MCP1700 della Microchip Technology [29]. . . . .	51
3.7	Alcune impostazioni del blocco I2C. . . . .	55
3.8	Alcune impostazioni del blocco UART. . . . .	56
3.9	Alcune impostazioni del timer. . . . .	56
3.10	Alcune impostazioni del Power Monitor. . . . .	57
4.1	Alcune specifiche del robot MC004N della Kawasaki Robotics [34]. . . . .	66
4.2	Combinazione migliore dei parametri del modello dell'elemento sensibile ai carichi (fig. 3.14a) individuata attraverso l'ottimizzazione eseguita. . . . .	69
4.3	Errori massimi, errori medi e deviazioni standard degli errori commessi in valore assoluto nella misurazione dei diversi tipi di carichi dal sensore sviluppato. . . . .	73
4.4	Accuratezza minima e accuratezza media del sensore sviluppato nella misurazione dei diversi tipi di carichi. . . . .	73
5.1	Limiti e prospettive future. . . . .	81

# Elenco delle abbreviazioni

ISO	International Organization for Standardization
PCB	Printed Circuit Board
IDE	Integrated Development Environment
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
ISR	Interrupt Service Routine
SNR	Signal-to-Noise Ratio
GUI	Graphic User Interface



# Capitolo 1

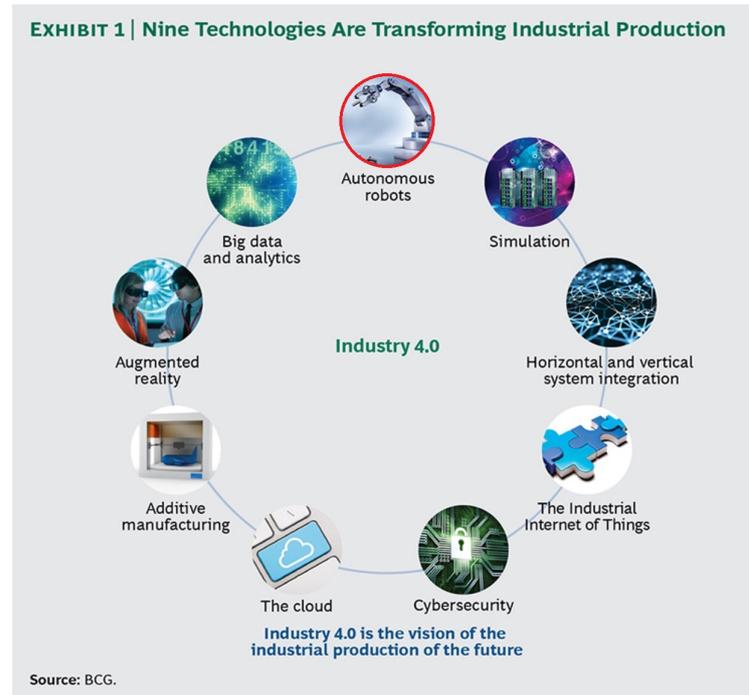
## Introduzione

Da sempre l'innovazione tecnologica determina uno sviluppo industriale, con conseguente aumento della produttività. Se alla fine del XVIII secolo fu l'invenzione della macchina a vapore a dare l'impulso per la prima rivoluzione industriale, con conseguente meccanizzazione della produzione all'insegna di una maggiore velocità e potenza, nella seconda metà del XIX secolo fu l'introduzione dell'elettricità e del petrolio come nuove fonti energetiche a rivoluzionare l'industria, permettendo di incrementare ulteriormente i livelli di meccanizzazione e di produzione. È grazie a questa rinnovata potenza che nella manifattura si afferma progressivamente quella catena di montaggio che inaugura l'era della produzione di massa. Infine fu la digitalizzazione, consentita dallo sviluppo in ambito informatico ed elettronico, a condurre l'industria nella seconda metà del XX secolo nella fase 3.0, incrementando i livelli di automazione sia in ambito produttivo che in ambito organizzativo.

Negli ultimi anni, una nuova ondata di rinnovamento sta interessando il settore manifatturiero, portando alla nascita della nuova tecnologia industriale digitale nota come "Industria 4.0". Questo termine fu utilizzato per la prima volta durante la Fiera di Hannover del 2011. La "Boston Consulting Group" (BCG), una multinazionale statunitense di consulenza gestionale globale, descrive l'Industria 4.0 come una trasformazione che permette di raccogliere e analizzare dati su più macchine, consentendo processi più veloci, più flessibili e più efficienti per produrre beni di qualità superiore a costi ridotti. Questa rivoluzione manifatturiera aumenterà la produttività, cambierà l'economia, favorirà la crescita industriale e modificherà il profilo della forza lavoro, cambiando in definitiva la competitività delle aziende e delle regioni [1]. Lo sviluppo sarà reso possibile dalla collaborazione tra tutti gli elementi presenti nel processo produttivo, ovvero gli operatori, le macchine e i sistemi informatici, che formeranno i cosiddetti "sistemi cyberfisici". Secondo le stime della BCG, i sistemi di produzione diventeranno così più veloci del 30% e più efficienti del 25% [1].

Così come fu per le precedenti rivoluzioni, anche quella attuale è conseguenza diretta delle tecnologie sviluppate in epoca moderna. I "nove pilastri" alla base dell'Industria 4.0 (fig. 1.1) sono [1]:

- l'analisi di Big Data: l'analisi di grandi quantità di dati diventerà una norma per supportare il processo decisionale in tempo reale;
- i robot autonomi: i produttori di molte industrie utilizzano da tempo i robot per affrontare compiti complessi ma i robot si stanno evolvendo per un'utilità ancora maggiore. Questi stanno infatti diventando più autonomi, flessibili e cooperativi. Alla fine, essi interagiranno tra loro, lavoreranno in sicurezza fianco a fianco con gli umani e impareranno da loro. Questi robot di nuova generazione, definiti "robot collaborativi" o



**Figura 1.1:** *I nove pilastri dell'Industria 4.0 [1].*

“cobot”, costeranno meno e avranno un più vasto ventaglio di capacità rispetto a quelle utilizzate oggi nell'industria;

- le simulazioni: dati acquisiti in tempo reale saranno utilizzati per fare simulazioni 3D di prodotti, materiali e processi di produzione, realizzando un modello virtuale che includa macchine, prodotti e uomini, al fine di testare e ottimizzare l'intera filiera produttiva;
- l'integrazione orizzontale e verticale: i sistemi informatici dei diversi reparti di un'azienda verranno resi perfettamente integrati tra loro, così come lo diventeranno gli stessi sistemi delle aziende con quelli dei fornitori e dei clienti;
- l'Internet of Things (IoT) industriale: oggi solo alcuni dei sensori e delle macchine di un produttore sono collegati in rete e fanno uso dell'elaborazione integrata di dati. Essi sono in genere organizzati in un sistema di automazione verticale, in cui sensori e controllori di automazione si inseriscono in un sistema di controllo globale del processo produttivo. Ma con l'Internet of Things industriale un numero maggiore di dispositivi sarà arricchito con l'elaborazione integrata e collegato mediante tecnologie standard. Ciò consentirà ai dispositivi di campo di comunicare e interagire sia tra loro che con controllori più centralizzati, se necessario. Questo decentrerà inoltre l'analisi e il processo decisionale, consentendo risposte in tempo reale;
- la sicurezza informatica: con la maggiore connettività portata dall'Industria 4.0 sarà necessario, ancora più di oggi, garantire comunicazioni sicure e affidabili, supportate da una sofisticata gestione dell'identità e degli accessi di macchine e utenti;
- il Cloud: le prestazioni delle tecnologie cloud miglioreranno, raggiungendo tempi di reazione di appena alcuni millisecondi. Di conseguenza, i dati e le funzionalità della

macchina verranno sempre più implementati nel Cloud, consentendo un numero maggiore di servizi basati sui dati. Anche i sistemi che monitorano e controllano i processi potranno diventare basati sul Cloud;

- l'Additive Manufacturing: al momento le tecnologie di additive manufacturing, tra le quali la stampa 3D, sono utilizzate principalmente per produrre singoli componenti. Con l'Industria 4.0 queste tecnologie saranno utilizzate anche per produrre lotti di componenti, con enormi vantaggi dal punto di vista costruttivo, permettendo la realizzazione agevole di forme complesse contenendone i prezzi e il peso;
- la realtà aumentata: questi sistemi sono attualmente agli albori ma in futuro le aziende faranno un uso molto più ampio della realtà aumentata per fornire ai lavoratori informazioni in tempo reale, migliorando il processo decisionale e le procedure di lavoro. Un'altra applicazione sarà con ogni probabilità la formazione virtuale del personale.

Tra i nove pilastri alla base dell'Industria 4.0 vi sono dunque i robot collaborativi. La loro crescente importanza è testimoniata dal fatto che l'“International Federation of Robotics” (IFR), un'organizzazione fondata per promuovere, rafforzare e proteggere l'industria della robotica in tutto il mondo, per la prima volta nel 2019 ha analizzato il mercato dei cobots (fig. 1.2). Essi risultano essere ancora una piccola frazione del numero totale di robot installati ogni anno in tutto il mondo, tuttavia appare significativo l'incremento del 23% delle vendite tra il 2017 e il 2018, che hanno raggiunto così le 14000 unità.

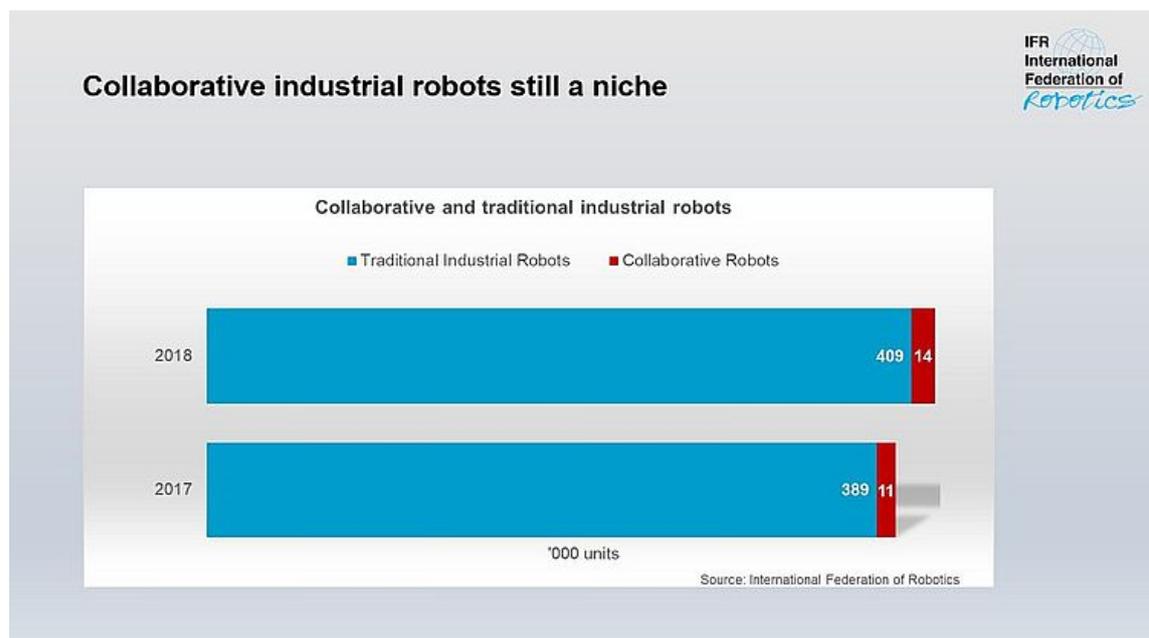
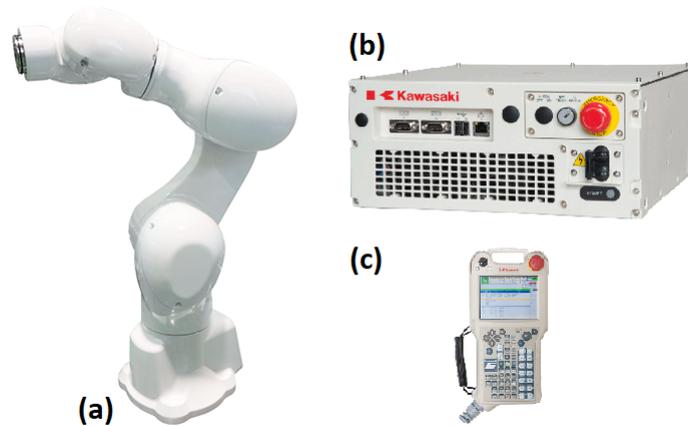


Figura 1.2: Mercato dei robot, tradizionali vs collaborativi [2].

In ambito industriale, un robot è definito come un manipolatore con controllo automatico, riprogrammabile e multi-funzione, programmabile in tre o più assi, che può essere sia fisso a terra sia mobile [3]. Un robot è tipicamente costituito da tre parti (fig. 1.3):

- il manipolatore, ovvero una macchina il cui meccanismo in genere è composto da una serie di segmenti, articolati o sfilabili l'uno rispetto all'altro, in genere con più gradi di libertà, che ha come scopo quello di prendere e posare oggetti [3];

- il controllore, che permette di monitorare e controllare la struttura meccanica del robot e di comunicare con l'ambiente [3];
- il “teach pendant”, la pulsantiera per programmare e comandare i movimenti del robot.



**Figura 1.3:** Componenti di un sistema robotico [4]: (a) manipolatore; (b) controllore; (c) teach pendant.

Essi risultano essere molto utili in ambito industriale grazie alle elevate, sebbene non assolute, accuratezza e ripetibilità nei posizionamenti e nelle velocità mantenute durante gli spostamenti, oltre che alla possibilità di spostare carichi pesanti. Sono usati per svolgere operazioni ripetitive, operazioni che risulterebbero scomode per un addetto o per operazioni pericolose per svariati motivi. I vantaggi che l'inserimento dei robot nella catena produttiva offre rispetto alla manifattura manuale consistono nella maggiore velocità di produzione e nella migliore qualità dei prodotti. Essi, tuttavia, essendo limitati all'esecuzione di un programma, risultano essere meno flessibili rispetto a un operatore ed è su questo punto che l'Industria 4.0 fa leva per migliorare il processo produttivo. I robot “convenzionali” operano in spazi delimitati da barriere fisiche o virtuali, costituite da reti di sensori, non accessibili al personale, perlomeno mentre i robot sono in funzione (fig. 1.4a). I più recenti robot collaborativi, invece, sono appositamente progettati per lavorare con un operatore all'interno dello “spazio di lavoro collaborativo”, ovvero lo spazio all'interno dello spazio operativo in cui il sistema robotico, incluso il pezzo in lavorazione, e un essere umano possono svolgere compiti contemporaneamente durante l'operazione di produzione [5] (fig. 1.4b).



**Figura 1.4:** Spazio di lavoro di un robot convenzionale (a) e di un robot collaborativo (b) [6].

Per la prima volta nel 1942, lo scrittore di racconti di fantascienza Isaac Asimov enunciò quelle che sono conosciute come “le tre leggi della robotica”:

1. *Un robot non può recar danno a un essere umano né può permettere che, a causa del suo mancato intervento, un essere umano riceva danno.*
2. *Un robot deve obbedire agli ordini impartiti dagli esseri umani, purché tali ordini non vadano in contrasto alla Prima Legge.*
3. *Un robot deve proteggere la propria esistenza, purché la salvaguardia di essa non contrasti con la Prima o con la Seconda Legge.*

Isaac Asimov, *Runaround* [7]

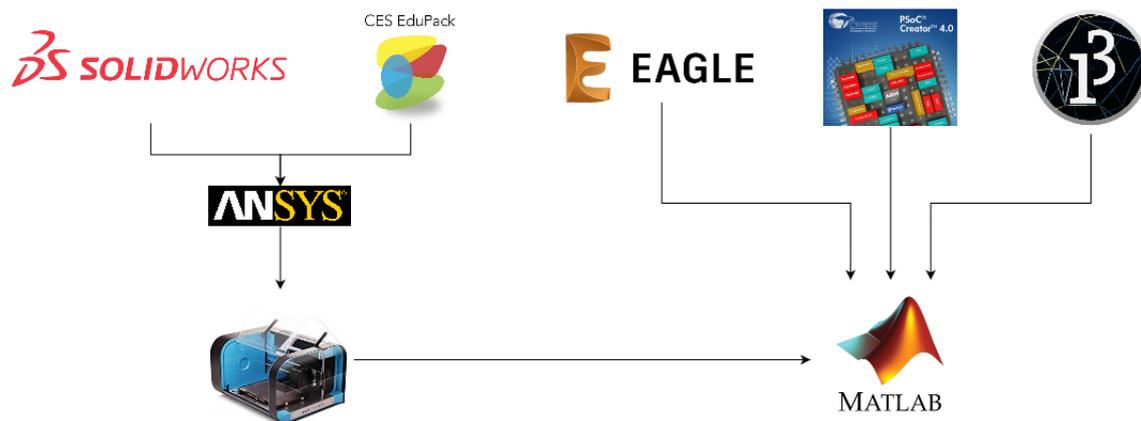
Esse, con la loro struttura autoreferenziale, individuano la Prima Legge come quella fondamentale della robotica; un principio che, sebbene frutto della fantasia dello scrittore statunitense, trova in parte riscontro nelle normative attualmente vigenti nel campo della robotica. L'utilizzo dei cobot introduce pertanto un problema legato alla sicurezza degli operatori che lavorano nelle loro vicinanze. Il lavoratore, infatti, opera in assenza di barriere in prossimità del robot collaborativo mentre questo è in movimento, esponendosi al rischio di contatto indesiderato. Si rendono dunque necessarie misure di protezione per la salvaguardia della salute dell'operatore in ogni momento durante il funzionamento di un robot collaborativo [5]. L'“International Organization for Standardization” (ISO), la più importante organizzazione a livello mondiale per la definizione di norme tecniche, ha rilasciato nel 2011 un documento che specifica come garantire al meglio la sicurezza durante l'interazione tra uomini e robot industriali. Il documento in questione è suddiviso in due parti, “*ISO 10218-1:2011 Robots and Robotic Devices - Safety Requirements for Industrial Robots - Part 1: Robot*” e “*ISO 10218-2:2011 Robots and Robotic Devices - Safety Requirements for Industrial Robots - Part 2: Robot Systems and Integration*”. In aggiunta a questo, è stato pubblicato nel 2016 un documento di specifiche tecniche, “*ISO/TS 15066:2016 Robots and Robotic Devices - Collaborative Robots*” [5], che fornisce informazioni aggiuntive su come rispettare i requisiti espressi in *ISO 10218:2011*. Esso fa riferimento a limiti biomeccanici come la massima forza applicabile ai vari distretti corporei, frutto di uno studio condotto dall'“Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance” (IFA) e riportato in “*BG/BGIA Risk Assessment Recommendations According to Machinery Directive. Design of Workplaces with Collaborative Robots*” [8].

I metodi per garantire la sicurezza, applicabili anche in combinazione, possono essere separati in due categorie: metodi pre-collisione e metodi post-collisione. La funzione dei primi è quella di cercare di evitare le collisioni, rallentando o fermando il robot qualora la distanza minima dello stesso dall'operatore scenda sotto il limite di sicurezza, oppure limitare alcuni parametri come la velocità o la forza esercitabile, cosicché anche un eventuale contatto indesiderato non possa arrecare gravi danni all'uomo. Talvolta, però, le funzioni dei cobot possono richiedere un certo livello di contatto fisico. In questi casi i metodi pre-collisione possono risultare troppo restrittivi, ragione per cui si rendono necessari dei metodi post-collisione per rilevare i contatti e reagire in maniera appropriata. Tra questi metodi, quello suggerito in [8] è l'utilizzo di un sensore di forza posizionato sulla flangia, ovvero l'interfaccia meccanica di un robot, in modo tale da distinguere le collisioni attraverso il confronto della forza misurata con una soglia. I contatti desiderati col sistema robotico, infatti, avvengono tipicamente con la flangia, con lo strumentario applicatogli o col pezzo in lavorazione, tutte situazioni rilevabili da un sensore applicato all'interfaccia meccanica del robot.

Per individuare un qualsiasi tipo di contatto con la flangia o col pezzo in lavorazione durante lo svolgimento di un qualsiasi tipo di mansione é opportuno utilizzare un sensore di carico a sei gradi di libertà. Utilizzando un sensore con un numero di gradi di libertà inferiore, infatti, potrebbero verificarsi collisioni non rilevabili dallo strumento.

In commercio esistono diversi sensori di questo tipo. Uno dei principali limiti di questi risiede nella loro fragilità, dovuta in parte anche alla presenza dei cavi che rendono impossibili alcuni movimenti dei robot sui quali vengono montati senza provocare danni agli strumenti. Oltre a ciò, questo tipo di sensori ha un costo molto elevato, anche superiore a 4000€ [9]. Se confrontato con il prezzo medio di vendita dei robot industriali, infatti, il costo di un sensore di carico a sei gradi di libertà non risulta essere trascurabile. “Statista”, un portale web tedesco che rende disponibili dati raccolti da istituzioni che si occupano di ricerca di mercato, ha stimato in circa 40000€ il prezzo medio di vendita di un robot industriale nell’anno 2018. Un sensore del suddetto tipo ha pertanto un costo che si aggira intorno al 10% del prezzo medio di un robot industriale.

Lo scopo della tesi é stato dunque quello di realizzare un sensore di carico a sei gradi di libertà in grado di rilevare eventuali collisioni tra i robot e gli operatori, così da poter mettere in atto le adeguate strategie di sicurezza. In particolare, il sensore doveva risultare poco costoso e completamente wireless, per limitare la fragilità peculiare di questi strumenti. I passaggi principali del workflow che é stato seguito nell’esecuzione del progetto sono rappresentati in figura 1.5.



**Figura 1.5:** Workflow (sez. 3.1): la struttura del sensore, dopo essere stata progettata e ottimizzata, é stata stampata in 3D con dei materiali selezionati in seguito ad una approfondita analisi delle loro proprietà. Realizzato il circuito elettronico e programmato il controllore del dispositivo, così come l’interfaccia grafica per PC, il sensore é stato infine calibrato.

La tesi é strutturata nel modo seguente:

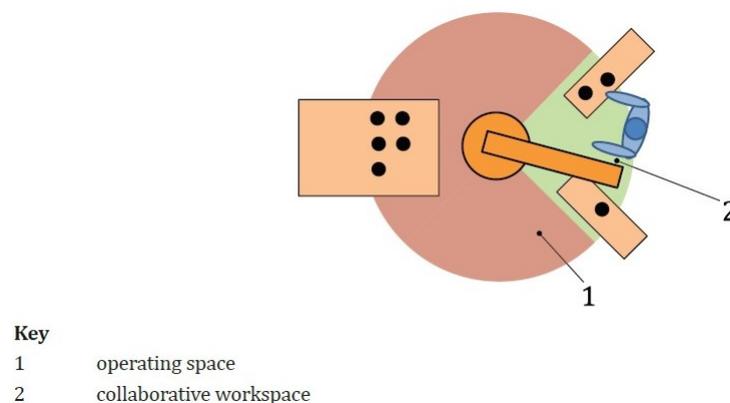
- Nel capitolo due si mostra lo stato dell'arte, una panoramica sulle norme tecniche di riferimento in materia di sicurezza negli ambienti di lavoro collaborativi e un'analisi dei sensori di carico in commercio.
- Nel capitolo tre si descrive l'architettura del sistema, cosa é stato fatto, le motivazioni e le modalità, a partire dalla struttura del sensore fino ad arrivare al circuito elettronico, al firmware del dispositivo e all'interfaccia grafica realizzata.
- Nel capitolo quattro si riportano le attività sperimentali svolte e i risultati del lavoro, corredati dalla loro valutazione.
- Nelle conclusioni si riassume infine il lavoro eseguito, evidenziando alcuni aspetti migliorabili durante eventuali future revisioni del dispositivo.

## Capitolo 2

# Stato dell'arte

### 2.1 Principi di sicurezza in robotica collaborativa

“ISO/TS 15066:2016 Robots and Robotic Devices - Collaborative Robots” [5] é un documento di specifiche tecniche che precisa i requisiti di sicurezza per i sistemi industriali che integrano robot collaborativi e per gli ambienti di lavoro nei quali questi sono inseriti. Viene definita “operazione collaborativa” una situazione in cui un robot appositamente progettato e un operatore lavorano all’interno di un’“area di lavoro collaborativa”, ovvero uno spazio all’interno dello spazio operativo (fig. 2.1) in cui il sistema robotico, incluso il pezzo in lavorazione, e un essere umano possono svolgere compiti contemporaneamente durante l’operazione di produzione [5].



**Figura 2.1:** Schematizzazione dello spazio di lavoro collaborativo [5].

Gli operatori, non solo coloro che sono deputati alla produzione ma anche coloro che sono incaricati della manutenzione e della pulizia per esempio, sono pertanto esposti al rischio di contatto fisico coi cobot, ragione per cui qualsiasi progetto di sistema robotico collaborativo richiede misure di protezione per garantire la sicurezza dell’operatore in ogni momento durante operazioni collaborative. É necessaria pertanto una valutazione dei rischi per identificare i pericoli e stimare i rischi associati a un’applicazione di robotica collaborativa, in modo da poter selezionare misure di riduzione del rischio adeguate [5].

2.1.1 Valutazione e riduzione dei rischi

Il documento al quale si fa riferimento in materia di valutazione dei rischi é “ISO 12100, Safety of Machinery - General Principles for Design - Risk Assessment and Risk Reduction” [10]. In esso viene innanzitutto precisato il significato attribuito ad alcuni termini utilizzati anche nel linguaggio comune. Si definisce “rischio” la combinazione della probailità che si verifichi un “danno”, inteso come una lesione fisica o un problema di salute, con la gravità di quel danno. Si definisce inoltre “pericolo” una potenziale causa di danno [10].

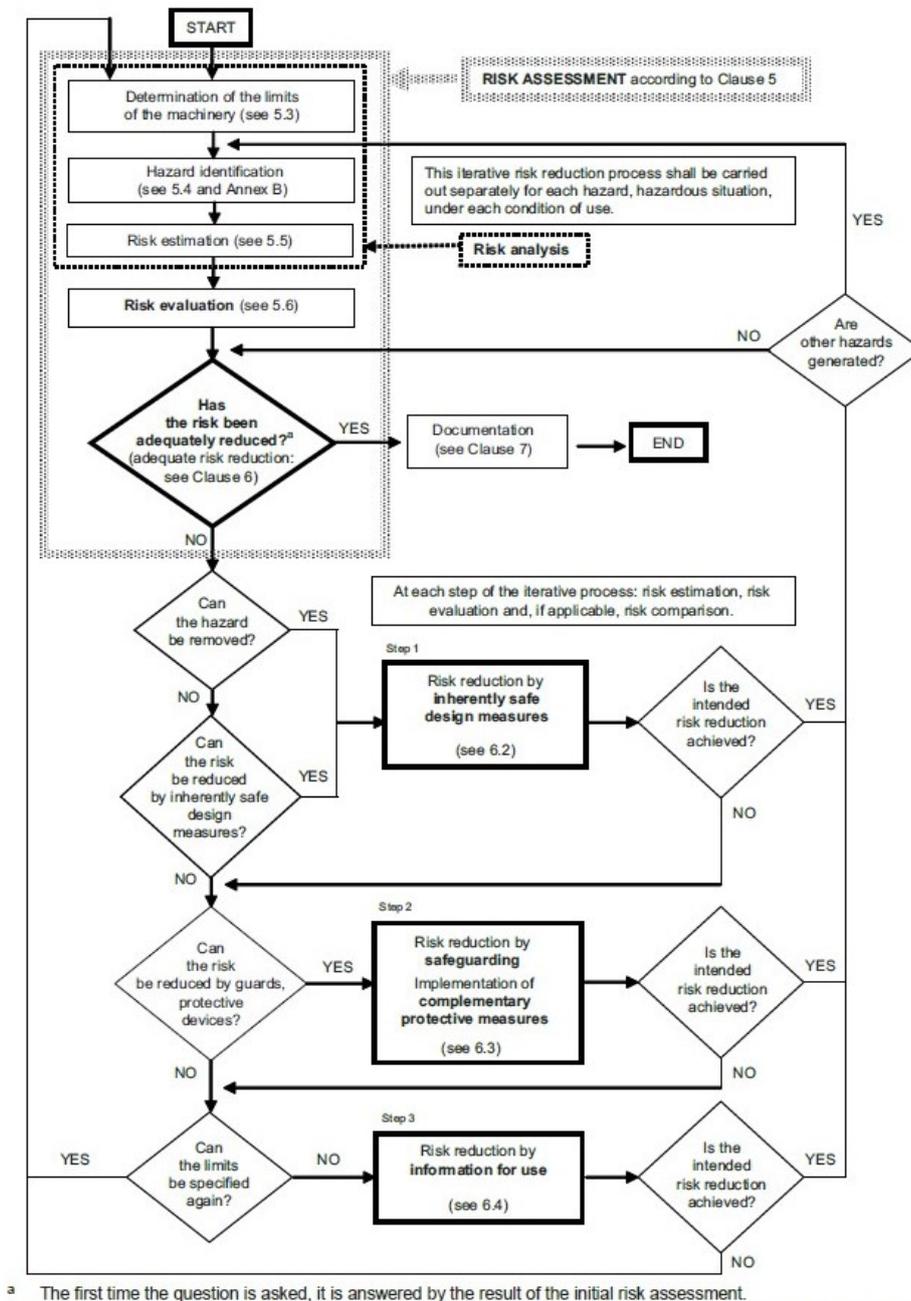


Figura 2.2: Rappresentazione schematica del processo di riduzione dei rischi [10].

La valutazione dei rischi é presentata come una serie di passaggi logici (fig. 2.2) che consente, in modo sistematico, l’analisi e il giudizio dei rischi associati all’utilizzo delle macchine.

Questa é seguita, ove necessario, dalla riduzione dei rischi. L'iterazione di questo processo può essere necessaria per eliminare i pericoli, per quanto possibile, e per ridurre adeguatamente i rischi mediante l'attuazione di misure di protezione. L'obiettivo da raggiungere é la massima riduzione praticabile del rischio.

La valutazione dei rischi comprende [10]:

1. l'analisi dei rischi, che a sua volta include:
  - (a) la determinazione dei limiti della macchina;
  - (b) l'identificazione dei pericoli;
  - (c) la stima dei rischi;
2. il giudizio sui rischi.

L'analisi fornisce le informazioni necessarie per formulare giudizi sulla necessità o meno di effettuare una riduzione dei rischi [10]. Essa inizia con la determinazione de:

- i limiti d'uso, che tengono conto dell'uso previsto e del prevedibile uso improprio delle macchine;
- i limiti spaziali, legati al range di movimento del robot e allo spazio necessario agli operatori;
- i limiti temporali, legati al tempo di utilizzo del sistema;
- altri limiti, relativi per esempio a:
  - le proprietà dei materiali da elaborare;
  - il livello di pulizia richiesto;
  - le condizioni ambientali.

Successivamente é necessario identificare i potenziali pericoli associati all'utilizzo del sistema robotico, nei limiti individuati al passo precedente. La fase di identificazione dei pericoli é la fase più critica della valutazione dei rischi, poiché se il pericolo non viene rilevato i rischi associati non possono essere contenuti. Secondo [5], questa procedura deve considerare almeno:

- i pericoli correlati al robot e associati principalmente a:
  - le caratteristiche del robot, come il carico massimo trasportabile e la velocità, le forze e i momenti esercitabili e infine la geometria;
  - le condizioni di contatto “quasi statiche”, che si differenziano da quelle definite “temporanee” principalmente per la durata (sez. 2.1.2.4);
  - la vicinanza al robot della postazione di lavoro dell'operatore;
- i pericoli connessi al sistema robotico, inteso come insieme di robot, terminale ed equipaggiamento specifico dell'applicazione, inclusi:
  - i pericoli associati al terminale, ovvero il dispositivo progettato per essere fissato all'interfaccia meccanica per permettere al robot di eseguire un determinato compito, e al pezzo in lavorazione, inclusa mancanza di design ergonomico e perdita di materiale;

- i pericoli dovuti al movimento e alla posizione dell'operatore rispetto al posizionamento delle diverse parti del sistema;
- i pericoli legati alle parti del corpo dell'operatore che potrebbero essere interessate da contatti col robot e alla natura di questi contatti;
- i pericoli attribuibili alla progettazione, all'affidabilità e all'accessibilità di qualsiasi dispositivo di guida manuale del robot, alla loro ergonomia e al potenziale uso improprio;
- l'influenza e gli effetti dell'ambiente circostante;
- i pericoli correlati all'applicazione, tra cui:
  - i pericoli specifici del processo, come per esempio le temperature estreme o gli schizzi di saldatura;
  - i pericoli legati alle limitazioni causate dall'uso richiesto di dispositivi di protezione individuale;
  - i pericoli dovuti alla carenza di design ergonomico, con conseguente perdita di attenzione o funzionamento improprio.

I rischi associati ai pericoli individuati devono essere quindi stimati prima di applicare le adeguate misure di protezione. I rischi associati a una particolare situazione pericolosa dipendono dai seguenti elementi:

- la probabilità che si verifichi un determinato tipo di danno, che è data da:
  - l'esposizione delle persone al pericolo;
  - la frequenza con cui si verifica un determinato evento pericoloso;
  - le possibilità tecniche e umane di evitare o limitare il danno;
- la gravità del danno, che può essere stimata tenendo in considerazione:
  - la gravità delle lesioni o dei problemi di salute causati;
  - l'estensione del danno, vale a dire se questo interessa una o più persone.

Nell'effettuare una valutazione del rischio, si deve prendere in considerazione il rischio derivante dalla gravità più probabile dei danni che possono verificarsi a causa di ciascun pericolo identificato ma si deve tener conto anche della gravità più alta prevedibile, anche se la probabilità di tale occorrenza non è elevata [10].

Una volta completata l'analisi dei rischi, bisogna giudicare se è stata effettuata una "adeguata riduzione del rischio", ovvero se [10]:

- sono state prese in considerazione tutte le condizioni operative e tutte le procedure di intervento;
- i pericoli sono stati eliminati o i rischi sono stati ridotti il più possibile;
- gli eventuali nuovi pericoli introdotti dalle misure di protezione adottate sono stati adeguatamente affrontati;
- gli utenti sono sufficientemente informati e avvertiti dei rischi residui;

- le misure di protezione sono compatibili tra loro;
- sono state prese in sufficiente considerazione le conseguenze che possono derivare dall'uso in un contesto non professionale/non industriale di una macchina progettata per uso professionale/industriale;
- le misure di protezione non incidono negativamente sulle condizioni di lavoro dell'operatore o sulla facilità d'uso della macchina.

Se é richiesta una ulteriore riduzione del rischio, devono essere selezionate e applicate le misure di protezione appropriate. L'obiettivo della riduzione del rischio può essere raggiunto eliminando i pericoli o riducendo separatamente o contemporaneamente ciascuno dei due elementi che determinano il rischio associato, la gravità del danno derivante dal pericolo in esame e la probabilità di insorgenza di tale danno. Tutte le misure di protezione intese a raggiungere questo obiettivo devono essere applicate nella sequenza seguente, indicata come metodo in tre fasi:

1. misure di progettazione intrinsecamente sicure, che eliminano i pericoli o riducono i rischi associati mediante un'opportuna scelta delle caratteristiche di progettazione della macchina e/o dell'interazione tra le persone esposte e la macchina stessa;
2. tenendo conto dell'uso previsto e dell'abuso ragionevolmente prevedibile, si possono utilizzare misure di salvaguardia e protezione complementari adeguatamente selezionate, come per esempio una funzione per l'arresto di emergenza, per ridurre il rischio quando non é possibile eliminare un pericolo o ridurre sufficientemente il rischio associato utilizzando misure di progettazione intrinsecamente sicure;
3. laddove permangono dei rischi nonostante le misure di progettazione intrinsecamente sicure e l'adozione di misure di protezione complementari, i rischi residui devono essere identificati nelle informazioni per l'uso.

L'adeguatezza della riduzione del rischio deve essere valutata dopo aver applicato ciascuna delle tre fasi della riduzione del rischio. Come parte di questo processo iterativo, il progettista deve anche verificare se vengono introdotti ulteriori pericoli o se aumentano altri rischi quando vengono applicate le nuove misure di protezione. In questi casi potrebbero rendersi necessarie misure di protezione adeguate per affrontarli [10].

Per i sistemi robotici tradizionali, la riduzione del rischio viene in genere ottenuta attraverso l'utilizzo di barriere protettive fisiche o virtuali, costituite da reti di sensori, che separano l'operatore dal robot. Per le operazioni collaborative, invece, la riduzione del rischio é affrontata principalmente attraverso la progettazione del sistema robotico e dell'area di lavoro [5]. Le misure specifiche per la riduzione del rischio durante le operazioni collaborative sono descritte nella sezione 2.1.2.

### **2.1.2 Misure di protezione per le applicazioni di sistemi robotici collaborativi**

Durante operazioni collaborative, l'operatore deve disporre dei mezzi per arrestare il movimento del robot in qualsiasi momento con una singola azione o avere la possibilità di uscire dallo spazio di lavoro collaborativo senza ostacoli. Tra i mezzi per fermare il movimento del robot vi sono [5]:

- un dispositivo di abilitazione, il tipico pulsante “uomo morto” che si trova solitamente sulla parte posteriore del teach pendant;
- un dispositivo di arresto di emergenza, tipicamente un pulsante rosso posto sia sul controllore che sul teach pendant (fig. 1.3).

Le operazioni collaborative possono essere progettate secondo uno o più dei seguenti metodi:

- arresto controllato di sicurezza;
- controllo manuale;
- monitoraggio della velocità e della distanza tra operatori e robot;
- limitazione della potenza e della forza.

In ogni caso, l’accesso allo spazio di lavoro del robot al di fuori dell’area di lavoro collaborativa deve essere impedito. Inoltre, qualsiasi violazione dei rispettivi requisiti operativi deve comportare un arresto di protezione, ovvero un’interruzione mediante immediata sospensione dell’alimentazione agli attuatori della macchina [11]. L’operazione non potrà riprendere fino a quando non verrà ripristinata da un’azione di riavvio intenzionale con l’operatore al di fuori dell’area di lavoro collaborativa [5].

**2.1.2.1 Arresto controllato di sicurezza**

In questo metodo operativo una funzione di arresto controllato certificato di sicurezza viene utilizzata per interrompere il movimento del robot nell’area di lavoro collaborativa prima che un operatore vi entri per interagire con il sistema robotico ed eseguire una qualsiasi attività, come per esempio il caricamento di una parte sull’effettore finale. Nell’uso previsto di questa funzione, il robot deve rallentare causando un arresto controllato di sicurezza, ovvero un arresto controllato con l’alimentazione che rimane disponibile per gli attuatori della macchina [11]. Il movimento del robot può riprendere senza alcun intervento aggiuntivo solo dopo che l’operatore é uscito dallo spazio di lavoro collaborativo. Il sistema robotico deve essere pertanto dotato di dispositivi certificati di sicurezza che rilevino la presenza di un operatore nello spazio di lavoro collaborativo [5].

Robot motion or stop function		Operator’s proximity to collaborative workspace	
		Outside	Inside
Robot’s proximity to collaborative workspace	Outside	Continue	Continue
	Inside and moving	Continue	Protective stop
	Inside, at Safety - Rated Monitored Stop	Continue	Continue

**Figura 2.3:** Tabella di verità per le operazioni in arresto controllato di sicurezza [5].

### 2.1.2.2 Controllo manuale

In questa modalità di funzionamento l'operatore utilizza un dispositivo manuale per trasmettere comandi di movimento al sistema robotico.

La sequenza operativa per il controllo manuale é la seguente [5]:

1. il robot é pronto per il controllo manuale quando si trova nello spazio di lavoro collaborativo in condizione di arresto controllato di sicurezza - l'operatore può quindi entrare nello spazio di lavoro collaborativo;
2. quando l'operatore ha assunto il controllo del sistema robotico con il dispositivo di controllo manuale, l'arresto controllato di sicurezza viene revocato e l'operatore può eseguire il compito di guida manuale;
3. quando l'operatore rilascia il dispositivo di controllo, il robot deve portarsi in condizione di arresto controllato certificato di sicurezza;
4. quando l'operatore é uscito dallo spazio di lavoro collaborativo, il sistema robotico può riprendere il funzionamento non collaborativo.

Per garantire la sicurezza dell'operatore, il robot deve essere dotato di una funzione di sicurezza certificata per monitorarne la velocità e una funzione di sicurezza certificata per la limitazione dello spazio, usata per impedire allo stesso di entrare nella postazione di lavoro dell'operatore.

Tipicamente il controllo manuale viene utilizzato nel caso di movimento coordinato di operazioni semiautomatiche, come il sollevamento di carichi pesanti, o durante la programmazione del robot. Le posizioni della traiettoria desiderata vengono infatti apprese attraverso la guida del manipolatore da parte dell'operatore [6].

### 2.1.2.3 Monitoraggio della velocità e della distanza tra operatori e robot

In questo metodo di funzionamento, il sistema robotico e l'operatore possono spostarsi contemporaneamente nell'area di lavoro collaborativa. La riduzione del rischio si ottiene mantenendo sempre almeno la distanza di protezione tra l'operatore e la fonte di pericolo, sia essa il robot stesso o il pezzo in lavorazione. Le possibilità con cui il sistema di controllo del robot può evitare di violare la distanza di separazione protettiva comprendono ma non sono limitate a:

- la riduzione della velocità, eventualmente seguita da un arresto controllato certificato di sicurezza;
- l'esecuzione di un percorso alternativo che non viola la distanza di separazione protettiva.

Se la distanza di separazione diminuisce fino a un valore inferiore alla distanza di protezione, il sistema robotico si deve arrestare per evitare il contatto con l'operatore. Quando quest'ultimo si allontana, il robot può riprendere automaticamente il movimento [5].

Le velocità massime consentite e le distanze minime di protezione in un'applicazione possono essere costanti o variabili. Nel primo caso, esse devono essere determinate pensando ai casi peggiori prevedibili durante l'intero corso dell'applicazione. Nel secondo caso, invece, le velocità del robot e dell'operatore vengono utilizzate per determinare il valore della distanza

di protezione in ogni istante. In alternativa, la velocità massima consentita al robot può essere determinata in base alla velocità dell'operatore e alla distanza di separazione effettiva tra il robot e l'operatore. Vale infatti l'equazione 2.1:

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \tag{2.1}$$

dove:

$S_p(t_0)$  é la distanza di protezione da mantenere all'istante considerato  $t_0$ ;

$S_h$  é il contributo alla distanza di protezione attribuibile al cambiamento di posizione dell'operatore;

$S_r$  é il contributo alla distanza di protezione attribuibile al tempo di reazione del sistema robotico;

$S_s$  é il contributo alla distanza di protezione dovuto alla distanza percorsa dal sistema robotico durante la fase di arresto;

$C$  é la distanza di intrusione, ovvero la distanza che una parte del corpo può percorrere nel campo di rilevamento prima che venga effettivamente rilevata;

$Z_d$  é l'incertezza sulla posizione dell'operatore nell'area di lavoro collaborativa;

$Z_r$  é l'incertezza sulla posizione del robot.

La formula 2.1 va applicata a tutte le combinazioni di personale nell'area di lavoro collaborativa e parti mobili del sistema robotico. Infatti, la distanza minima potrebbe essere rilevata tra una parte del robot e una persona nell'area di lavoro collaborativa in allontanamento l'uno dall'altra, situazione magari potenzialmente meno pericolosa rispetto a una parte diversa del robot in avvicinamento a un operatore [5].

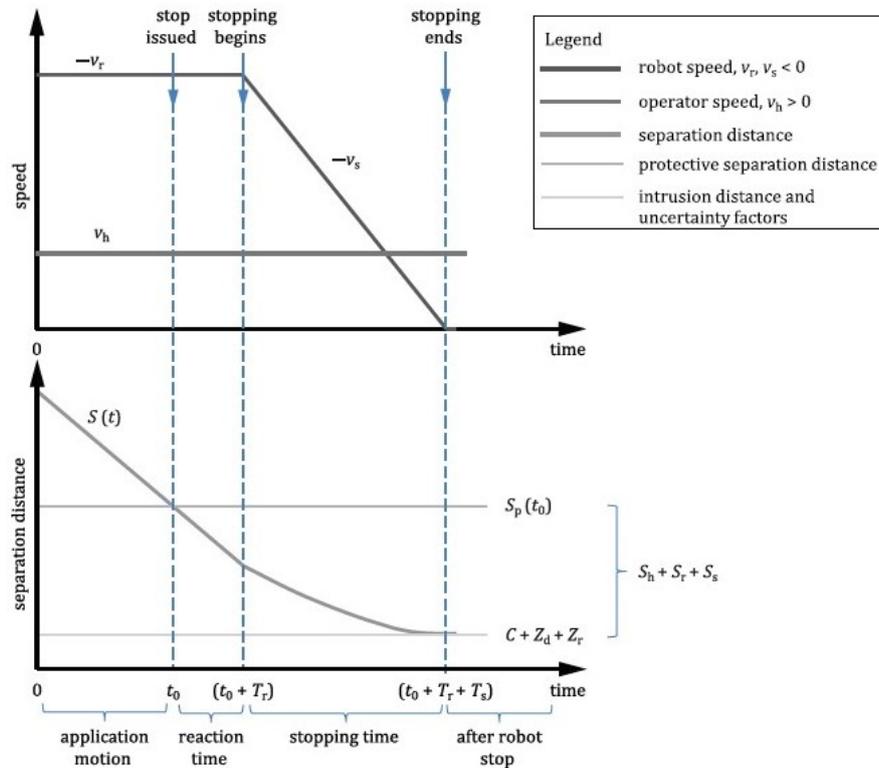


Figura 2.4: Rappresentazione grafica dei contributi alla distanza di protezione tra un operatore e un robot [5].

Per poter mettere in atto questa strategia collaborativa, il sistema deve essere dotato di sistemi di visione per ispezionare lo spazio di lavoro collaborativo, monitorando costantemente la velocità e la posizione degli operatori. Anche in questo caso, il robot deve essere dotato di una funzione di sicurezza certificata per monitorare la velocità e una funzione di sicurezza certificata per la limitazione dello spazio [5].

Una possibile applicazione può essere in una stazione di lavoro nella quale il personale operativo deve entrare senza magari interagire direttamente col robot, per esempio per motivi logistici [6].

#### 2.1.2.4 Limitazione della potenza e della forza

In questo metodo di funzionamento, il contatto fisico tra il sistema robotico, incluso il pezzo in lavorazione, e un operatore può avvenire intenzionalmente o non intenzionalmente. Si distinguono due possibili tipi di contatto [5]:

- contatti quasi statici, ovvero situazioni in cui una parte del corpo di una persona rimane intrappolata per un intervallo di tempo prolungato tra una parte mobile del sistema robotico e un'altra parte, fissa o mobile, della cella di lavoro;
- contatti temporanei, vale a dire situazioni in cui una parte del corpo di un operatore viene urtata da una parte mobile del robot senza rimanere però bloccata.

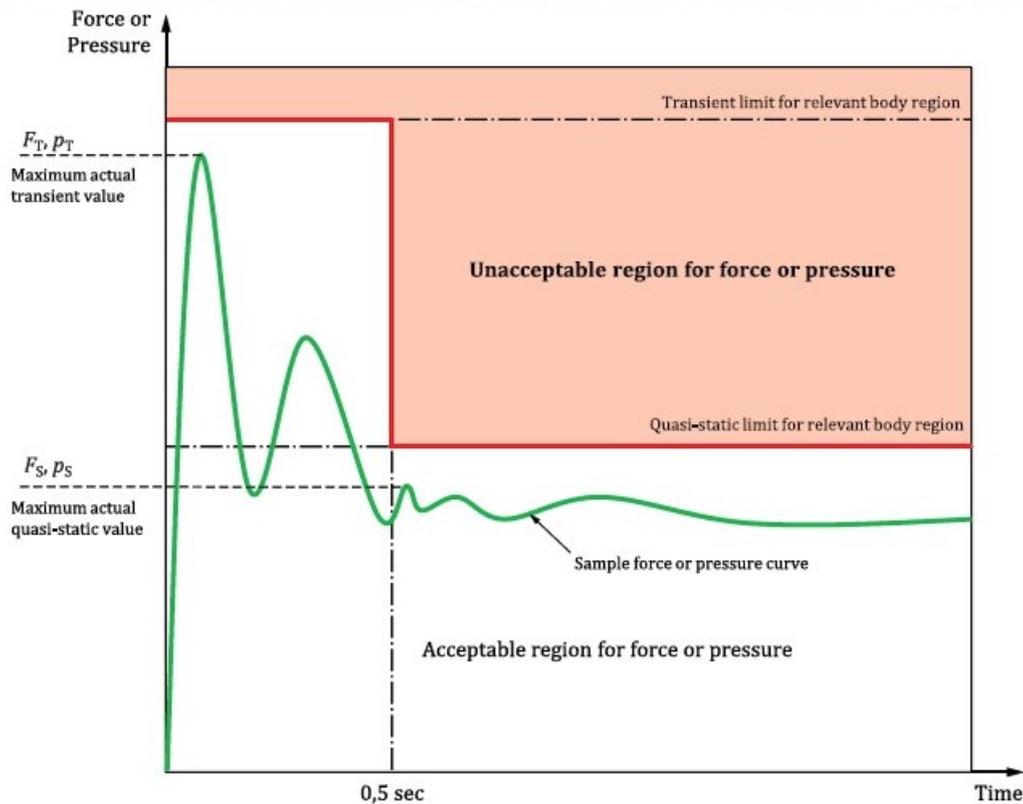
La riduzione del rischio si ottiene, in questo caso, sia attraverso misure di progettazione del robot intrinsecamente sicure, per rendere per esempio i contatti indesiderati poco frequenti ed evitabili, sia attraverso un sistema di controllo certificato di sicurezza, applicate eventualmente in combinazione. Le prime includono ma non sono limitate a [5]:

- l'aumento della superficie di contatto, eliminando gli spigoli a favore di superfici più arrotondate;
- l'assorbimento dell'energia, il prolungamento del tempo di trasferimento dell'energia o la riduzione delle forze di impatto, ricorrendo per esempio all'utilizzo di imbottiture;
- la limitazione delle masse in movimento.

Le seconde, a loro volta, includono ma non sono limitate a [5]:

- la limitazione delle forze e dei momenti esercitabili;
- la limitazione delle velocità delle parti in movimento;
- la limitazione dell'energia trasferita durante i contatti, funzione delle masse in movimento e delle rispettive velocità;
- l'implementazione di una funzione di sicurezza certificata per la limitazione dello spazio;
- l'implementazione di una funzione certificata per l'arresto controllato di sicurezza;
- l'utilizzo di sensori per anticipare o rilevare i contatti e ridurre l'applicazione di forze.

Lo scopo di queste misure è ridurre adeguatamente i rischi per un operatore non consentendo il superamento dei limiti di forza e pressione applicabili per contatti quasi statici e temporanei (fig. 2.5), descritti nella sezione 2.1.3.



**Figura 2.5:** Rappresentazione grafica di forze o pressioni accettabili e non accettabili per contatti temporanei e quasi statici [5].

### 2.1.3 Limiti per contatti quasi statici e temporanei

Aree corporee diverse hanno differenti soglie di resistenza al carico biomeccanico senza incorrere in lesioni (tab. 2.1). Per differenziarle è stato creato un modello corporeo che comprende 29 aree specifiche, classificate in 12 regioni, ognuna delle quali è caratterizzata da una massa effettiva e da una costante elastica. Sebbene la tabella 2.1 riporti i valori limite di forza e pressione esercitabili anche in queste zone, l'esposizione al contatto di regioni sensibili del corpo, principalmente la testa, deve essere prevenuta ogniqualvolta ragionevolmente possibile [5].

Le pressioni massime riportate nella tabella 2.1 sono il risultato di uno studio condotto alla “Johannes Gutenberg University” di Mainz sui livelli di insorgenza del dolore. I test sono stati realizzati utilizzando un algometro (fig. 2.6), ovvero uno strumento per misurare la sensibilità alla pressione o al dolore, applicando una pressione linearmente crescente sulle 29 aree corporee del modello. La variabilità interpersonale della soglia del dolore era grande ed è stato stabilito di fissare il livello di pressione massima consentita al 75° percentile dell'intervallo di valori registrati per una specifica area corporea.

Per quanto riguarda le forze massime, invece, esse sono state fissate sulla base di un'indagine bibliografica. Questi valori si riferiscono solo alle 12 regioni del modello corporeo e non alle 29 aree più specifiche. Attenendosi ai suddetti limiti, riportati in “BG/BGIA Risk Assessment Recommendations According to Machinery Directive. Design of Workplaces with Collaborative Robots” [8], non si dovrebbe verificare nessuna lesione la cui categoria di gra-



**Figura 2.6:** Impianto di prova con algometro per la determinazione delle pressioni massime esercitabili sulle diverse aree corporee [12].

vità superi il codice 1 dell'“Abbreviated Injury Scale” (AIS), un sistema di codifica creato dall'“Association for the Advancement of Automotive Medicine” per classificare e descrivere la gravità delle lesioni. Pertanto possono verificarsi solo quegli stress sulla pelle e il tessuto connettivo o muscolare sottostante in cui non vi è una penetrazione più profonda della cute accompagnata da ferite sanguinanti, fratture o altri danni scheletrici [8].

Ai fini della disamina dello scenario di contatto per una valutazione del rischio collaborativo, è necessario calcolare e considerare sia i valori di forza che di pressione [5]. Ricordando che la pressione è data dal rapporto tra la forza e l'area sulla quale questa viene esercitata e sottolineando che i valori massimi delle pressioni contenuti in [8] differiscono da quelli riportati nel documento di specifiche di riferimento, in figura 2.7, contenuta proprio in [8], è mostrata una rappresentazione grafica esemplificativa di forze e pressioni accettabili e non accettabili per la regione della mano.

In funzione della forza o della pressione massima può essere calcolato il massimo trasferimento di energia ammissibile all'interfaccia uomo-macchina (eq. 2.2) assumendo il caso peggiore, ovvero un contatto completamente anelastico [5], vale a dire un urto dopo il quale i corpi rimangono a contatto con conservazione della quantità di moto ma dispersione di energia meccanica.

$$E = \frac{F_{MAX}^2}{2K} = \frac{A^2 p_{MAX}^2}{2K} \quad (2.2)$$

dove:

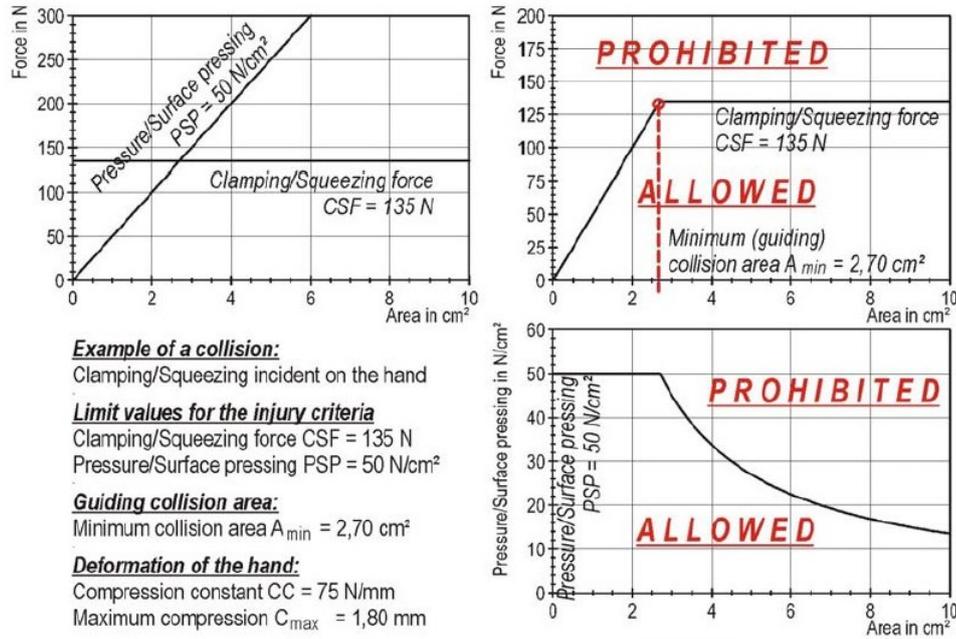
$E$  è l'energia trasferita;

$F_{MAX}$  è la forza di contatto massima per la specifica area corporea (tab. 2.1);

$p_{MAX}$  è la pressione di contatto massima per la specifica area corporea (tab. 2.1);

$K$  è la costante elastica effettiva per la specifica area corporea;

$A$  è l'area di contatto tra operatore e robot.



**Figura 2.7:** Esempio di rappresentazione grafica di forze e pressioni accettabili e non accettabili per la regione della mano [8].

Una volta calcolato il massimo trasferimento di energia ammissibile, questo può essere utilizzato per identificare la velocità massima alla quale il robot può muoversi attraverso l'area di lavoro collaborativa mantenendo i potenziali valori di forza esercitati in caso di contatto con l'operatore inferiori alle soglie (eq. 2.3). L'assunto alla base della derivazione della velocità limite è di equiparare l'energia elastica della regione del corpo umano all'energia cinetica totale, ipotizzando appunto un urto totalmente anelastico [5].

$$E = \frac{F_{MAX}^2}{2K} = \frac{1}{2} \mu v_{rel}^2 \quad (2.3)$$

dove:

$v_{rel}$  è la velocità relativa tra il robot e la regione del corpo umano;  
 $\mu$  è la massa ridotta del sistema a due corpi, espressa dalla formula:

$$\mu = \left( \frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1} \quad (2.4)$$

dove:

$m_H$  è la massa effettiva della regione del corpo interessata dall'urto, una combinazione della massa della regione con gli effetti dell'interconnettività della stessa con le regioni del corpo adiacenti, in particolare in relazione alla capacità della regione interessata di muoversi nella stessa direzione vettoriale del contatto quando questo si verifica [5];

$m_R$  è la massa effettiva del robot in funzione della postura e del movimento dello stesso, della massa totale delle parti in movimento del robot e del carico applicato al sistema robotico, compresi gli strumenti e il pezzo in lavorazione.

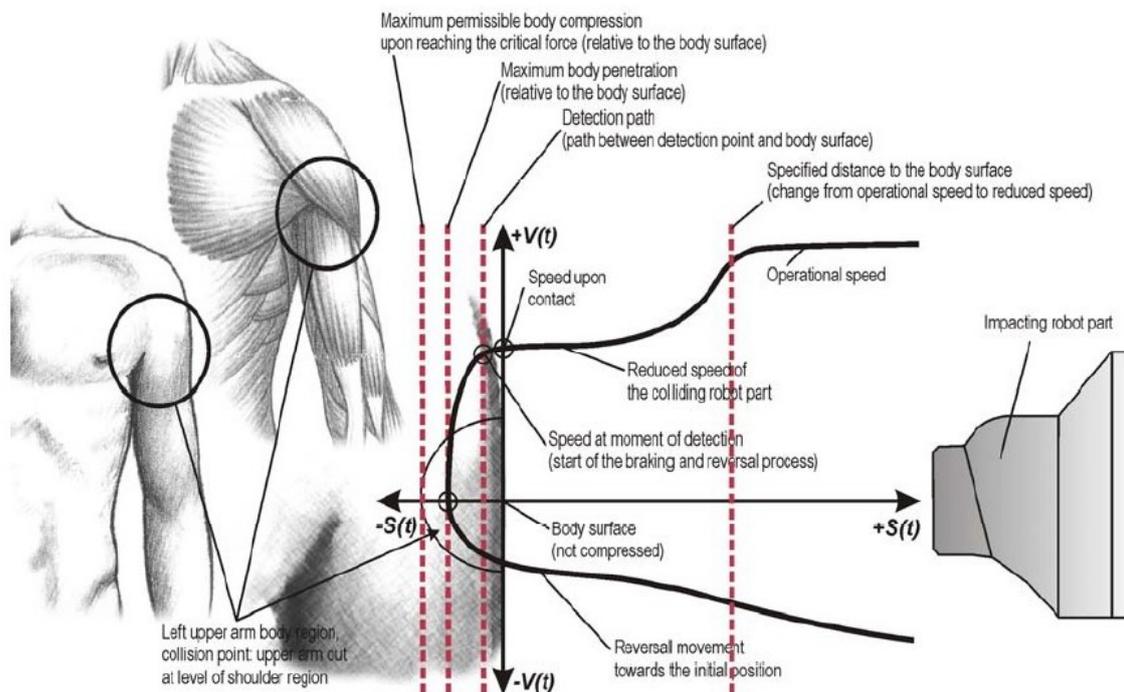
Tabella 2.1: Limiti biomeccanici delle diverse aree corporee [5].

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure $p_s$ N/cm <sup>2</sup>	Maximum permissible force N	Maximum permissible pressure multiplier $P_T$	Maximum permissible force multiplier $F_T$
Skull and forehead	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	
Face	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	190	150	2	2
	13	Humerus	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	160	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	300	140	2	2
	18	Forefinger pad ND	270		2	
	19	Forefinger end joint D	280		2	
	20	Forefinger end joint ND	220		2	
	21	Thenar eminence	200		2	
	22	Palm D	260		2	
	23	Palm ND	260		2	
	24	Back of the hand D	200		2	
	25	Back of the hand ND	190		2	
Thighs and knees	26	Thigh muscle	250	220	2	2
	27	Kneecap	220		2	
Lower legs	28	Middle of shin	220	130	2	2
	29	Calf muscle	210		2	

### 2.1.4 Metodi post-collisione

Quasi tutti quelli analizzati fino a ora possono essere catalogati come metodi pre-collisione per garantire la sicurezza degli operatori che lavorano in ambienti collaborativi. Talvolta però i metodi pre-collisione possono risultare troppo restrittivi poiché le funzioni dei cobot possono richiedere un certo livello di contatto fisico, in particolare qualora il lavoro sia condotto in modalità “controllo manuale” o “limitazione della potenza e della forza”. Si rendono dunque necessari dei metodi post-collisione, ovvero delle strategie utilizzate per rilevare i contatti e ridurre l'applicazione di forze. Tra questi, in [8] si suggerisce l'utilizzo di un sensore di forza posizionato sull'interfaccia meccanica del robot, in modo tale da rilevare le collisioni attraverso il confronto della forza misurata con una soglia. I contatti desiderati col sistema robotico, infatti, avvengono tipicamente con la flangia, con lo strumentario applicatogli o col pezzo in lavorazione, tutte situazioni rilevabili da un sensore applicato sulla flangia del robot.

La figura 2.8 mostra un esempio di collisione tra uomo e robot, dotato di sensore di forza per la rilevazione dei contatti, e l'andamento della velocità della parte del manipolatore in funzione della distanza dall'area colpita. Nel momento in cui questo si verifica, il contatto con l'operatore viene rilevato dal sensore di forza e viene attivato il processo di frenata e inversione del moto del robot. Fino a quando la velocità non viene completamente ridotta a zero, il robot continua a deformare la parte del corpo dell'operatore interessata dall'urto. Grazie all'utilizzo di un sensore di forza, in combinazione con altre misure di sicurezza come la limitazione della velocità, la deformazione effettiva può essere mantenuta al di sotto del valore massimo ammissibile, che può essere stimato come il rapporto della forza massima con la costante elastica dell'area del corpo interessata [5].



**Figura 2.8:** Esempio di collisione tra uomo e robot, dotato di sensore di forza per la rilevazione dei contatti, e andamento della velocità della parte del manipolatore in funzione della distanza dall'area colpita [8].

---

Per individuare un qualsiasi tipo di contatto con la flangia o col pezzo in lavorazione durante lo svolgimento di un qualsiasi tipo di mansione é opportuno utilizzare un sensore in grado di rilevare sia le forze che i momenti in tutte e tre le direzioni dello spazio. Utilizzando un sensore con un numero di gradi di libertà inferiore, infatti, potrebbero verificarsi collisioni non rilevabili dallo strumento. Per esempio, nel caso in cui si utilizzasse una cella di carico monoassiale, questa potrebbe non essere in grado di rilevare l'applicazione di forze nella direzione perpendicolare al suo asse, a differenza di un sensore a sei gradi di libertà.

## 2.2 Sensori di forza commerciali

### 2.2.1 Tecnologia di trasduzione

Nella tabella 2.2 sono riportate le tecnologie più ricorrenti nella realizzazione di sensori di carico con i relativi vantaggi e svantaggi.

**Tabella 2.2:** *Tecniche di trasduzione più ricorrenti e relativi vantaggi e svantaggi [13].*

Transduction technique	Modulated parameter	Advantages	Disadvantages
Capacitive	Change in capacitance	Excellent sensitivity Good spatial resolution Large dynamic range	Stray capacitance Noise susceptible Complexity of measurement electronics
Piezoresistive	Changed in resistance	High spatial resolution High scanning rate in mesh Structured sensors	Lower repeatability Hysteresis Higher power consumption
Piezoelectric	Strain (stress) polarization	High frequency response High sensitivity High dynamic range	Poor spatial resolution Dynamic sensing only
Inductive LVDT	Change in magnetic coupling	Linear output Uni-directional measurement High dynamic range	Moving parts Low spatial resolution Bulky Poor reliability
Optoelectric	Light intensity/spectrum change	Good sensing range Good reliability High repeatability High spatial resolution Immunity from EMI	Bulky in size Non-conformable
Strain gauges	Change in resistance	Sensing range Sensitivity Low cost Established product	Calibration Susceptible to temperature changes Susceptible to humidity Design complexity EMI induced errors Non-linearity Hysteresis
Multi-component sensors	Coupling of multiple intrinsic parameters	Ability to overcome certain limitations via combination of intrinsic parameters	Discrete assembly Higher assembly costs

#### Trasduttori piezoelettrici

Alcuni cristalli e alcune ceramiche generano delle tensioni proporzionali alle deformazioni dei rispettivi reticoli cristallini. Questi trasduttori, detti “piezoelettrici”, mostrano una elevata sensibilità e un’ottima risposta ad alta frequenza, tuttavia si limitano a misurare forze dinamiche e non sono in grado di misurare quelle statiche a causa della loro grande resistenza interna [13].

#### Trasduttori induttivi

Il passaggio di corrente alternata in una bobina, detta primaria, induce l’insorgere di una forza elettromotrice nelle bobine adiacenti, dette secondarie. Modulando la mutua induttanza tra le bobine, per esempio modificando la posizione di un nucleo di ferro nel caso di trasformatori differenziali variabili lineari, si modulano a loro volta le ampiezze e le fasi delle tensioni misurate nelle bobine di rilevamento. I trasduttori che si basano su questo principio fisico sono detti “induttivi”. Essi risultano piuttosto ingombranti e richiedono un’elettronica complessa per la modulazione dell’alimentazione e per la demodulazione del segnale alternato in uscita [13].

#### Trasduttori optoelettronici

Questo tipo di trasduttori impiega una sorgente luminosa, un mezzo di trasduzione e un

fotorilevatore. La sorgente luminosa, come per esempio un LED, genera luce che viaggia verso l'elemento di trasduzione attraverso una fibra ottica di trasmissione. L'elemento di trasduzione, a sua volta, modula l'intensità luminosa in maniera proporzionale al valore della forza da misurare. La luce modulata viaggia quindi attraverso una fibra ottica ricevente verso il rilevatore ottico, dove viene convertita in un segnale elettrico [14]. I trasduttori optoelettronici sono dotati di un'elevata risoluzione e sono immuni dalle comuni interferenze elettromagnetiche, tuttavia essi rendono la fase di progettazione e assemblaggio della struttura piuttosto complessa.

### Trasduttori resistivi

I trasduttori resistivi, di solito, sono legati a una struttura flessibile la cui deformazione, provocata dall'applicazione di forze e momenti, induce la variazione della loro resistenza secondo principi differenti. Nel caso dei trasduttori piezoresistivi è la variazione della resistività a provocare l'oscillazione della resistenza mentre nel caso degli estensimetri questa è dovuta alle modifiche geometriche. I cambiamenti di resistenza possono essere facilmente quantificati, pertanto essi, in particolare gli estensimetri anche in virtù dei bassi costi, sono i trasduttori più utilizzati nei sensori di carico, insieme a quelli capacitivi. I trasduttori resistivi sono altamente sensibili alle variazioni di umidità e temperatura. Per ovviare a questo problema, essi vengono spesso utilizzati nella configurazione completa del ponte di Wheatstone, ottenendo così una maggiore sensibilità, un elevato rapporto segnale/rumore e, appunto, l'annullamento dell'effetto termico, al costo di utilizzare però un numero elevato di trasduttori. Inoltre, poiché il loro principio di funzionamento si basa sulla misurazione della deformazione strutturale del supporto, esiste sempre un compromesso tra la rigidità della struttura e la sensibilità della misurazione. Nei sistemi robotici, l'elevata rigidità della struttura è però essenziale per sostenere i collegamenti meccanici, gli strumenti di lavoro e gli oggetti manipolati, la qual cosa comporta una bassa sensibilità dei trasduttori resistivi per queste specifiche applicazioni [14]. Infine, per ottenere la massima sensibilità e ripetibilità possibile, è importante collocarli sugli elementi elastici in posizioni e orientamenti opportuni, vale a dire dove le deformazioni sono massime. Il posizionamento richiede pertanto un lavoro che, se eseguito manualmente, risulta essere molto complesso e a bassa efficienza [15].

### Trasduttori capacitivi

Una condensatore è costituito da due armature di materiale conduttivo intervallate da un materiale dielettrico. Per misurare le forze applicate, i trasduttori capacitivi sfruttano le variazioni delle loro capacità, che seguono leggi espresse in funzione delle caratteristiche del materiale interposto tra le piastre, della loro area e della distanza che le separa. Esse differiscono l'una dall'altra a seconda della geometria dei condensatori. Per i condensatori piani, ovvero quelli caratterizzati da armature piane parallele, i più utilizzati in questo ambito, vale l'equazione 2.5:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

dove:

$C$  è la capacità del condensatore piano;

$\varepsilon_0$  è la costante dielettrica del vuoto;

$\varepsilon_r$  è la costante dielettrica dell'isolante interposto tra le armature;

$A$  è l'area di sovrapposizione tra le piastre;

$d$  è la distanza tra le armature.

La capacità, pertanto, varia sia quando l'area di sovrapposizione tra le piastre viene modificata che al variare della loro distanza. Come dimostrato in [16], però, la massima sensibilità dei trasduttori capacitivi si ottiene al variare della distanza tra le armature posizionate parallelamente. Essi sono uno dei mezzi più potenti per rilevare deflessioni estremamente piccole delle strutture sulle quali sono posizionati. Si può infatti notare come la loro sensibilità aumenti in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le armature (eq. 2.6):

$$\left| \frac{\partial C}{\partial d} \right| = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d^2} \quad (2.6)$$

Per questa ragione, a differenza dei resistivi, quelli capacitivi risultano essere i trasduttori ideali per applicazioni, come quelle robotiche, che richiedono un'elevata rigidità della struttura, la quale implica piccole deformazioni ma, allo stesso tempo, permette di posizionare le armature a distanze ridotte, ottenendo appunto un'elevata sensibilità. Oltre a ciò, i trasduttori capacitivi mostrano generalmente una buona risposta in frequenza. Essi sono tuttavia molto sensibili al rumore elettromagnetico ma questo problema può essere mitigato attraverso un'opportuna schermatura.

### 2.2.2 Sensore ATI Nano17

Il sensore Nano17 della "ATI Industrial Automation, Inc", lo sviluppatore leader a livello mondiale di accessori e utensili per bracci robotici, è un sensore che misura simultaneamente le forze ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) e le coppie ( $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$ ) rispetto al suo sistema di riferimento. Grazie all'utilizzo di appositi "adapter plates" realizzabili su misura, il trasduttore può essere montato agevolmente su qualsiasi tipo di supporto, in particolare sulla flangia di qualsiasi robot. Nonostante quanto detto nella sezione precedente, esso è costituito da una struttura compatta e resistente che converte forze e coppie in segnali analogici utilizzando degli estensimetri. Questi sono collegati a dei raggi meccanici, disposti simmetricamente all'interno del sensore, che vengono flessi dall'applicazione dei carichi esterni, in modo tale che la loro resistenza cambi in funzione della deformazione applicata.

In figura 2.9 è rappresentata la struttura dell'hardware necessario per il funzionamento del sensore.

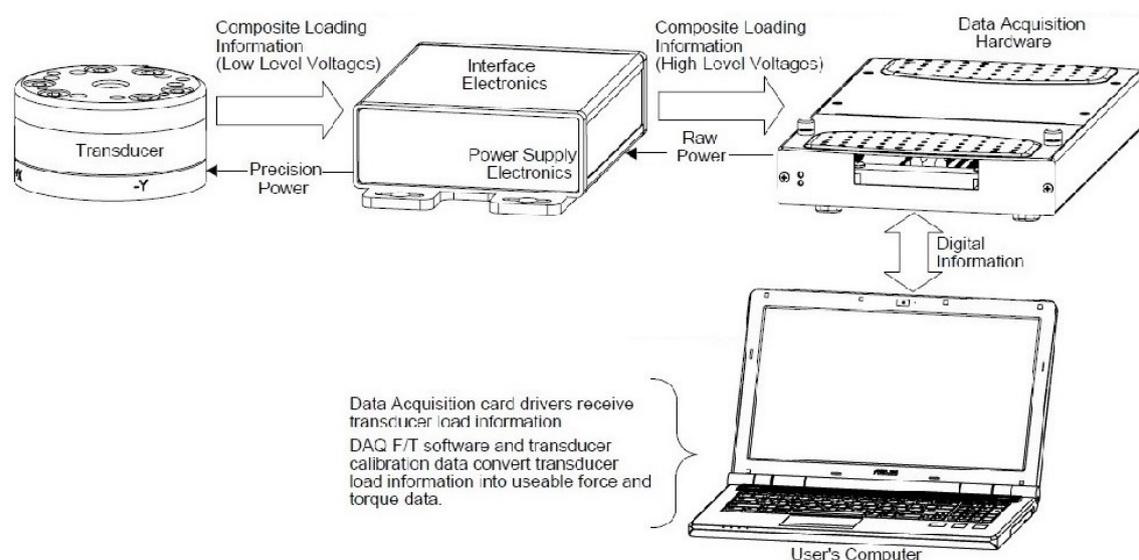


Figura 2.9: Struttura dell'hardware elettronico del sensore ATI Nano17 [17].

Il trasduttore é collegato a uno stadio di alimentazione e condizionamento del segnale attraverso un cavo schermato. Proprio questo cavo determina una delle principali limitazioni del sensore analizzato, così come degli altri sensori presenti sul mercato. É necessario infatti fare attenzione a non piegare il cavo a una distanza inferiore a 25mm dal trasduttore e, in generale, sono da evitare curve strette, in quanto rischiano di essere danneggiati sia il cavo che il trasduttore [18]. Queste precauzioni limitano notevolmente le possibilità di movimento dei robot sui quali il sensore viene montato.

Lo stadio di condizionamento, a sua volta, può ricevere l'alimentazione a 12V attraverso un alimentatore da parete oppure a 5V dal sistema di acquisizione al quale é collegato. Questo converte i segnali analogici in tensione in arrivo dal trasduttore in segnali digitali. Utilizzando il software ATI, infine, i segnali vengono convertiti in valori di forza e coppia attraverso i dati di calibrazione.

Nella tabella 2.3 sono riportate alcune specifiche del sensore ATI Nano17.

**Tabella 2.3:** Alcune specifiche del sensore ATI Nano17, SI-50-0.5 [18].

	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Intervallo	$\pm 50\text{N}$	$\pm 50\text{N}$	$\pm 70\text{N}$	$\pm 500\text{N}$	$\pm 500\text{N}$	$\pm 500\text{N}$
Risoluzione	1/80 N	1/80 N	1/80 N	1/16 Nmm	1/16 Nmm	1/16 Nmm
Sovraccarico	$\pm 250\text{N}$	$\pm 250\text{N}$	$\pm 480\text{N}$	$\pm 1.6\text{Nm}$	$\pm 1.6\text{Nm}$	$\pm 1.8\text{Nm}$
Rigidezza	$8.2 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$8.2 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$1.1 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	$2.4 \times 10^2 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	$2.4 \times 10^2 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	$3.8 \times 10^2 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$
Fr. di risonanza	7200Hz					
Peso	0.00907Kg					
Diametro	17mm					
Altezza	14.5mm					

### 2.2.3 Limiti

I principali limiti riscontrabili nei sensori presenti in commercio, come il sensore ATI Nano17, sono la fragilità e il costo elevato [16].

La fragilità é legata principalmente alla natura di questi sensori, che sono sottoposti ai carichi che devono misurare. Ogni sensore é ottimizzato per misurare carichi all'interno di determinati intervalli di funzionamento e l'applicazione di forze e momenti che eccedono i loro limiti strutturali può provocarne la deformazione permanente, con conseguente perdita della calibrazione, oppure la rottura. Alcuni sensori sono dotati di meccanismi per la protezione dai sovraccarichi, tipicamente strutture che iniziano a sostenere parte del carico applicato quando questo supera i limiti costruttivi. Essi però non risolvono del tutto il problema bensì sono utili per aumentare il margine di sicurezza, ovvero il rapporto tra lo sforzo massimo sopportabile dalla struttura con deformazioni in ambito elastico e lo sforzo massimo applicato. Oltre alla fragilità intrinseca di questi strumenti, un altro fattore che ne limita la solidità é legato alla presenza del cavo che porta l'alimentazione al trasduttore e il segnale allo stadio di condizionamento e acquisizione, come visto per il sensore Nano17. É necessario infatti limitare i movimenti del supporto al quale il trasduttore é fissato per evitare di danneggiarlo. Il secondo limite di questo tipo di sensori risiede nel loro prezzo elevato, anche superiore a 4000€ [9]. Se confrontato con il prezzo medio di vendita dei robot industriali, infatti, il costo di un sensore di carico a sei gradi di libertà non risulta essere trascurabile. "Statista", un portale web tedesco che rende disponibili dati raccolti da istituzioni che si occupano di ricerca di mercato, ha stimato in circa 40000€ il prezzo medio di vendita di un robot industriale nell'anno 2018. Un sensore del suddetto tipo ha pertanto un costo che si aggira intorno al 10% del prezzo medio di un robot industriale. Un'analisi dei costi degli altri componenti che non comprendono l'elemento sensibile indica che questi sono relativamente economici, con un

costo generale inferiore a 100€. Ciò implica che é proprio il processo di fabbricazione delle complesse geometrie degli elementi elastici ad aumentare i costi di produzione dei sensori [9].

## Capitolo 3

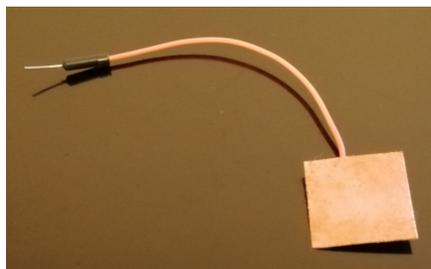
# Architettura del sistema

### 3.1 Impostazione del progetto

Lo scopo della tesi é stato quello di realizzare un sensore di carico a sei gradi di libert  per applicazioni di robotica collaborativa. In particolare, esso doveva essere in grado di misurare forze risultanti fino a 20N e momenti risultanti fino a 1000Nmm circa per poter rilevare il prelude di eventuali collisioni tra sistemi robotici e operatori, in modo tale da mantenere le forze esercitate sulle diverse aree corporee al di sotto dei rispettivi limiti biomeccanici (tab. 2.1). Il sensore doveva superare, almeno in parte, i limiti riscontrati nei sensori presenti sul mercato (sez. 2.2.3). L'obiettivo era pertanto realizzare un sensore che fosse poco costoso e limitarne la fragilit , peculiarit  di questi strumenti.

Per la realizzazione della struttura del sensore si   fatto uso di uno dei nove pilastri alla base dell'Industria 4.0 (cap. 1), ovvero la stampa 3D, che consente la realizzazione agevole di forme complesse contenendone i prezzi. Questa scelta   stata fatta alla luce delle considerazioni riportate in [9], secondo cui   proprio il processo di fabbricazione delle complesse geometrie degli elementi elastici ad aumentare i costi di produzione dei sensori.

Per prima cosa, confrontando i vantaggi e gli svantaggi delle principali tecnologie di trasduzione utilizzate nei sensori di carico (sez. 2.2.1), sono stati scelti e realizzati artigianalmente i trasduttori sui quali si basa il funzionamento del sensore. Alla luce dell'importante limitazione che l'utilizzo dei trasduttori piezoelettrici avrebbe comportato, delle difficolt  nell'utilizzo di quelli induttivi e optoelettronici e degli svantaggi di quelli resistivi, si   deciso di realizzare un sensore basato su trasduttori di tipo capacitivo per rilevare le deformazioni causate dall'applicazione dei carichi nelle direzioni perpendicolari alle rispettive armature piane, posizionate parallelamente. I condensatori sono stati realizzati utilizzando dei semplici fogli di rame sui quali sono stati saldati dei cavi (fig. 3.1).



**Figura 3.1:** *Una delle piastre realizzate e utilizzate per creare dei trasduttori capacitivi.*

In seguito, la struttura del sensore é stata studiata e progettata con “SOLIDWORKS” (sez. 3.2.1), un software per il disegno tridimensionale parametrico, prodotto dalla “Dassault Systèmes”. Sebbene il contenimento del costo della produzione del sensore, in questa fase, sia stata demandata all’utilizzo delle tecnologie additive, la geometria dell’elemento elastico sensibile all’applicazione dei carichi esterni é stata studiata per contenere i costi anche in previsione di una possibile futura produzione con tecnologie differenti.

Successivamente, sono stati selezionati i materiali per la costruzione del sensore (sez. 3.2.2) sulla base della compatibilità con la stampante 3D in dotazione, della disponibilità sul mercato e, soprattutto, alla luce delle loro proprietà meccaniche. Per questo é stata condotta una ricerca sul web, assistita dall’utilizzo del software “CES EduPack”, sviluppato da “Granta Design”, che ha messo a disposizione un database completo di materiali e informazioni.

La geometria del sensore, infine, é stata ottimizzata utilizzando gli appositi tool di “ANSYS Workbench”, della “ANSYS, Inc.” (sez. 3.2.3). Per questo é stato necessario definire con maggiore precisione gli intervalli di misura del sensore, in modo tale poi da ottimizzarne la sensibilità nello spazio utile di funzionamento. Questi sono stati stabiliti alla luce dei limiti meccanici dagli strumenti a disposizione per il prosieguo del progetto, in particolare del sensore ATI Nano17 da utilizzare durante la calibrazione.

Se il problema dei costi di produzione é stato affrontato attraverso la progettazione strutturale del sensore e la realizzazione con la stampa 3D, lo stesso non si può dire per la fragilità tipica di questi strumenti. Sebbene l’ottimizzazione eseguita abbia permesso di ottenere una struttura in grado di resistere ai carichi massimi stabiliti con un buon margine di sicurezza, l’errata applicazione di carichi che eccedono i suddetti limiti potrebbe provocare comunque un malfunzionamento del sensore con eventuale rottura. Come anticipato nella sezione 2.2.3, esistono dei metodi per rinforzare i sensori di forza e momento contro i sovraccarichi, questi tuttavia innalzano considerevolmente la complessità della struttura e difficilmente vengono applicati a sensori a sei gradi di libertà. Il problema é stato dunque affrontato da un punto di vista elettronico, eliminando quel cavo che, dovendo rimanere attaccato ai sensori durante il loro funzionamento, contribuisce ad aumentarne la fragilità (sez. 2.2.3).

É stato dunque studiato l’hardware del dispositivo e progettato il circuito (PCB, “Printed Circuit Board”) utilizzando “EAGLE” (sez. 3.3), un software di automazione del design elettronico sviluppato da “Autodesk”. Questo é stato poi realizzato artigianalmente su un supporto monostrato e inserito, insieme a una batteria ricaricabile per l’alimentazione, all’interno del sensore.

In seguito, sono stati sviluppati il firmware del microcontrollore (sez. 3.4), installato sulla PCB inserita nel sensore, e un’interfaccia grafica per computer (sez. 3.5), il primo con “PSoC Creator”, un ambiente di sviluppo integrato (IDE, “Integrated Design Environment”) della “Cypress Semiconductor Corporation” che consente l’editing simultaneo di hardware e firmware, la compilazione e il debug dei sistemi PSoC, e il secondo con “Processing”, un linguaggio di programmazione basato su “Java” che consente di sviluppare diverse applicazioni. La comunicazione tra i due sistemi é stata implementata attraverso il protocollo Bluetooth. Questo, insieme all’inserimento della PCB e della batteria all’interno del sensore, ha permesso di eliminare il cavo che tipicamente porta l’alimentazione al trasduttore e il segnale allo stadio di condizionamento e acquisizione, consentendo così la riduzione della fragilità caratteristica di questi sensori. Infine il dispositivo sviluppato é stato calibrato (sez. 4.1) a partire dai dati salvati dal sensore stesso e dai carichi di riferimento acquisiti simultaneamente. Per fare questo é stato utilizzato “MATLAB”, un ambiente per il calcolo numerico e l’analisi statistica scritto in C e creato da “MathWorks”.

Nella tabella 3.1 sono quindi riportati i principali requisiti di progetto.

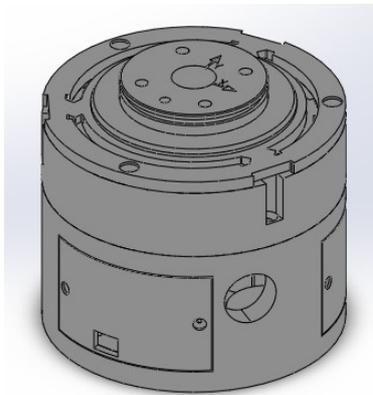
**Tabella 3.1:** *Requisiti di progetto: prescrizioni e desideri.*

Funzionali	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Misura di forze e momenti a sei gradi di libertà;</li> <li>• Intervalli di misura: [-20;+20]N e [-1000;+1000]Nmm;               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Accuratezza massima raggiungibile.</li> </ul> </li> </ul>
Operazionali	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comunicazione wireless tra sensore e interfaccia grafica;</li> <li>• Segnalazione del superamento dei carichi massimi impostati dall'utente.</li> </ul>
Energetici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batteria interna ricaricabile.</li> </ul>
Tecnologici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema integrato;</li> <li>• Realizzazione tramite stampa 3D.</li> </ul>
Meccanici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solidità della struttura;</li> <li>• Contenimento delle dimensioni e del peso del dispositivo, per quanto possibile;</li> <li>• Replica dell'interfaccia del robot al quale il sensore é connesso per non limitarne l'utilizzo.</li> </ul>
Usabilità	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivo Plug&amp;Play;</li> <li>• Scalabilità tra robot.</li> </ul>

## 3.2 Struttura del sensore

### 3.2.1 Disegno tecnico

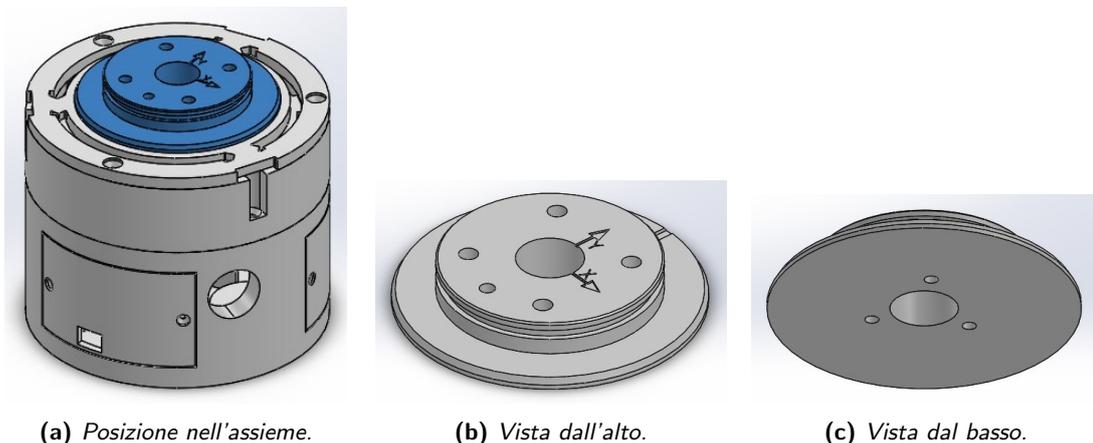
La struttura del sensore (fig. 3.2) é stata studiata e progettata con “SOLIDWORKS”, un software per il disegno tridimensionale parametrico, prodotto dalla “Dassault Systèmes”.



**Figura 3.2:** Rappresentazione in SOLIDWORKS della struttura del sensore realizzato.

Essa é stata suddivisa in più parti per diverse ragioni, in particolare la necessità di realizzare una struttura che consentisse il montaggio manuale e l’ancoraggio del sensore al robot in dotazione ma anche a causa delle differenti proprietà meccaniche richieste alle diverse componenti, che hanno imposto l’utilizzo di materiali differenti (sez. 3.2.2).

#### 3.2.1.1 Interfaccia meccanica

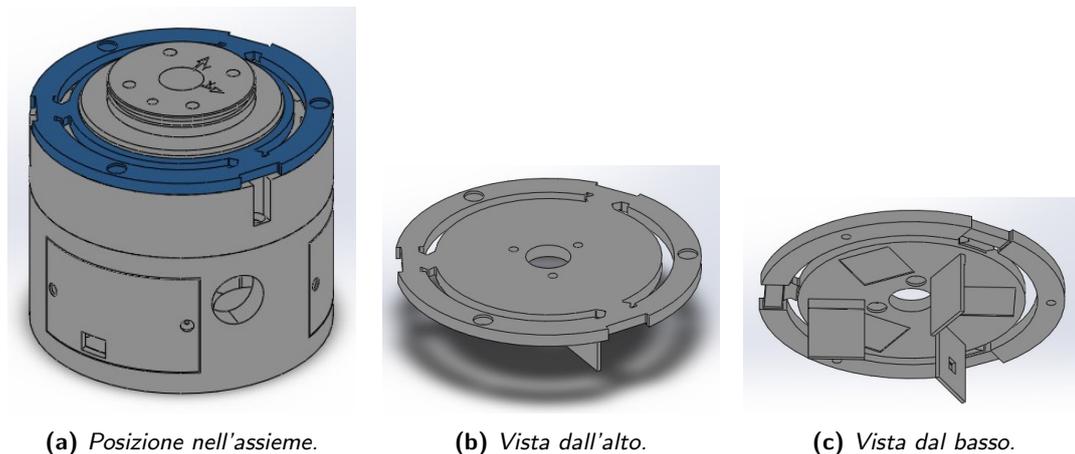


**Figura 3.3:** Rappresentazione in SOLIDWORKS dell’interfaccia meccanica del sensore realizzato.

L’interfaccia del sensore é stata realizzata in maniera tale da replicare la flangia del robot in dotazione, un “MC004N” della “Kawasaki Robotics” mostrato in figura 1.3a. Questa proprietà, grazie alla flessibilità conferita dalla realizzazione con la stampa 3D, può essere estesa anche all’utilizzo di sistemi robotici differenti. Si può osservare in particolare il foro centrale, che consente l’utilizzo del settimo grado di libertà messo a disposizione dal robot

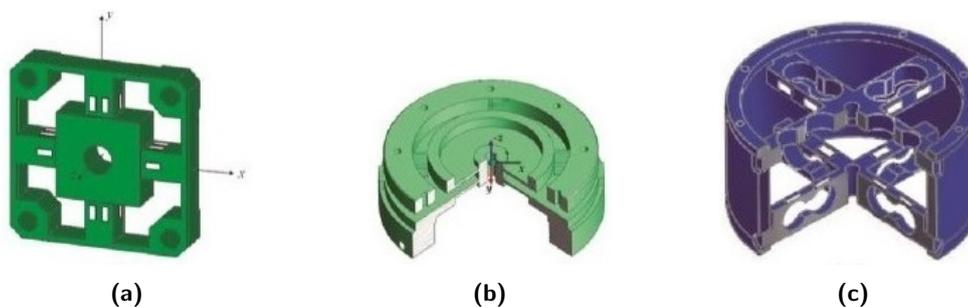
attraverso il passaggio dei cavi necessari. Possono essere notati, inoltre, i fori per avvitare al dispositivo eventuali strumenti e quelli realizzati sulla parte inferiore del pezzo per ancorarlo all'elemento elastico sottostante. Sono stati infine incisi, sulla faccia superiore, gli assi X e Y del sistema riferimento cartesiano adottato per la misurazione dei carichi applicati al dispositivo. L'asse Z, per la regola della mano destra, risulta uscente dal sensore.

### 3.2.1.2 Elemento sensibile ai carichi



**Figura 3.4:** Rappresentazione in SOLIDWORKS dell'elemento sensibile ai carichi del sensore realizzato.

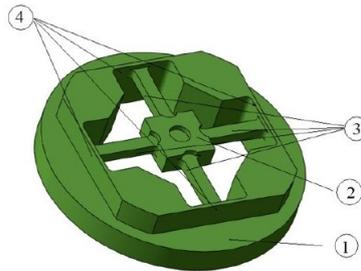
Sebbene il contenimento del costo della produzione del sensore, in questa fase, sia stata demandata all'utilizzo delle tecnologie additive, la geometria dell'elemento elastico sensibile all'applicazione dei carichi esterni è stata studiata per contenere i costi anche in previsione di una possibile futura produzione con tecnologie differenti. In figura 3.5 sono riportate alcune delle strutture più utilizzate nella realizzazione degli elementi elastici.



**Figura 3.5:** Tipologie ricorrenti di strutture degli elementi sensibili ai carichi di sensori a sei gradi di libertà [9].

A partire dalla prima struttura, si nota una tendenza ad aumentare la complessità della geometria al fine di ottenere migliori prestazioni dei sensori. In particolare, l'obiettivo è quello di disaccoppiare le deformazioni e quindi le variazioni dei segnali, ovvero fare in modo che l'applicazione di una forza o di un momento non provochi variazioni nei segnali corrispondenti a carichi differenti e non modifichi la sensibilità rispetto agli stessi. Questo, come verrà spiegato meglio in seguito, ha infatti importanti implicazioni sul funzionamento del sensore. Tuttavia, come evidenziato in [9], è proprio il processo di fabbricazione delle complesse geometrie degli elementi elastici ad aumentare i costi di produzione. Per questa ragione, in vista

di possibili futuri sviluppi che non prevedano la stampa 3D come tecnologia produttiva ma anche per contenere la complessità della struttura in questa fase, vista la necessità di montare manualmente il sensore, è stato deciso di realizzare un elemento sensibile sul modello della tipologia mostrata in figura 3.5a. Essa è formata (fig. 3.6) da una piattaforma centrale che funge da collegamento con l'ambiente, da un numero variabile di bracci che la sorreggono e che si collegano a delle travi sottili realizzate sul bordo esterno di sostegno. I bracci e le travi sono le componenti sensibili all'applicazione dei carichi esterni, ovvero quelle che si deformano maggiormente.

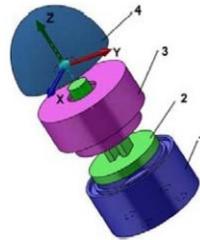


**Figura 3.6:** Componenti della tipologia di elemento sensibile selezionata [19]: (1) bordo esterno; (2) piattaforma centrale; (3) bracci; (4) travi sottili.

Tutti questi elementi possono essere ritrovati anche nel design realizzato con SOLIDWORKS (fig. 3.4). Rispetto alla struttura mostrata in figura 3.6, è possibile riscontrare però una differenza nella geometria dei bracci. Essi, infatti, presentano un angolo che è stato introdotto, ispirandosi a [15], per fornire al processo di ottimizzazione (sez. 3.2.3) un ulteriore parametro da variare per raggiungere la maggiore sensibilità possibile.

Possono essere osservate, inoltre, le postazioni riservate alle armature. Esse sono sei in quanto generalmente sono necessarie informazioni provenienti da almeno sei posizioni diverse per misurare le forze e le coppie nelle tre direzioni dello spazio [16]. Non è stato utilizzato un numero maggiore di trasduttori per contenere il più possibile i tempi di calcolo per convertire i valori di capacità in carichi, resi già piuttosto lunghi dalla tipologia di calibrazione adottata (sez. 4.1). Tre armature, con le loro corrispondenti posizionate sulla base del sensore (sez. 3.2.1.3), sono state posizionate parallelamente alla piattaforma centrale e le altre tre, con le rispettive controparti, ortogonalmente rispetto alla stessa. Teoricamente, i primi trasduttori dovrebbero essere maggiormente sensibili all'applicazione di forze in direzione Z e momenti nelle altre due direzioni mentre i secondi dovrebbero essere più sensibili alle forze in direzione X e Y e ai momenti nella terza direzione dello spazio. Questo in virtù del fatto che l'avvicinamento o l'allontanamento relativo tra le piastre dei suddetti trasduttori sono provocati prevalentemente dai carichi citati. Le armature sono state realizzate di forma quadrata con lato medio pari a 2 cm. Le dimensioni sono state scelte in maniera tale da massimizzare la sensibilità dei trasduttori, compatibilmente con l'idea di contenere l'ingombro radiale affinché questo non superasse eccessivamente quello della flangia del robot. In accordo con l'equazione 2.6, infatti, aumentando l'area delle armature aumenta anche la sensibilità dei trasduttori capacitivi. Si possono infine notare i fori realizzati per avvitare la piattaforma centrale al pezzo che simula l'interfaccia meccanica del robot, quelli sull'anello per collegare il pezzo alla struttura sottostante e il foro centrale per il passaggio dei cavi dal robot all'ambiente esterno.

Come é stato piú volte accennato, i sensori di questo tipo sono talvolta dotati di sistemi di protezione contro i sovraccarichi per ridurre il rischio di deformazioni permanenti degli elementi elastici e quindi malfunzionamenti e rotture. L'aumento dell'area delle sezioni e l'utilizzo di materiali piú resistenti infatti, riducendone le deformazioni, diminuiscono la sensibilità dei dispositivi. Questi sistemi di protezione sono tipicamente costituiti da strutture che iniziano a sostenere parte del carico applicato quando questo supera i limiti costruttivi. In figura 3.7 é riportato un esempio di protezione contro i sovraccarichi per un sensore a quattro gradi di libert . Quando le forze in direzione X o Y, applicate al puntale, superano i limiti di funzionamento del sensore, le deformazioni dell'elemento elastico diventano tali da far raggiungere al pilone centrale la struttura di sostegno, che inizia dunque a sostenere parte del carico, riducendo il rischio di deformazioni permanenti. La distanza tra il pilone e la struttura di protezione é determinata a questo scopo attraverso opportune simulazioni.



**Figura 3.7:** Tipico sistema di protezione contro i sovraccarichi [20]: (1) base; (2) elemento elastico; (3) struttura di sostegno; (4) puntale.

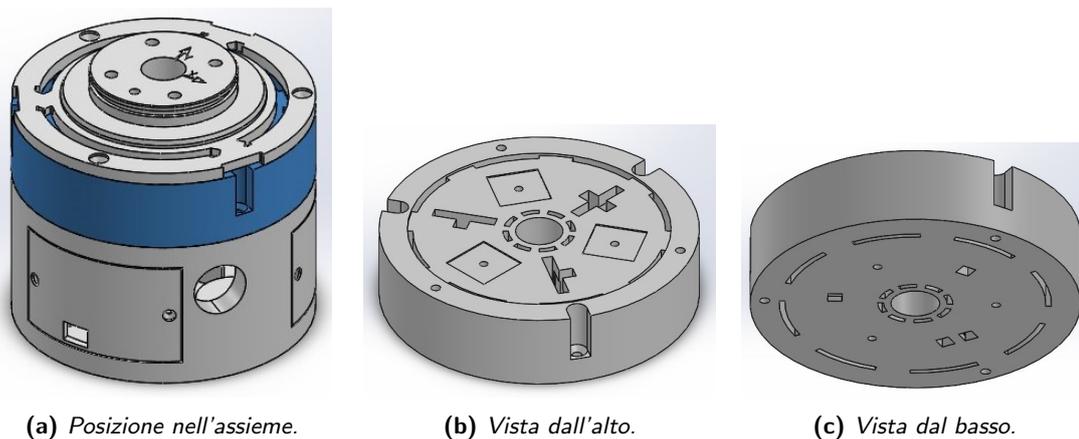
Il problema nel replicare questo tipo di tecnologia in un sensore a sei gradi di libert  risiede nell'accoppiamento tra le deformazioni provocate dai diversi tipi di carichi semplici. Un determinato stato di deformazione lungo una direzione, infatti, potrebbe essere dovuto sia all'applicazione di un sistema di carichi sostenibile che a un sistema di carichi non sostenibile dalla struttura del sensore. Per questa ragione é complicato determinare le distanze alle quali posizionare le strutture di protezione, pertanto difficilmente questo tipo di soluzione si trova applicata a sensori di carico a sei gradi di libert  per i quali il problema dell'accoppiamento non é stato risolto dal punto di vista strutturale, come nel caso del dispositivo realizzato.

Il problema dell'accoppiamento tra i segnali, legato all'accoppiamento tra le deformazioni per la natura dei trasduttori stessi, introduce una problematica ulteriore. Il classico calcolo matriciale, che, a partire dai segnali forniti dai trasduttori, permette di calcolare lo stato di carico applicato attraverso la moltiplicazione con una matrice di calibrazione caratterizzata da un numero di colonne pari al numero degli stessi trasduttori, si basa sull'ipotesi di funzionamento lineare del sensore. Questa ipotesi, tuttavia, risulta essere tanto piú lontana dalla realt  quanto maggiore é l'accoppiamento tra i segnali. L'applicazione di una forza in una certa direzione, infatti, pu  influenzare la sensitivit  alle forze applicate in un'altra direzione, come spiegato in [21]. Per risolvere questo problema sono state introdotte diverse misure, in particolare é stata eseguita una calibrazione in linea con le considerazioni riportate in [22] e [21] (sez. 4.1). Oltre a questo per , sono stati adottati anche alcuni accorgimenti strutturali minori. É stata massimizzata, per quanto possibile, la distanza tra i diversi trasduttori, in modo tale da ridurre al minimo le interferenze, e le armature appartenenti agli stessi trasduttori sono state realizzate di dimensioni leggermente differenti,  $\pm 1\text{mm}$  rispetto al valore medio, cosicché gli spostamenti in direzione ortogonale alla perpendicolare rispetto alle piastre non modifichino l'area di sovrapposizione tra queste e quindi la capacit  rilevata. Infine, la separazione tra le armature é stata ridotta il piú possibile per rendere gli strumenti piú

sensibili alle variazioni della distanza tra di esse e rendere ancora meno influenti gli spostamenti indesiderati nelle altre direzioni. Il limite inferiore per la separazione tra le armature, fissato a 1mm, è dovuto alla precisione finita dei pezzi realizzati con la stampa 3D e alla necessità di tenere un certo margine di manovra per il montaggio manuale del sensore.

Come specificato nella sezione 2.2.1, il problema maggiore nell'utilizzo di trasduttori capacitivi risiede nella loro elevata sensibilità al rumore elettromagnetico. Senza le adeguate contromisure, i trasduttori rileverebbero anche eventuali capacità parassite dovute, per esempio, dall'avvicinamento di una parte del corpo dell'operatore al dispositivo, falsandone le misure e riducendone pertanto l'affidabilità. Per questo motivo, il sensore è stato interamente schermato mettendo a massa dei fogli di alluminio incollati alla struttura. Collegando la schermatura con le armature utilizzando dello scotch, sull'elemento sensibile si è venuta a creare una continuità, testata col multimetro, che ha consentito di mettere tutto il sistema allo stesso potenziale elettrico con l'utilizzo di un unico cavo, passante attraverso la base e connesso alla massa del microcontrollore.

### 3.2.1.3 Base



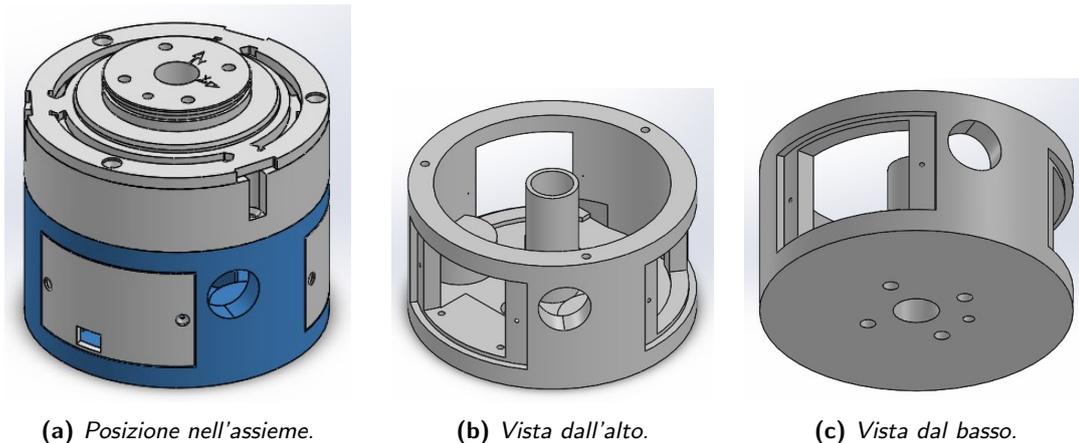
**Figura 3.8:** Rappresentazione in SOLIDWORKS della base del sensore realizzato.

In figura 3.8 è rappresentata la base del sensore, ovvero il componente sul quale l'elemento sensibile si inserisce ed è avvitato. Si possono osservare anche su questo pezzo, infatti, le postazioni per le armature, che formano con quelle posizionate sull'elemento descritto in precedenza i trasduttori capacitivi. In particolare, sono stati realizzati dei tagli estrusi per permettere l'inserimento delle piastre posizionate trasversalmente rispetto alla piattaforma centrale dell'elemento sensibile. Le dimensioni sono state studiate per consentire il posizionamento delle armature corrispondenti alla distanza minima, fissata a 1mm. In corrispondenza di ogni piastra è stato realizzato un foro per permettere il passaggio dei rispettivi cavi al microcontrollore. Si può notare la presenza di un settimo passaggio, il quale consente di connettere alla massa del controllore la schermatura e le armature sul pezzo sovrastante. Sulla superficie superiore del bordo esterno sono stati realizzati i fori che consentono l'ancoraggio dell'elemento elastico e, più in profondità, quelli tramite i quali il tutto è agganciato al supporto (sez. 3.2.1.4). Questo stratagemma consente di sganciare il sistema di trasduzione dalla porzione sottostante del sensore, in modo tale che non si renda necessaria una nuova calibrazione ogniqualevolta si debba rimuovere il dispositivo dal robot. Anche in questo caso

é presente un foro centrale per il passaggio dei cavi dallo stesso.

Il sensore é stato schermato dalle interferenze esterne ma anche da quelle interne. Posizionando dei fogli di alluminio all'interno delle fessure appositamente ricavate intorno a esso, é stato infatti schermato il foro centrale, cosicché i trasduttori non rilevino eventuale rumore legato all'azionamento del settimo grado di libert  attraverso i cavi passanti proprio dal suddetto foro. É stato schermato, inoltre, anche tutto il sistema di trasduzione dai componenti elettronici sottostanti (sez. 3.2.1.4).

#### 3.2.1.4 Supporto



**Figura 3.9:** Rappresentazione in SOLIDWORKS del supporto del sensore realizzato.

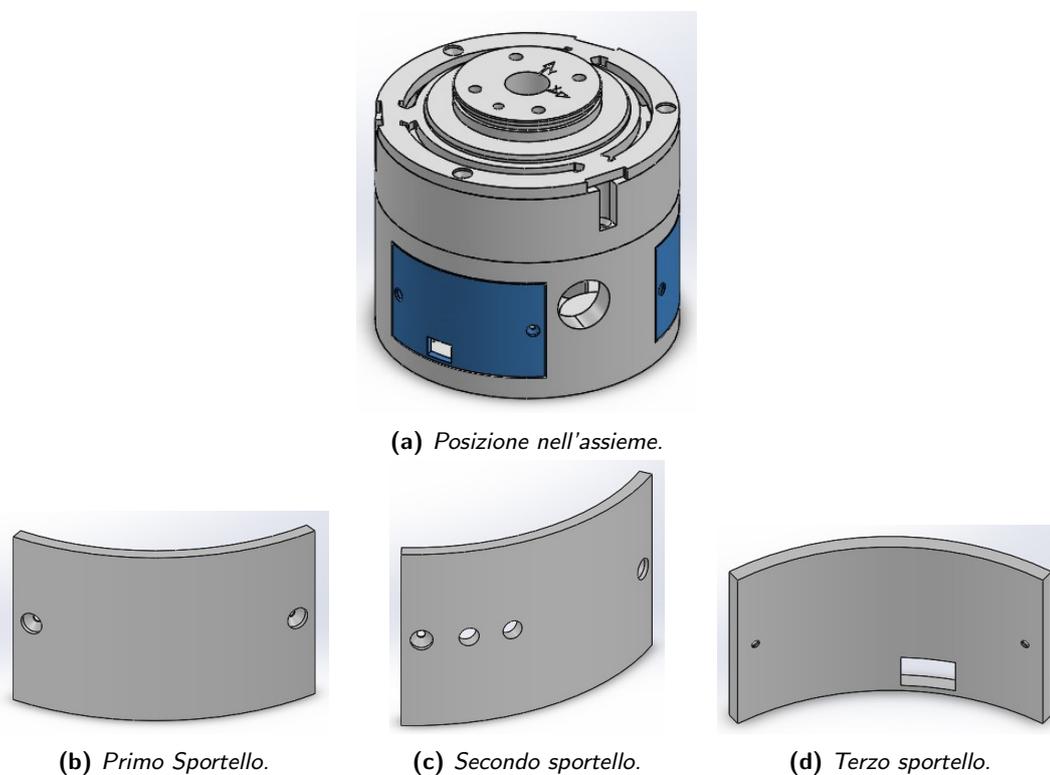
Questo é il componente che si interfaccia direttamente con il sistema robotico. Sulla superficie inferiore, infatti, sono stati realizzati dei fori, in posizioni analoghe ai fori sull'interfaccia meccanica del sensore, che consentono l'avvitamento sulla flangia reale del robot. Sul bordo esterno si possono notare, invece, i fori attraverso i quali le parti sovrastanti si ancorano al supporto stesso.

Al suo interno é stato ricavato lo spazio adibito al contenimento dell'elettronica del dispositivo. L'altezza del pezzo é stata quindi fissata per permettere l'inserimento di tutti i componenti elettronici. Alla base del supporto é stato realizzato un alloggio per la batteria, studiato in maniera tale da impedirne il movimento quando il sensore é operativo ma consentirne l'eventuale sostituzione. Sono stati realizzati dei fori che permettono il fissaggio del modulo per la ricarica della batteria e dei rialzi sui quali é avvitata la PCB. Sulla parete laterale é presente inoltre un foro nel quale é stato inserito l'interruttore per l'accensione del dispositivo. Sulla stessa sono stati ricavati anche degli accessi che consentono il montaggio del sensore e il cambio della batteria, per il quale non é quindi necessario smontare il dispositivo. Si possono notare infine dei piccoli fori utilizzati per avvitare degli sportelli (sez. 3.2.1.5) che chiudono questi passaggi durante il funzionamento del sensore.

Anche in questo caso é stata realizzata una schermatura per rendere il circuito elettronico, soprattutto i cavi ai quali sono saldate le armature, immune dal rumore elettromagnetico esterno e interno, quest'ultimo legato alla presenza dei cavi passanti per il foro centrale. É stato collegato un nuovo cavo per mettere il sistema a massa, permettendo cos  di ottenere una ridondanza utile per garantire una sicura schermatura del sensore. É stata lasciata per  una finestra per consentire, attraverso il modulo Bluetooth, l'invio di dati all'esterno, che sarebbe altrimenti stato ostacolato. Per schermare il sistema nella maniera migliore possibile,

inoltre, sarebbe stato utile ricoprire con i fogli di alluminio anche i cavi saldati alle piastre dei trasduttori. Anche attraverso i cavi, infatti, essi possono rilevare del rumore elettromagnetico. Questa operazione è risultata però piuttosto complessa e soprattutto rischiosa, in quanto un eventuale contatto tra i cavi, ricoperti di alluminio posto a massa, con altri conduttori presenti nel sistema avrebbe provocato un cortocircuito dalle conseguenze potenzialmente dannose. Per risolvere questo problema i cavi sarebbero potuti essere ulteriormente isolati ma, così facendo, essi sarebbero diventati troppo rigidi all'interno di uno spazio ridotto nel quale la loro flessibilità è risultata fondamentale per consentire il collegamento ai convertitori posizionati sulla PCB. La struttura, invece, già coperta dai fogli di alluminio, è stata attentamente ricoperta con dello scotch per evitare lo stesso rischio di cortocircuiti.

### 3.2.1.5 Sportelli

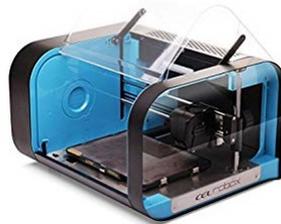


**Figura 3.10:** Rappresentazione in SOLIDWORKS degli sportelli utilizzati per chiudere le fessure sul supporto del sensore realizzato.

La funzione degli sportelli, come detto in precedenza, è quella di chiudere le aperture presenti sul supporto del sensore. Questo è importante principalmente quando il robot sul quale il sensore viene montato è in movimento. Senza lo sportello in figura 3.10c, infatti, la batteria inserita nel supporto non rimarrebbe in posizione. Su ognuno di essi sono stati realizzati dei fori per l'inserimento delle viti di connessione con il supporto. Sul secondo sportello sono stati realizzati altri due fori che consentono sia il passaggio della luce proveniente dal LED, che segnala il livello di carica della batteria, sia l'inserimento di due cavi necessari durante la calibrazione del sensore (sez. 4.1). Sul terzo sportello, invece, è presente un'apertura attraverso la quale è possibile inserire il cavo per ricaricare il dispositivo. Anche queste parti sono state schermate in continuità con quanto fatto per il resto del sensore.

### 3.2.2 Materiali

I materiali utilizzati per realizzare la struttura del sensore sono stati diversi. Essi sono stati scelti, tra quelli compatibili con la stampante 3D in dotazione, in virtù della conformità delle loro proprietà meccaniche alle necessità costruttive.



**Figura 3.11:** Stampante 3D robox della CEL [23].

La stampante 3D in dotazione era una “robox” della “CEL” (fig. 3.11). Essa utilizza la tecnologia additiva nota come “Modellazione a deposizione fusa”, con la quale i pezzi vengono realizzati depositando materiale strato per strato. Un filamento, tipicamente di materiale termoplastico, viene prelevato da una bobina e fornito a un estrusore, il quale ne gestisce il flusso. Esso viene riscaldato per poter sciogliere il materiale e viene guidato in maniera tale da rilasciarlo sul pezzo in costruzione, disegnando così la sezione della geometria da realizzare corrispondente all’altezza alla quale lo stesso estrusore si trova rispetto al letto della stampante. La cinematica, di tipo cartesiano, è affidata ai movimenti dell’estrusore lungo gli assi X e Z, quest’ultimo perpendicolare alla base costituita dal letto della stampante, e al letto stesso lungo l’asse Y.

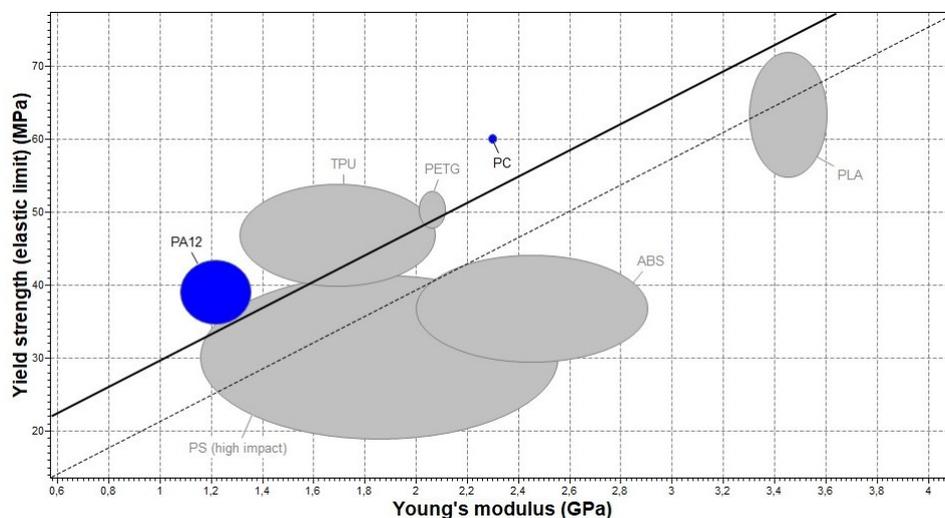
Nella tabella 3.2 sono riportate alcune specifiche della stampante in dotazione.

**Tabella 3.2:** Alcune specifiche della stampante robox della CEL [24].

Temperatura massima del letto	150°C	
Temperatura massima dell’estrusore	300°C	
Volume di stampa (X x Y x Z)	210 x 150 x 100 mm	
Massima risoluzione degli strati	20 $\mu$ m	
	Assi X e Y	Asse Z
Precisione di posizionamento	7.5 $\mu$ m	0.15625 $\mu$ m

Le differenti proprietà meccaniche richieste alle varie componenti del sensore hanno imposto l’utilizzo di materiali diversi. In particolare, è stata condotta una ricerca approfondita sui materiali compatibili con la stampante per identificare quello più adatto alle specifiche associate all’elemento sensibile all’applicazione dei carichi. Questo doveva risultare il meno rigido possibile per massimizzare la sensibilità del sensore. Infatti, se da un lato l’elemento elastico deve sostenere gli strumenti e i pezzi in lavorazione limitando gli spostamenti indesiderati, dall’altro lato la precisione finita dei pezzi realizzati dalla stampante e il montaggio manuale del sensore hanno imposto la necessità di posizionare le armature a una distanza iniziale non inferiore a 1mm, piuttosto elevata per dei trasduttori capacitivi. Riducendo la rigidità dell’elemento elastico, pertanto, era possibile ottenere deformazioni della struttura, e quindi spostamenti delle armature, tali da coprire interamente lo spazio a disposizione applicando i

carichi massimi previsti (sez. 3.2.3), incrementando, in ultima analisi, la ridotta sensibilità iniziale del dispositivo dovuta all'elevata distanza tra le armature. Allo stesso tempo, l'elemento sensibile doveva essere il più resistente possibile, per ridurre il rischio di deformazioni permanenti che comprometterebbero il funzionamento del sensore. Per queste ragioni, il materiale doveva essere caratterizzato da un modulo elastico relativamente basso, garanzia di elevata flessibilità, e da un limite elastico relativamente alto, per ottenere un buon margine di sicurezza. Dal momento che, tipicamente, queste due quantità sono correlate positivamente, ovvero all'aumentare dell'una cresce anche l'altra, si è quindi resa necessaria un'analisi più approfondita dei materiali disponibili. Per questo si è fatto uso anche del software "CES EduPack", sviluppato da "Granta Design", che ha messo a disposizione un database completo di materiali e informazioni. In figura 3.12 sono rappresentati i possibili valori dei moduli e dei limiti elastici della maggior parte dei materiali compatibili con la stampante in dotazione, ovvero quelli per i quali è stato possibile risalire ai suddetti dati. Ai fini della scelta, ogni materiale è stato identificato dal punto, appartenente all'insieme che lo rappresenta, per il quale passa la retta, appartenente al fascio improprio parallelo alla diagonale del grafico, caratterizzata dalla minore intercetta all'origine. Questo punto infatti rappresenta, tra quelle ammissibili, la combinazione di valori peggiore per quanto detto in precedenza, ovvero un binomio costituito da un elevato modulo e un ridotto limite elastico tra quelli di cui il materiale può essere dotato. I materiali migliori, vale a dire pertanto quelli associati a rette caratterizzate da intercette all'origine maggiori, sono risultati essere il "PC-Plus" prodotto da "Polymaker" e il "Nylon PA12 - Natural" della "Robox". Tra questi è stato privilegiato il secondo in virtù del modulo elastico notevolmente inferiore, proprietà che consentiva di ottenere deformazioni analoghe al primo materiale con sezioni resistenti maggiori, riducendo pertanto gli sforzi. Per questo motivo, infatti, la differenza tra i limiti elastici è apparsa meno marcata e incisiva rispetto a quanto mostrato dal grafico.



**Figura 3.12:** Rappresentazione grafica in CES EduPack dei moduli e dei limiti elastici di alcuni dei materiali presi in considerazione per la realizzazione della struttura del sensore.

Per cercare di ottenere delle proprietà meccaniche in linea con quelle teoriche, la densità del componente realizzato con questo materiale è stata impostata al 100%, grazie all'apposita funzione fornita dalla stampante. Selezionando densità di stampa inferiori, infatti, le proprietà reali si sarebbero teoricamente discostate da quelle attese e i parametri ottimali per la geometria dell'elemento sensibile, ottenuti in seguito alle simulazioni eseguite (sez. 3.2.3),

non sarebbero stati validi.

Per quanto riguarda le altre componenti del sensore, invece, l'unica specifica richiesta era quella dell'elevata rigidità, per limitare gli spostamenti indesiderati nonché superflui, dal momento che questi non contribuiscono ad aumentare la sensibilità del dispositivo. I materiali utilizzati sono stati pertanto il "TitanX" bianco prodotto da "Formfutura", un'evoluzione dell'ABS con migliori proprietà meccaniche, e il PLA rosa della Robox, dotati di elevato modulo elastico. La densità di questi elementi é stata impostata su percentuali variabili tra il 30% e il 40% per ridurre i tempi di stampa. Essi, infatti, non sono stati oggetto di ottimizzazione in quanto non elementi attivi nella rilevazione dei carichi, pertanto la discrepanza tra il valore effettivo del modulo elastico e il valore teorico non risultava essere un fattore di interesse. Sicuramente questa scelta ha ridotto la rigidità delle componenti realizzate con questi materiali, che però si sono comunque dimostrate sufficientemente rigide.

### 3.2.3 Ottimizzazione

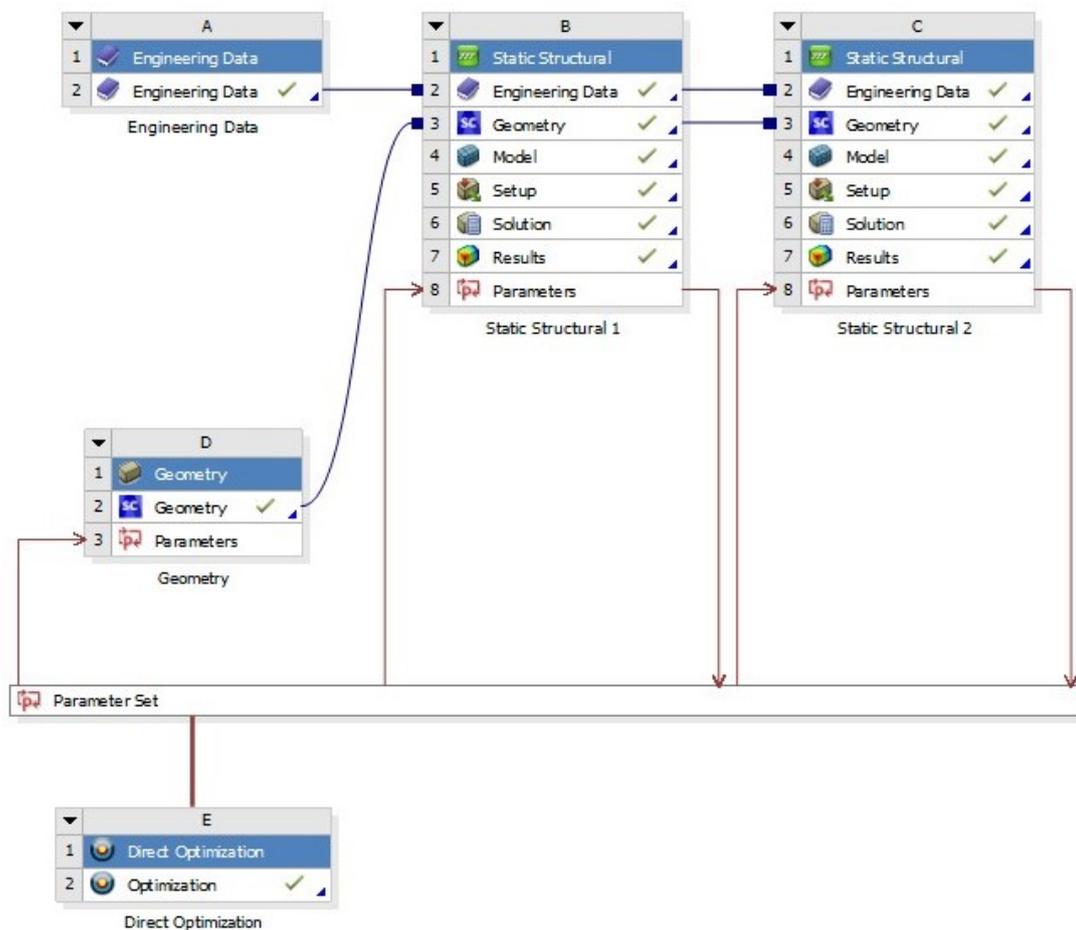


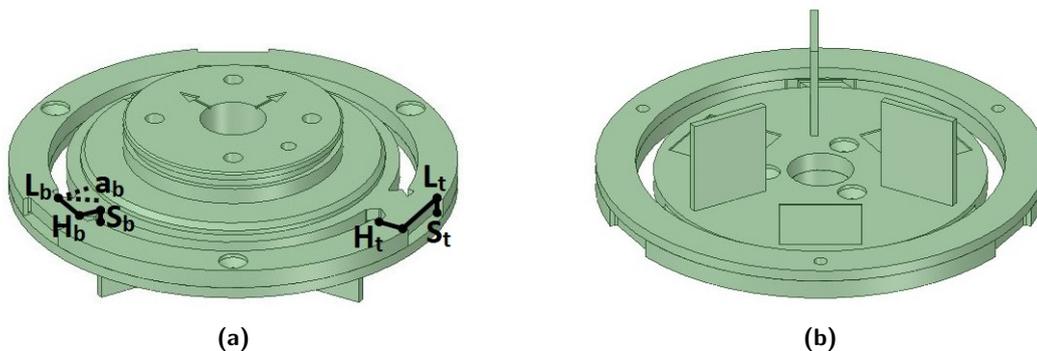
Figura 3.13: Schematico del processo di ottimizzazione svolto in ANSYS Workbench.

Una volta progettata la struttura del sensore e stabiliti i materiali da utilizzare per la realizzazione della stessa, é stata eseguita un'ottimizzazione della geometria dell'elemento

elastico, in maniera tale da massimizzarne le deformazioni causate dall'applicazione dei carichi, nei limiti fissati in particolare dalla distanza iniziale tra le armature dei trasduttori. A maggiori deformazioni corrispondono infatti maggiori variazioni di capacità, con conseguente innalzamento della sensibilità del dispositivo.

In figura 3.13 è riportato lo schematico del processo di ottimizzazione eseguito utilizzando gli appositi tool di “ANSYS Workbench”, della “ANSYS, Inc.”. Il processo ha svolto diverse analisi strutturali su sistemi dalle geometrie differenti, ottenute facendo variare alcuni parametri costruttivi a partire da un modello di base. Date le proprietà meccaniche dei materiali con i quali le differenti parti del sistema sarebbero state poi realizzate, le analisi hanno fornito dati sulle deformazioni subite dalle diverse strutture quando sottoposte ai sistemi di carico massimi misurabili dal sensore. La combinazione dei parametri scelta è stata quindi quella associata alla struttura che, secondo le simulazioni svolte, dovrebbe subire le maggiori deformazioni nei limiti imposti.

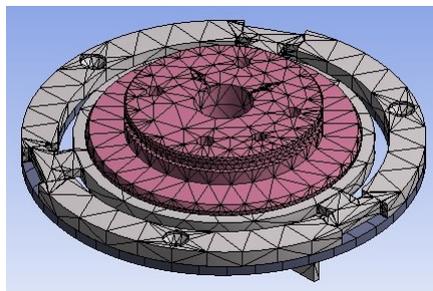
Per prima cosa, la struttura di alcuni componenti del sensore è stata replicata in “SpaceClaim”, un'applicazione di modellazione 3D integrata in ANSYS Workbench, tralasciando solo piccoli particolari non significanti ai fini dell'ottimizzazione. La versione accademica del software, infatti, non consente l'importazione di file SOLIDWORKS. In figura 3.14 sono rappresentati i componenti replicati attraverso la scrittura e l'esecuzione di uno script in “IronPython”, un linguaggio open source basato su “Python”. Questa operazione, facilitata da una funzione di SpaceClaim che registra le azioni eseguite nella schermata riportando nello script il codice corrispondente, ha consentito, durante l'esecuzione dell'ottimizzazione, di ottenere strutture differenti facendo variare il valore di alcuni parametri (fig. 3.14a).



**Figura 3.14:** Rappresentazione in SpaceClaim delle componenti del sensore utilizzate per eseguire l'ottimizzazione dell'elemento sensibile e parametri geometrici di quest'ultimo (fig. a).

Nelle immagini riportate si possono notare l'interfaccia meccanica del sensore, necessaria per simulare una corretta applicazione di forze e momenti durante le simulazioni, l'elemento sensibile all'applicazione dei carichi e una parte della base, utilizzata per vincolare correttamente la struttura, la quale non è riportata per intero. Quest'ultima e il supporto sottostante, infatti, sono stati considerati indeformabili, in virtù dei materiali più rigidi e delle maggiori sezioni resistenti rispetto a quelli caratterizzanti i bracci e le travi sottili dell'elemento elastico. Non dovendone simulare le deformazioni, pertanto, questa approssimazione ha consentito di contenere le dimensioni del problema, eliminando l'ingombro della base e del supporto ma rendendo comunque indeformabile la struttura alla quale l'elemento sensibile è vincolato attraverso l'associazione di un materiale a elevata rigidità, come l'acciaio strutturale. Questa misura si è resa necessaria per attenersi ai limiti imposti, ancora una volta, dall'utilizzo della versione accademica di ANSYS. La mesh, una griglia creata per discretizzare la struttura sog-

getta all'applicazione dei carichi e consentire quindi il calcolo delle deformazioni attraverso il metodo degli elementi finiti, doveva essere infatti caratterizzata da un numero limitato di nodi ed elementi. Oltre al contenimento del volume della struttura, per rientrare nei suddetti limiti é stata anche ridotta al minimo la risoluzione della griglia (fig. 3.15).



**Figura 3.15:** *Rappresentazione in Mechanical della mesh generata dal sistema per eseguire l'analisi agli elementi finiti.*

Nella realizzazione della struttura dell'elemento sensibile sono stati inseriti quanti più parametri possibili, in maniera tale da rendere il modello molto versatile. In particolare, sono stati parametrizzati la larghezza, l'altezza e lo spessore sia dei bracci che delle travi sottili, così come l'angolazione dei bracci e il loro numero, pari al numero di travi sottili. La qualità di un'ottimizzazione strutturale risiede, infatti, anche nel numero di combinazioni dei parametri testate per individuare l'optimum. La necessità di contenere i tempi di esecuzione del processo di ottimizzazione ha reso però necessario ridurre il numero di simulazioni. Per questa ragione é stato ridotto il numero di parametri e quelli rimanenti sono stati fatti variare su un numero relativamente limitato di valori, come si può osservare dalla tabella 3.3. Questi sono stati scelti nell'intorno dei valori iniziali, fissati alla luce di alcune simulazioni preliminari. Tra i valori assunti dall'angolo tra i bracci e le perpendicolari alle travi sottili si può notare il valore  $0.001^\circ$ , introdotto in sostituzione dell'angolo nullo per rimediare ad alcuni errori bloccanti verificatisi durante la generazione delle strutture.

**Tabella 3.3:** *Parametri del modello dell'elemento sensibile ai carichi (fig. 3.14a) con i diversi valori assunti durante il processo di ottimizzazione.*

Parametro (Sigla)	Valore\i
Larghezza bracci ( $L_b$ )	9.50mm; 10.0mm; 10.5mm; 11.0mm
Altezza bracci ( $H_b$ )	6.00mm
Angolazione bracci ( $a_b$ )	$0.001^\circ$ ; $10^\circ$ ; $20^\circ$ ; $30^\circ$ ; $40^\circ$
Spessore bracci ( $S_b$ )	2.75mm; 3.25mm
Larghezza travi sottili ( $L_t$ )	18.0mm
Altezza travi sottili ( $H_t$ )	5.50mm; 6.00mm; 6.50mm
Spessore travi sottili ( $S_t$ )	4.00mm
Numero bracci e travi sottili ( $n$ )	3; 4

Per contenere il numero di combinazioni da testare, é stato deciso di mantenere costante sia l'altezza dei bracci che la larghezza delle travi sottili. Si é giunti a questa decisione alla luce delle limitazioni necessarie per far variare contemporaneamente la larghezza e l'altezza degli elementi flessibili nonché l'angolazione dei bracci. Alcune combinazioni di questi parametri, infatti, generavano strutture autointersecanti, che non solo non erano di interesse ma

comportavano anche altri errori bloccanti durante la generazione delle strutture. Vista la necessità di ridurre il numero di parametri e le limitazioni da introdurre per evitare il verificarsi delle suddette situazioni, che sarebbero dovute essere particolarmente elaborate per evitare di tralasciare anche configurazioni valide, la soluzione più accessibile è risultata essere proprio quella di rendere costante l'altezza dei bracci e la larghezza delle travi sottili, contenendo così anche l'ingombro radiale del dispositivo. Questa scelta è stata presa in virtù della presenza, in ogni caso, di altri parametri dimensionali governanti la loro geometria. È stato infine reso costante anche lo spessore delle travi per ridurre ulteriormente i tempi computazionali.

Per i passi successivi è stato adoperato "Mechanical", un software che utilizza l'analisi agli elementi finiti per eseguire analisi strutturali.

Innanzitutto sono stati associati i materiali, con le loro proprietà meccaniche, alle diverse parti: il PLA per il pezzo che simula la flangia del robot, il nylon per l'elemento intermedio e l'acciaio da costruzione per la parte inferiore.

Successivamente è stata definita la natura delle connessioni tra le diverse componenti. La tipologia di contatti è stata impostata su "Rough", garantendo l'incompennabilità dei corpi e consentendo la formazione di spazi tra le superfici a seconda dei carichi. Sfortunatamente questa non consente lo scivolamento tra le superfici, simulando un coefficiente di attrito infinito, ma, non essendo a conoscenza del suo reale valore, dipendente dai materiali e dalla finitura superficiale dei pezzi, è stata preferita questa soluzione piuttosto che l'utilizzo di una tipologia di contatto che simula un coefficiente di attrito nullo. La faccia inferiore dell'elemento in acciaio è stata fissata a terra, simulando così la connessione con il robot, vista l'ipotesi di indeformabilità della base e del supporto. Sono stati inoltre inseriti dei vincoli fissi tra le parti per simulare la presenza delle viti. L'unico grado di libertà concesso da queste prese singolarmente, ovvero la rotazione relativa centrata nella vite con conseguente avvicinamento o allontanamento dei pezzi, è infatti rimosso attraverso l'inserimento di più viti.

A questo punto è stato necessario stabilire con maggiore precisione i carichi massimi misurabili dal sensore, ovvero quelli da applicare alle strutture durante le simulazioni. Pensando alla calibrazione da effettuare al termine dello sviluppo del dispositivo (sez. 4.1), è stato necessario fissare gli intervalli di misura in modo tale da rientrare nei limiti di funzionamento del sensore ATI Nano17 (tab. 2.3), da utilizzare appunto durante il processo per ottenere i valori di riferimento. Per questa ragione, il sensore sviluppato è stato reso in grado di misurare forze risultanti fino a 22N. L'applicazione di forze maggiori durante la calibrazione infatti, a causa del sistema sperimentale, come sarà chiarito meglio nella sezione 4.1, avrebbe comportato la generazione di momenti rischiosi per l'integrità del sensore Nano17. Per sfruttare invece tutto l'intervallo di misura dei momenti del sensore ATI, è stato deciso di rendere quello sviluppato sensibile a momenti risultanti fino a 866Nmm. Questo limite consente infatti la rilevazione simultanea di 500Nmm su ogni asse, limite di misura del sensore ATI. Le simulazioni sono state quindi condotte applicando i suddetti carichi massimi alle superfici dei fori all'interfaccia meccanica con l'esterno, ovvero dove un sensore entra effettivamente in contatto con gli strumenti di lavoro e/o gli oggetti manipolati a esso avvitati. Le forze e i momenti massimi possono essere applicati in diverse direzioni, tuttavia è stato necessario ridurre il numero di combinazioni da simulare dal momento che i tempi di calcolo sarebbero diventati altrimenti insostenibili. Pertanto sono state simulate soltanto due condizioni di carico, una in cui il sistema è sottoposto a una forza di 22N in direzione Z (fig. 3.16a) e una in cui la struttura è soggetta a una forza della stessa intensità ma giacente sul piano XY (fig. 3.16b), in una direzione differente da tutte quelle assunte dai bracci dell'elemento elastico anche al variare del loro numero, uno dei parametri del disegno, per cercare di non privilegiare la scelta di

una struttura a tre bracci piuttosto che a quattro. In entrambi i casi, il sistema di carico prevedeva inoltre l'applicazione di un momento risultante pari a 866Nmm in una direzione tale da assecondare le deformazioni provocate dalle forze. Questi sistemi di carico sono stati scelti infatti, tra le varie combinazioni possibili, poiché casi estremi che teoricamente dovrebbero comportare deformazioni relativamente elevate tra quelle presentabili a seguito dell'applicazione dei carichi massimi nelle diverse direzioni possibili. L'obiettivo dell'ottimizzazione é, infatti, massimizzare la sensibilità del sensore mantenendo però le deformazioni entro dei limiti che verranno spiegati in seguito.

Durante l'ottimizzazione é stata dunque simulata l'applicazione dei sistemi di carico descritti su tutte le strutture, ottenute eseguendo lo script in SpaceClaim su combinazioni differenti dei parametri. Ogni simulazione ha fornito dati sulle deformazioni subite dalle strutture (fig. 3.17) e sui rispettivi margini di sicurezza (fig. 3.18).

Il processo é durato due giorni e delle 240 configurazioni dell'elemento elastico previste 233 sono state testate correttamente. Il margine di sicurezza minimo rilevato era superiore a 3.3, ritenuto sufficientemente affidabile, ma di queste 101 presentavano deformazioni troppo elevate in direzione Z durante l'applicazione del primo sistema di carico (fig. 3.16a). La soglia é stata fissata alla luce delle proprietà dei convertitori digitali utilizzati per misurare i valori di capacità dei trasduttori (sez. 3.3.2). Questi sono in grado di misurare capacità all'interno di un intervallo ampio 30pF e traslabile attraverso la scrittura di appositi registri. Pertanto, nota la distanza iniziale tra le armature e la loro superficie di sovrapposizione, la deformazione massima teoricamente rilevabile dai convertitori é stata ricavata risolvendo l'equazione 3.1, ottenuta dalla 2.5.

$$C_{max} - C_{min} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d_{min}} - \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d_{max}} = 30pF \quad (3.1)$$

dove:

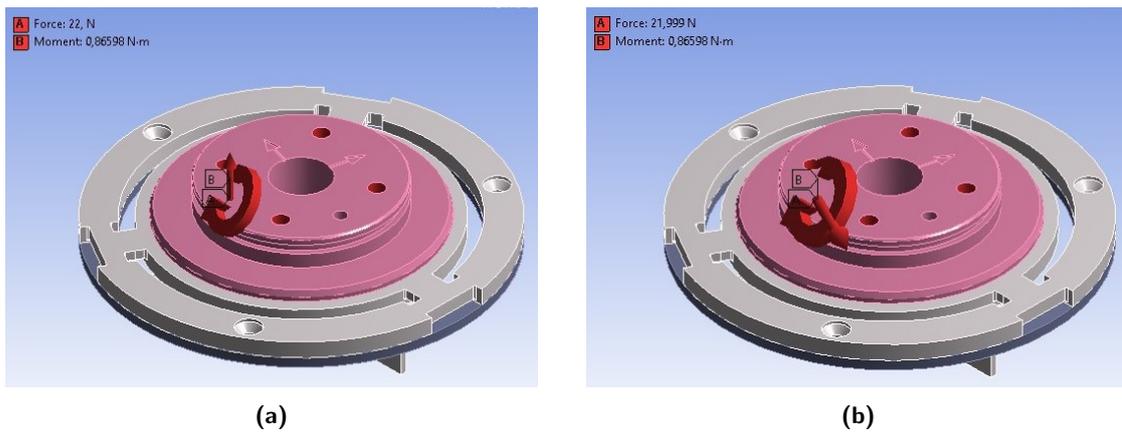
$$d_{min} = d_0 - x;$$

$$d_{max} = d_0 + x;$$

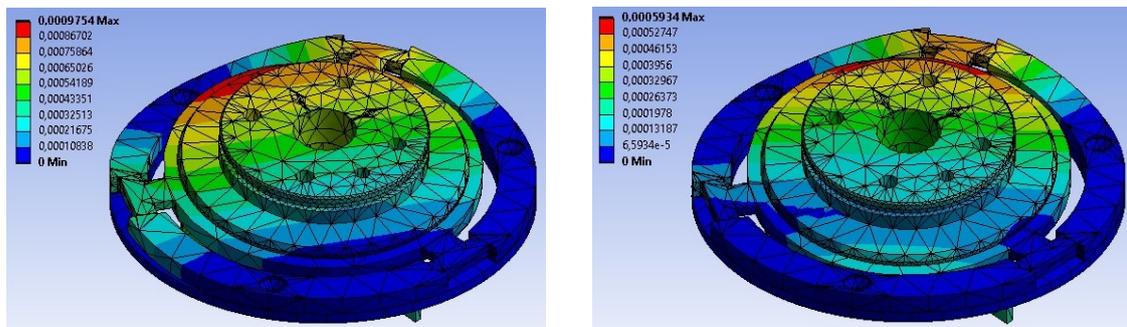
con  $d_0$  pari alla distanza iniziale tra le piastre e  $x$  rappresentante l'incognita.

Essa é risultata circa 0.889mm. Consentire deformazioni superiori a questo valore sarebbe dovuto essere inutile dal momento che il valore di capacità letto sarebbe dovuto saturare, non permettendo la distinzione dei carichi. Tuttavia, come verrà spiegato nella sezione 4.3, i risultati hanno in parte smentito questa considerazione dal punto di vista pratico. Ad ogni modo, sono state scartate quelle combinazioni di parametri associate a strutture che presentavano deformazioni superiori alla soglia così calcolata, anche per ridurre il rischio di cortocircuiti tra le armature dei condensatori, posizionate a una distanza di poco superiore alla deformazione consentita. Un contatto tra le piastre, infatti, causerebbe valori anomali nelle capacità rilevate e quindi misurazioni errate da parte del sensore.

Per scegliere tra le combinazioni di parametri rimanenti, infine, é stato calcolato un coefficiente ottenuto come media aritmetica delle deformazioni subite dalle strutture associate nelle diverse direzioni. Quella corrispondente al valore massimo di questo coefficiente é stata la struttura selezionata, ovvero quella realizzata fisicamente utilizzando la stampante 3D.



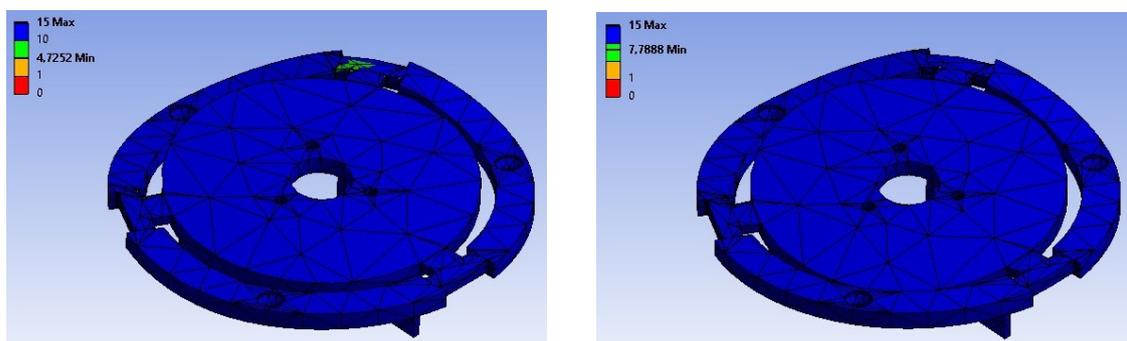
**Figura 3.16:** Rappresentazione in Mechanical dei sistemi di carico simulati durante l'esecuzione dell'ottimizzazione.



**(a)** Deformazioni in [m] dovute all'applicazione del primo sistema di carico (fig. 3.16a).

**(b)** Deformazioni in [m] dovute all'applicazione del secondo sistema di carico (fig. 3.16b).

**Figura 3.17:** Rappresentazione in Mechanical delle deformazioni subite da una delle strutture testate durante l'esecuzione dell'ottimizzazione.



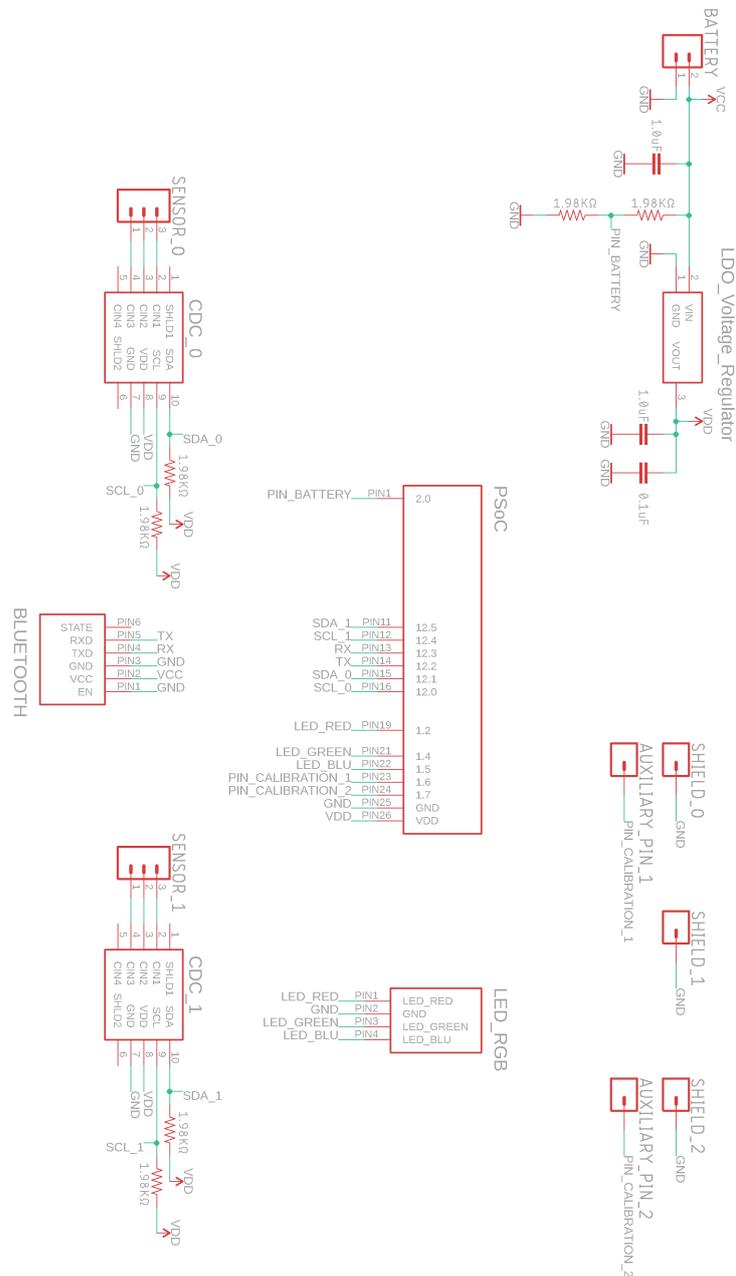
**(a)** Margine di sicurezza durante l'applicazione del primo sistema di carico (fig. 3.16a).

**(b)** Margine di sicurezza durante l'applicazione del secondo sistema di carico (fig. 3.16b).

**Figura 3.18:** Rappresentazione in Mechanical dei valori assunti dal margine di sicurezza su una delle strutture testate durante l'esecuzione dell'ottimizzazione.

### 3.3 Hardware

Nella figura 3.19 é riportato lo schematico dell'hardware del dispositivo.



**Figura 3.19:** Schematico dell'hardware presente nel dispositivo realizzato con EAGLE.

Di seguito vengono descritti i diversi componenti presenti nel circuito con le rispettive connessioni.

### 3.3.1 PSoC

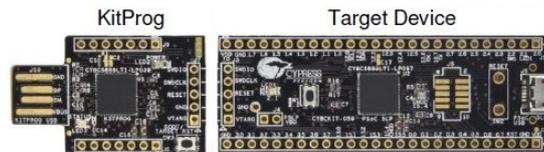


Figura 3.20: PSoC 5LP della Cypress Semiconductor.

Il PSoC (“Programmable System on Chip”) 5LP é un sistema programmabile prodotto dalla “Cypress Semiconductor” che integra periferiche analogiche e digitali configurabili, memoria e un microcontrollore su un singolo chip [25]. Essa é una delle piattaforme di prototipazione piú recenti prodotte dall’azienda e fa parte della famiglia CY8C58LP, un insieme di dispositivi a bassa potenza. La combinazione di una CPU con un sottosistema analogico, uno digitale, circuiti di connessione e I/O flessibili consente un elevato livello di integrazione in un’ampia varietà di applicazioni [25]. Il PSoC é composto da due parti frazionabili (fig. 3.20), permettendo così all’utente, ove necessario, di separare il programmatore e debugger, ovvero il “KitProg”, dal resto della board, detto “Target”, in modo tale da ridurre l’ingombro. Il Target può comunque essere riprogrammato attraverso il KitProg, utilizzando dei cavi di collegamento tra dei pin saldati in corrispondenza di quelle connessioni interrotte separando le due parti.

L’elevata flessibilità della piattaforma PSoC é completata dalla dotazione software che consente di velocizzare notevolmente le fasi di sviluppo. L’IDE (“Integrated Development Environment”) “PSoC Creator” accompagna infatti lo sviluppatore in tutte le fasi di progettazione, unendo al classico ambiente di programmazione un’interfaccia grafica che permette di configurare il design delle periferiche interne al PSoC.

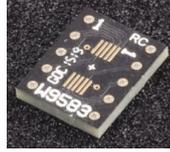
Il PSoC é il cuore del circuito. Esso deve essere alimentato da una tensione nell’intervallo [1.71;5.5]V e necessita di una corrente di circa 8.9mA alla frequenza di funzionamento di 24MHz [25]. Questo componente si interfaccia in particolare con i convertitori digitali, utilizzati per misurare la capacità dei trasduttori, e col modulo Bluetooth, per la comunicazione con l’interfaccia grafica. Il PSoC é inoltre connesso a un LED RGB, che segnala il livello di carica della batteria. Non sono state inserite resistenze per aumentarne la luminosità, direttamente proporzionale alla corrente che lo attraversa, limitata comunque dalla resistenza intrinseca dei pin del PSoC di circa 320 $\Omega$  [25]. Esso mette infine a disposizione due pin ausiliari per la sincronizzazione dei dati salvati dal dispositivo sviluppato e dal sensore di riferimento durante la calibrazione (sez. 4.1) e utilizzabili anche per eventuali future modifiche al circuito.

### 3.3.2 Convertitori digitali di capacità



Figura 3.21: Convertitore digitale di capacità FDC1004Q della Texas Instruments.

I convertitori digitali a quattro canali FDC1004Q della “Texas Instruments” misurano la capacità di condensatori collegati a massa. Questi sono convertitori a bassa potenza, basso costo ma alta risoluzione, disponibili in contenitori a 10 pin VSSOP (fig. 3.21), con spaziatura 0.5mm. Per comodità, essi sono stati saldati su adattatori DIP con spaziatura dei pin pari a 2.54mm (fig. 3.22).



**Figura 3.22:** Adattatore generico da SOP a DIP W9583RC della Winslow Adaptics.

La tensione di alimentazione consigliata é 3.3V, da stabilizzare inserendo due condensatori ceramici da  $0.1\mu F$  e  $1.0\mu F$  collegati a massa, e la corrente richiesta varia tra  $750\mu A$  e  $29\mu A$  circa a seconda che i dispositivi siano operativi o in pausa. I convertitori possono essere impostati per eseguire un'unica misura o per eseguire misure ripetute su un numero di canali variabile fino a 4. Ogni canale ha un intervallo di funzionamento di  $\pm 15pF$ , traslabile fino a ottenere un intorno centrato sui  $100pF$ . La frequenza di conversione, selezionabile tra tre valori preimpostati (tab. 3.4), influenza la risoluzione fino a un massimo di  $0.5fF$ .

**Tabella 3.4:** Alcune specifiche dei convertitori digitali di capacità FDC1004Q della Texas Instruments [26].

Numero di canali	4
Intervallo di misura	$\pm 15pF$
Offset massimo	100pF
Frequenze di campionamento programmabili	100/200/400 S/s
Risoluzione massima (a 100S/s)	0.5fF
Tensione di alimentazione consigliata	3.3V
Corrente di alimentazione durante la conversione	$750\mu A$
Corrente di alimentazione in standby	$29\mu A$
Protocollo di comunicazione	I <sup>2</sup> C

Essi presentano inoltre due pin SHLDx che possono essere usati per schermare le connessioni con i trasduttori.

La comunicazione col PSoC avviene attraverso il protocollo I<sup>2</sup>C, un protocollo di comunicazione seriale bifilare. La trasmissione seriale é una modalit  di comunicazione tra dispositivi digitali con la quale i bit vengono trasferiti lungo un unico canale in maniera sequenziale. Esistono due tipi di trasmissione seriale, quella asincrona e quella sincrona. Nella prima tipologia il trasmettitore e il ricevitore si sincronizzano usando i dati stessi mentre nella seconda viene utilizzata una linea apposita il cui valore logico viene commutato a frequenza costante. Il protocollo I<sup>2</sup>C, in quanto protocollo seriale sincrono, prevede l'utilizzo di due linee, SDA (Serial DAta) per la trasmissione dei dati e SCL (Serial CLock) per la sincronizzazione. Su queste sono state applicate delle resistenze di pull-up (fig. 3.23) come suggerito dal protocollo. Il loro valore é stato stabilito in accordo con le indicazioni contenute in [27]. In questo documento, che contiene le specifiche per i canali di comunicazione I<sup>2</sup>C, sono infatti riportati i valori massimi e minimi per le suddette resistenze.

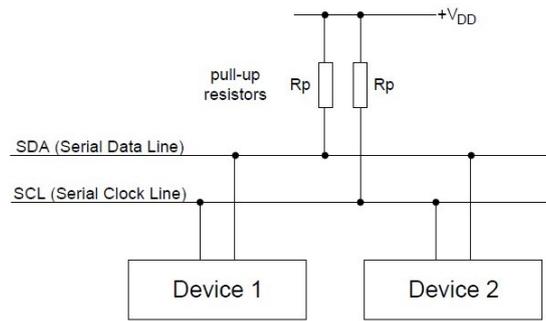


Figura 3.23: Esempio di bus I<sup>2</sup>C [28].

In particolare:

$$R_{p(max)} = \frac{t_r}{0.8473 \times C_b} \quad (3.2)$$

e

$$R_{p(min)} = \frac{V_{DD} - V_{OL(max)}}{I_{OL}} \quad (3.3)$$

dove:

$R_p$  é il valore della resistenza di pull-up;

$t_r$  é il massimo tempo di salita delle linee del canale di comunicazione, detto anche “bus”, espresso nelle specifiche dell’I<sup>2</sup>C;

$C_b$  é la stima della capacità delle linee del bus;

$V_{DD}$  é la tensione di alimentazione delle linee;

$V_{OL(max)}$  é la massima tensione applicabile su una linea per comunicare un valore basso;

$I_{OL}$  é la corrente che scorre nella linea quando viene comunicato un valore basso, espressa nelle specifiche dell’I<sup>2</sup>C.

Il PSoC svolge il ruolo di “master” in una rete che comprende anche due “slave”, ovvero i due convertitori digitali. Il master é il dispositivo che emette il segnale di clock e gestisce la comunicazione mentre gli slave sono quelli che rispondono ai comandi del master, sincronizzandosi sul segnale di clock senza poterlo controllare. Il master, tipicamente, seleziona lo slave con cui comunicare all’interno di una rete utilizzando degli indirizzi, vale a dire delle sequenze di bit inviati sul bus prima dell’inizio dell’interazione. I convertitori impiegati sono però dotati di indirizzi identici, forniti dal costruttore e non modificabili, il che li rende di fatto indistinguibili all’interno di una rete. Questo problema é stato affrontato con l’adozione di alcune misure risolutive dal punto di vista firmware, come verrà spiegato nella sezione 3.4.1.1.

La comunicazione attraverso il bus I<sup>2</sup>C é utilizzata in primo luogo per configurare i dispositivi secondo quanto descritto in precedenza. Ogni dispositivo é connesso a tre dei sei trasduttori inseriti nel sensore dei quali misurano le variazioni di capacità, che, lette dal PSoC attraverso lo stesso bus, consentono di monitorare i carichi applicati.

### 3.3.3 Modulo Bluetooth

Il modulo Bluetooth HC-05 (fig. 3.24), grazie all’antenna integrata, permette di convertire una porta seriale asincrona UART (“Universal Asynchronous Receiver-Transmitter”) in una



Figura 3.24: Modulo Bluetooth HC-05.

porta Bluetooth, consentendo la comunicazione via etere con distanza di trasmissione effettiva fino a 10m; questo dispositivo permette quindi la comunicazione wireless tra il PSoC e il PC, dotato anch'esso di modulo Bluetooth. Rispetto al Wi-Fi, un altro protocollo per la comunicazione senza fili, il Bluetooth risulta essere meno sicuro e consente il collegamento con un numero più limitato di dispositivi a distanze relativamente ridotte. L'applicazione per la quale il sensore è stato progettato, tuttavia, richiede la connessione tra un numero ristretto di dispositivi, il sensore stesso e un PC, la cui distanza può facilmente essere contenuta. In questa fase prototipale, inoltre, la sicurezza della comunicazione è passata in secondo piano rispetto ai vantaggi presentati dall'utilizzo della tecnologia Bluetooth. Questa, infatti, risulta molto più semplice da utilizzare e richiede consumi energetici minori.

Il modulo HC-05 deve essere alimentato da una tensione compresa nell'intervallo  $[3.6;6.0]$ V e presenta un regolatore integrato con tensione in uscita pari a 3.3V, utilizzata come valore alto sulle linee dati. La corrente richiesta in fase di accoppiamento è circa 30mA mentre in fase di comunicazione è circa 10mA. I pin TXD e RXD del componente, adibiti rispettivamente alla trasmissione e alla ricezione dei dati, sono collegati in maniera incrociata ai pin RX e TX del PSoC. I dati inviati dall'uno devono essere infatti letti dall'altro. Infine, la frequenza di comunicazione predefinita è 9600bps.

Tabella 3.5: Specifiche del modulo Bluetooth HC-05.

Distanza di trasmissione massima	10m
Tensione di alimentazione	$[3.6;6.0]$ V
Corrente di alimentazione in fase di accoppiamento	30mA
Corrente di alimentazione in fase di comunicazione	10mA
Tensione massima sulle linee dati	3.3V
Frequenza di comunicazione predefinita	9600bps

### 3.3.4 Batteria ricaricabile

Per alimentare il dispositivo è stata usata una batteria ricaricabile ai polimeri di litio FT103450P di "RS Pro" (fig. 3.25). Questa tipologia di batterie è stata ottenuta come sviluppo tecnologico dell'accumulatore litio-ione col vantaggio di non essere infiammabile. Esse hanno un'alta densità di energia e sono termicamente stabili. La tensione nominale fornita dalla batteria è di 3.7V con capacità nominale di 1.8Ah. Visto il numero ridotto di componenti nel circuito e il basso consumo energetico di questi, la batteria garantisce quindi l'alimentazione per un tempo relativamente lungo (sez. 3.3.8).



**Figura 3.25:** Batteria ricaricabile ai polimeri di litio FT103450P di RS Pro.

### 3.3.5 Regolatore

É stato deciso di utilizzare un regolatore vista la necessità di alimentare con una tensione stabile a 3.3V in particolare i convertitori digitali di capacità.



**Figura 3.26:** Regolatore di tensione LDO MCP1700 della Microchip Technology.

Il regolatore MCP1700 della “Microchip Technology” (fig. 3.26), alimentato dalla batteria a 3.7V, fornisce la tensione richiesta con una corrente in uscita massima garantita di 250mA, più che sufficiente per il sistema (sez. 3.3.8), e consumandone solo 1.6 $\mu$ A. Il regolatore scelto é un LDO (Low DropOut), ovvero un regolatore che richiede una bassa caduta di tensione tra ingresso e uscita per funzione, pari nel suo caso a 178mV [29]. Al fine di stabilizzare la tensione, sono stati inseriti due condensatori da 1.0 $\mu$ F, uno sulla linea a 3.7V e uno sulla linea di uscita, come indicato in [29]. Sulla linea a 3.3V é stato inserito un ulteriore condensatore da 0.1 $\mu$ F come richiesto dalla scheda tecnica dei convertitori.

Oltre ai convertitori di capacità, anche il PSoC é stato alimentato a 3.3V, così da non dover inserire dei traslatori di livelli logici per garantire una corretta comunicazione con gli stessi convertitori capacitivi e il modulo Bluetooth.

**Tabella 3.6:** Alcune specifiche del regolatore MCP1700 della Microchip Technology [29].

Tensione in uscita	3.3V
Caduta di tensione provocata	178mV
Corrente massima garantita	250mA
Consumo di corrente	1.6 $\mu$ A

### 3.3.6 Altri componenti

Per ricaricare la batteria é stato inserito nel dispositivo un caricabatterie LiPo MCP73831/2 della “Microchip Technology” (fig. 3.27). La scheda incorpora un circuito di ricarica di base, un LED di stato, un ingresso USB, un connettore alternativo barrel jack e due connettori JST preinstallati ai quali collegare la batteria e il sistema da alimentare; non é quindi necessario scollegare il caricabatterie ogni volta che si desidera utilizzare il dispositivo. Esso richiede

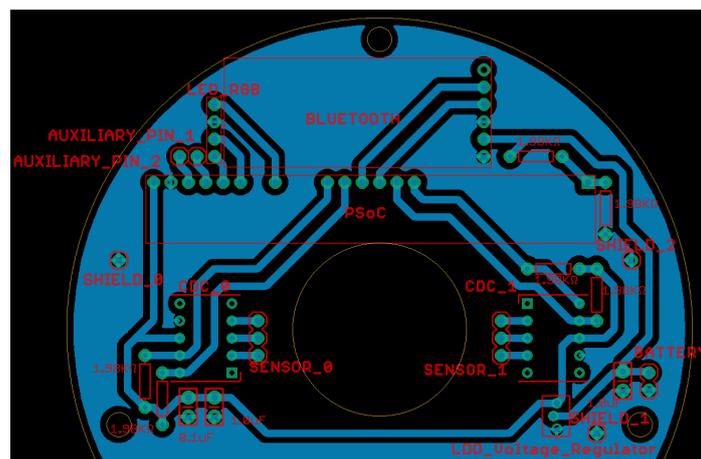
una corrente di circa  $510\mu A$  in fase di ricarica e di  $53\mu A$  durante gli altri istanti [30]. Tra il caricabatterie e il sistema é presente anche un interruttore per l'accensione e lo spegnimento di quest'ultimo.



**Figura 3.27:** Caricatore LiPo MCP73831/2 della Microchip Technology.

Nel circuito é stato inserito inoltre un partitore che consente al PSoC, alimentato da una tensione piú bassa rispetto a quella fornita dalla batteria, di monitorarne il livello di carica. Questo é fondamentale per garantire una tensione stabile per i convertitori, garanzia di una corrispondenza pressoché biunivoca tra i valori di capacità misurati e i carichi applicati, ma ancor prima per assicurare la corretta alimentazione del modulo Bluetooth, il primo componente a smettere di funzionare quando la batteria si scarica. Senza il partitore, infatti, il PSoC non sarebbe in grado di discriminare valori di tensione superiori alla sua tensione di alimentazione, inferiore a quella richiesta dal modulo per la comunicazione senza fili. Sono presenti infine diversi pin connessi a massa, utilizzati per schermare il sensore. Uno di questi, in virtù della continuità tra la schermatura e le armature posizionate sull'elemento sensibile del dispositivo, é utilizzato anche per collegare a massa i trasduttori capacitivi, come richiesto dai convertitori impiegati.

### 3.3.7 PCB



**Figura 3.28:** Rappresentazione della PCB in EAGLE.

In un primo momento il circuito é stato realizzato su una breadboard, per testarne il corretto funzionamento, dopodiché si é passati a una realizzazione piú robusta e compatta progettando una PCB con "EAGLE", un software di automazione del design elettronico

sviluppato da “Autodesk”. É stato dunque necessario disegnare i simboli e le impronte di quei componenti che ne erano sprovvisti e, una volta posizionati tutti sulla PCB, effettuare lo sbroglio delle connessioni.

In figura 3.28 si può osservare la forma circolare del circuito, conferitagli affinché si adattasse allo spazio ricavato all’interno del supporto del sensore. Si possono notare anche i fori esterni utilizzati per ancorarlo alla struttura e il foro centrale per il passaggio dei cavi dal robot.

Sulla PCB é stato realizzato un piano di massa, sul quale sono stati saldati in particolare i pin ridondanti connessi alla schermatura del sensore, oltre che tutti i componenti elettronici. Il Target del PSoC, a causa del suo ingombro troppo elevato per lo spazio a disposizione, é stato separato dal KitProg e posizionato in verticale. Come si può notare dalla figura, infatti, tutte le connessioni necessarie sono state realizzate con pin posizionati su un singolo lato del componente. Esso può comunque essere riprogrammato connettendolo al KitProg attraverso una delle fessure realizzate sul supporto.

Una volta completato il design, la PCB é stata realizzata artigianalmente. Essa, stampata su una speciale pellicola, é stata trasferita su una basetta ramata monostrato attraverso un processo termico. La procedura é stata completata rimuovendo il rame in eccesso attraverso un attacco chimico con acido muriatico e perossido di idrogeno.

### 3.3.8 Consumi di corrente e durata della batteria

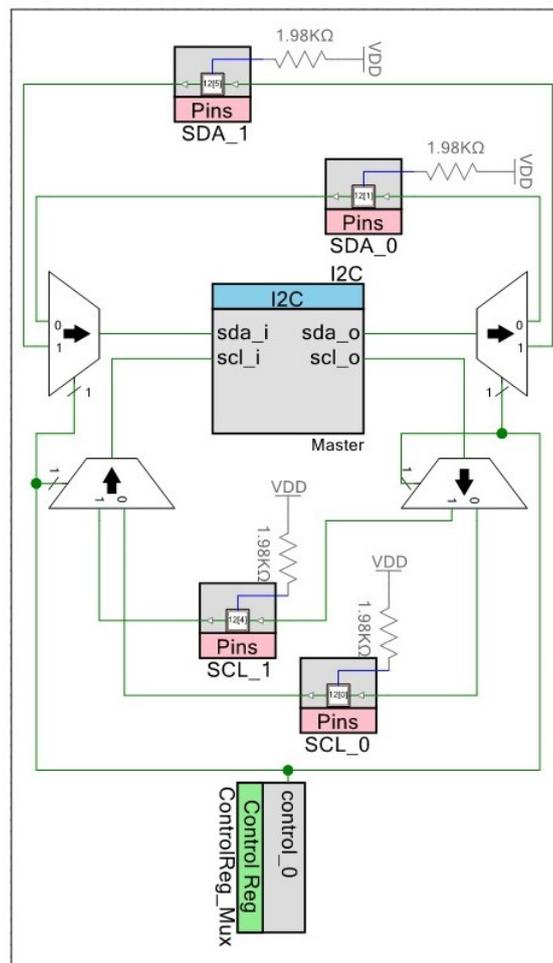
Nelle sezioni precedenti sono stati analizzati i consumi di corrente associati all’utilizzo dei diversi componenti presenti nel circuito. Alla corrente richiesta dal PSoC, però, vanno aggiunti i consumi legati al funzionamento delle diverse periferiche abilitate al suo interno, di cui si parlerà nella sezione 3.4.1. Sommando i diversi contributi, il circuito necessita quindi di circa 24mA durante il normale funzionamento del dispositivo. Quando questo é operativo, infatti, i convertitori continuano a misurare la capacità dei trasduttori, il modulo Bluetooth é accoppiato e in comunicazione con l’interfaccia grafica e il LED é acceso con colorazione verde o rossa. Pertanto, data la capacità nominale della batteria, pari a 1.8Ah, essa é in grado di garantire la corretta alimentazione del circuito per circa  $\frac{1.8Ah}{0.024A} = 75h$ .

### 3.4 Firmware

Il firmware del microcontrollore é stato progettato con “PSoC Creator”, una IDE dalla “Cypress Semiconductor” che coniuga al classico ambiente di programmazione un’interfaccia grafica che permette di configurare il design delle periferiche interne al PSoC attraverso l’inserimento di semplici blocchi nel “Top Design”; fatto questo, l’IDE genera in autonomia le funzioni, dette API (“Application Programming Interface”), necessarie per applicare le configurazioni scelte alle periferiche e utilizzarle. Oltre a queste, possono essere anche replicati alcuni componenti esterni al PSoC, come resistori e condensatori, in modo tale da chiarire meglio il funzionamento del circuito. Di seguito vengono quindi descritte le diverse periferiche interne al PSoC che sono state utilizzate.

#### 3.4.1 Top Design

##### 3.4.1.1 Rete I<sup>2</sup>C



**Figura 3.29:** Periferiche per la comunicazione con i convertitori basata sul protocollo I<sup>2</sup>C.

Nel Top Design é stato inserito innanzitutto un blocco I2C per la gestione dell’interazione con i convertitori. Il PSoC é stato configurato come master e la frequenza del clock é stata

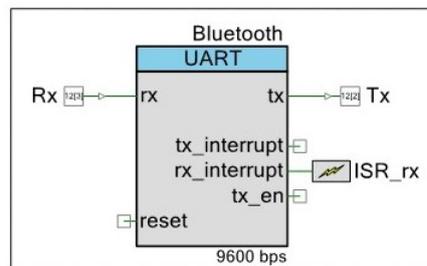
impostata sul valore massimo ottenibile, pari a 375Kbps, per ridurre i tempi di comunicazione. A questa frequenza, il consumo di corrente massimo associato al blocco I2C, da sommarsi al consumo di base del PSoC, é di circa  $260\mu A$  [28].

Come é stato spiegato in precedenza (sez. 3.3.2), i convertitori sono dotati di indirizzi uguali e non modificabili, il che li rende di fatto indistinguibili all'interno di una rete. Per aggirare il problema é stato pensato in un primo momento di realizzare due reti separate con due soli nodi, vale a dire un blocco I2C e un convertitore a testa. All'interno di reti cosí fatte, l'indirizzo dei convertitori sarebbe infatti risultato univoco. Tale soluzione, tuttavia, si é rivelata non praticabile dal momento che il PSoC 5LP é in grado di gestire un unico blocco I2C. Il problema é stato dunque risolto posizionando i convertitori su due bus I<sup>2</sup>C distinti con un unico master, costituito appunto dal PSoC. Questo é stato reso possibile abilitando l'opzione per l'esposizione dei terminali di ingresso e dei terminali di uscita sul blocco I2C (tab. 3.7), al posto di quelli di I/O, e utilizzando multiplexer e demultiplexer digitali posti sulle linee SDA e SCL in ingresso e in uscita dallo stesso (fig. 3.29). Grazie a questi, infatti, controllati simultaneamente utilizzando un apposito registro, é stato possibile mettere il PSoC in comunicazione alternativamente con i due convertitori, connessi a pin digitali di I/O, escludendo temporaneamente dalla rete l'altro componente.

**Tabella 3.7:** Alcune impostazioni del blocco I2C.

Mode	Master
Data rate (kbps)	375
Implementation	Fixed function
External OE buffer	True

### 3.4.1.2 Porta UART



**Figura 3.30:** Porta UART per la comunicazione col modulo Bluetooth.

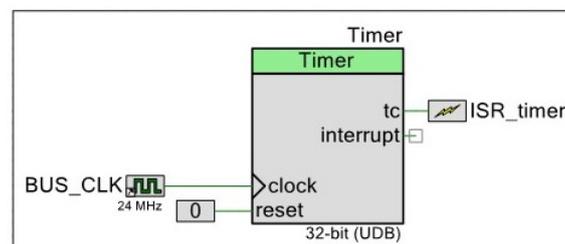
Per la comunicazione col modulo Bluetooth é stato inserito nel PSoC un blocco UART (fig. 3.30). Esso é stato configurato in modo tale da consentire sia la trasmissione dei dati sui carichi che la ricezione dei comandi dall'interfaccia grafica (tab. 3.8). La frequenza di comunicazione é stata impostata su 9600bps, in accordo con le caratteristiche predefinite del modulo Bluetooth (sez. 3.3.3). Per garantire l'affidabilità della comunicazione, ovvero prevenire la perdita di dati, il blocco é dotato di buffer circolari sia in ingresso che in uscita. É stata aggiunta inoltre una ISR ("Interrupt Service Routine"), innescata dalla ricezione di un byte, in modo tale da processare le informazioni in tempo reale. Per compensare eventuali errori nella ricezione dei bit, infine, é stata abilitata la funzionalità che permette di sovra-campionare gli stessi, assegnando loro il valore piú ricorrente (tab. 3.8).

Quando abilitato, il blocco consuma circa  $850 \frac{\mu A}{Mbps}$  durante la comunicazione e  $520 \frac{\mu A}{Mbps}$  negli altri istanti; pertanto, alla frequenza di comunicazione di 9600bps, il blocco richiede rispettivamente  $8.16 \mu A$  e  $4.99 \mu A$  [31].

**Tabella 3.8:** Alcune impostazioni del blocco UART.

Mode	Full UART (TX + RX)
Bits per second	9600
Data bits	8
Interrupt sources	RX - On Byte Received
Enable 2 out of 3 voting per bit	True
RX buffer size (bytes)	4
TX buffer size (bytes)	4

### 3.4.1.3 Timer



**Figura 3.31:** Timer per la temporizzazione dell'invio dei dati sui carichi all'interfaccia grafica.

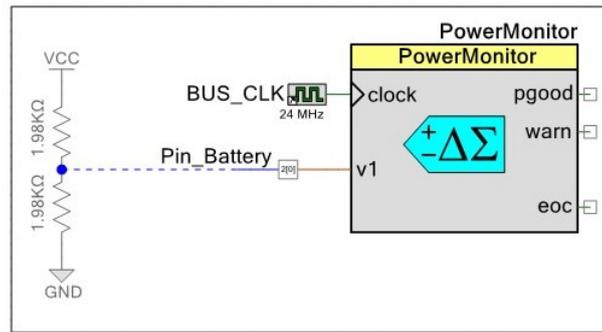
In figura 3.31 è riportato il timer utilizzato per gestire la temporizzazione dell'invio dei dati sui carichi all'interfaccia grafica. Esso innesca infatti una ISR ogni 100ms, consentendo l'invio dei dati alla frequenza costante di 10Hz (tab. 3.9). Questa è stata fissata alla luce dei limiti dell'interfaccia grafica sviluppata (sez. 3.5). Il timer, dotato di una risoluzione a 32 bit per ottenere la suddetta frequenza a partire dai 24MHz del segnale in ingresso, consuma circa  $312 \mu A$  [32].

**Tabella 3.9:** Alcune impostazioni del timer.

Source frequency	24MHz
Resolution	32-Bit
Implementation	UDB
Period	2400000 (Period = 100ms)
Enable Mode	Software Only
Run Mode	Continuous
Interrupts	On TC

### 3.4.1.4 Altre periferiche

Per monitorare il livello di carica della batteria è stato incluso un "Power Monitor" (fig. 3.32). Esso è stato configurato in maniera tale da segnalare il calo della tensione fornita dalla batteria sotto una soglia di poco superiore alla tensione di alimentazione minima richiesta dal modulo Bluetooth (tab. 3.10), il primo componente a smettere di funzionare quando la batteria si scarica.

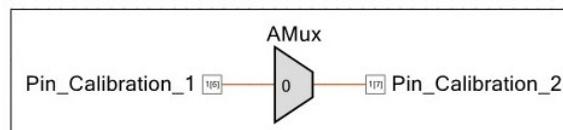


**Figura 3.32:** Periferica deputata al controllo del livello di carica della batteria.

**Tabella 3.10:** Alcune impostazioni del Power Monitor.

Number of converters	1
Warning sources	Under Voltage (UV)
UV warning threshold (V)	1.85

È stato utilizzato inoltre un mux analogico con funzionalità di interruttore per consentire o interrompere la connessione tra i due pin ausiliari (fig. 3.33), utile per la sincronizzazione dei dati salvati dal dispositivo sviluppato e dal sensore di riferimento durante la calibrazione (sez. 4.1).



**Figura 3.33:** Multiplexer analogico utilizzato come interruttore tra i pin ausiliari per la sincronizzazione dei dati salvati dal dispositivo sviluppato e dal sensore di riferimento durante la calibrazione.

Per controllare il LED RGB sono stati inseriti infine tre pin digitali, i quali forniscono fino a 4mA di corrente in uscita.

### 3.4.2 Algoritmo di funzionamento

In figura 3.34 è riportato l'algoritmo di funzionamento del dispositivo. Esso, scritto in C e trasferito nella memoria del microcontrollore, viene eseguito ripetutamente dal dispositivo dalla sua accensione. Per rendere il programma più flessibile, in vista di eventuali future modifiche, sono stati inseriti nel codice diversi parametri, il cui utilizzo è mostrato nella figura. Il programma, per esempio, può essere facilmente adattato a un sistema con un numero diverso di convertitori, qualora si volesse utilizzare magari un numero maggiore di trasduttori, semplicemente modificando i parametri relativi. Per rendere in codice più leggibile e per facilitare, anche in questo caso, eventuali futuri sviluppi del progetto, sono state scritte diverse funzioni basate sulle API fornite dall'IDE PSoC Creator. In particolare, sono state create delle funzioni che agevolano la scrittura e la lettura di registri secondo quanto previsto dal protocollo I<sup>2</sup>C [27]. Queste funzioni necessitano in ingresso semplicemente l'indirizzo dello slave, il puntatore al registro desiderato ed eventualmente i dati da scrivere, nel caso di

operazioni di scrittura per l'appunto. Come è stato spiegato nella sezione 3.4.1.1, il problema sorto a causa degli indirizzi uguali e non modificabili dei convertitori è stato risolto utilizzando multiplexer e demultiplexer digitali posti sulle linee SDA e SCL in ingresso e in uscita dal blocco I2C interno al PSoC, per connettere alternativamente quest'ultimo ai due convertitori. Per questa ragione, è stata utilizzata una funzione, presa da [28], per commutare il bus attivo. Essa, richiamata all'interno delle funzioni create, ha richiesto quindi un ulteriore parametro in ingresso, vale a dire proprio il numero identificativo del bus sul quale si trova il convertitore col quale interagire. Oltre a queste, sono state create delle funzioni per assemblare i pacchetti da scrivere nei diversi registri dei convertitori, in accordo con quanto descritto in [26]. Esse rendono di fatto superflua la lettura della scheda tecnica dei dispositivi per quanto riguarda il significato associato ai diversi bit dei loro registri. Seguendo le indicazioni inserite a corredo delle suddette funzioni, infatti, è possibile ottenere un corretto impacchettamento degli input intuitivi richiesti dalle stesse per configurare e inizializzare i convertitori. Anche l'impiego delle funzioni descritte è mostrato nella figura 3.34.

All'accensione del dispositivo, vengono per prima cosa inizializzate le periferiche interne al PSoC, dopodiché si passa alla configurazione e inizializzazione dei convertitori utilizzando le funzioni di cui sopra. Viene quindi impostata la frequenza di conversione, vengono attivati i diversi canali dei convertitori, nel numero desiderato, e per ognuno di essi viene comunicato l'offset per la misura, necessariamente un multiplo di 3.125pF [26]. In particolare, la frequenza di conversione viene impostata al valore massimo consentito, ovvero 400 S/s, da ripartire sui diversi canali attivati. Anche se questo non consente di sfruttare al massimo la risoluzione dei convertitori, la scelta è stata fatta per ottenere il numero di campioni maggiore possibile, consentendo dunque di migliorare la qualità del segnale, come verrà spiegato in seguito. Vengono attivati inoltre sei canali in totale, tre per convertitore, e l'offset viene impostato a 15.625pF per ognuno di essi. Visto il valore iniziale delle capacità infatti, tutte intorno ai 10pF, questo, insieme all'ottimizzazione effettuata (sez. 3.2.3), avrebbe dovuto permettere di sfruttare l'intero intervallo di misura dei convertitori, pari a  $\pm 15\text{pF}$  (tab. 3.4), massimizzando così la sensibilità del dispositivo. Come verrà discusso nella sezione 4.3, tuttavia, i risultati hanno in parte smentito questa considerazione dal punto di vista pratico.

Una volta inizializzate tutte le periferiche, interne ed esterne al PSoC, il dispositivo inizia finalmente a monitorare i valori di capacità dei trasduttori. Ad ogni ciclo viene letto il risultato delle conversioni completate attraverso l'apposita funzione e questo viene convertito a sua volta da binario a decimale. Quando il dispositivo risulta accoppiato all'interfaccia grafica, le misure vengono inviate a quest'ultima ma non prima di essere opportunamente filtrate. Come è stato ripetuto più volte, il principale svantaggio associato all'utilizzo di trasduttori capacitivi è infatti la loro sensibilità al rumore elettromagnetico. Nonostante la schermatura applicata, che ha comunque sicuramente contribuito alla riduzione di questo problema, come è stato notato da alcune prove preliminari, il rapporto segnale/rumore (SNR, "Signal-to-Noise Ratio"), ovvero il rapporto tra l'ampiezza del segnale desiderato e quella delle variazioni dovute al rumore, è apparso comunque significativamente influenzato dalla suddetta predisposizione dei trasduttori capacitivi. Per questa ragione si è provato a intervenire attraverso una soluzione software. Il segnale digitale proveniente dai convertitori viene dunque filtrato attraverso un filtro passa-basso di Butterworth i cui coefficienti sono stati ottenuti attraverso l'apposito comando di "MATLAB", un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C e creato da "MathWorks". Non essendo interessati alla forma d'onda del segnale bensì semplicemente ai valori campionati, non è stato necessario rispettare i requisiti del teorema del campionamento di Nyquist-Shannon. Pertanto, la frequenza di taglio è stata impostata a 10Hz, ovvero la frequenza alla quale i dati vengono inviati all'interfaccia grafica. Questa è stata scelta proprio in modo tale da visualizzare sui

grafici un segnale con contenuto in frequenza effettivo fino alla frequenza massima consentita dall'interfaccia sviluppata (sez. 3.5). In questo modo, inoltre, è stata ridotta l'influenza di tutte le frequenze non incluse nell'intervallo di interesse, ivi comprese quelle rumorose. È stato aggiunto poi un filtro a media mobile, per aumentare ulteriormente il SNR del segnale. Proprio per questa ragione la frequenza di conversione è stata impostata al valore massimo, così da avere a disposizione un numero relativamente elevato di campioni da mediare senza limitare il contenuto in frequenza del segnale. Sebbene la risoluzione delle misure così ottenute non sia quella massima raggiungibile con i convertitori adoperati, bisogna considerare tuttavia che questa è sostanzialmente inutile se coperta dalla presenza del rumore. Il SNR incrementa infatti in maniera proporzionale alla radice quadrata del numero di campioni utilizzati nel filtro a media mobile. Questo è stato stabilito eguagliando di nuovo a 10Hz la frequenza di taglio del filtro, ovvero la frequenza alla quale il rapporto fra la potenza del segnale di uscita e quello di ingresso vale  $\frac{1}{2}$ . Il numero di campioni da mediare, pari a sei, è stato dunque ottenuto risolvendo l'equazione 3.4:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{N^2} \frac{\sin^2(\frac{\omega N}{2})}{\sin^2(\frac{\omega}{2})} = \frac{1}{2} \quad (3.4)$$

dove:

$|H(\omega)|^2$  è l'attenuazione in potenza del segnale;

$N$  è il numero di campioni da mediare;

$\omega$  è la pulsazione data dall'espressione  $2\pi \frac{f}{f_s}$ , in cui 'f' rappresenta proprio la frequenza di taglio e 'fs' la frequenza di campionamento del segnale, entrambe espresse in [Hz].

Quando il dispositivo non è accoppiato all'interfaccia grafica, invece, esso invia tramite Bluetooth un segnale utile per l'accoppiamento, al posto dei dati sulle capacità.

Ogni 100K cicli, infine, viene controllato il livello di carica della batteria, segnalato attraverso le diverse colorazioni del LED. Questa funzione non è stata inserita all'interno della ISR innescata dal timer in quanto la precisione della sua temporizzazione non è di fondamentale importanza per il funzionamento del dispositivo. Vista la grande capacità della batteria rispetto ai requisiti del circuito (sez. 3.3.8), infatti, non vi è alcuna urgenza nella rilevazione del basso livello di carica, dal momento che il tempo concesso prima che il circuito smetta di funzionare è più che sufficiente per ricaricare il dispositivo ed evitarne malfunzionamenti.

Lo stato di accoppiamento con l'interfaccia grafica è comunicato dalla stessa al dispositivo tramite l'invio di opportuni segnali. Oltre a questi, all'inizio e alla conclusione del salvataggio dei dati forniti dal sensore sviluppato, esso riceve inoltre dei comandi che causano rispettivamente la chiusura e l'apertura dell'interruttore interposto tra i pin ausiliari, utile durante la calibrazione per consentire la sincronizzazione con i dati salvati dal sensore di riferimento (sez. 4.1).



### 3.5 Interfaccia grafica

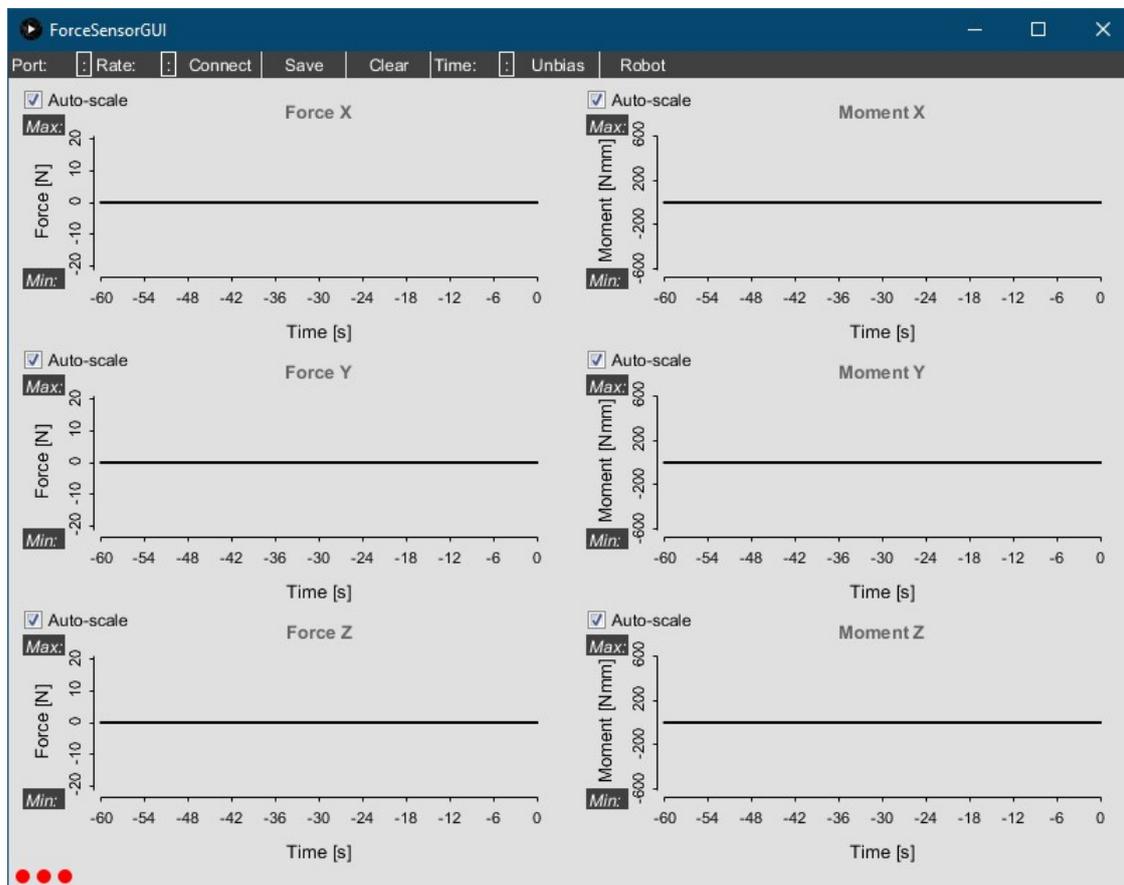


Figura 3.35: Interfaccia grafica sviluppata con Processing.

L'interfaccia grafica (GUI, “Graphic User Interface”) sviluppata, osservabile in figura 3.35, é stata progettata con “Processing”, un linguaggio di programmazione basato su “Java” che consente di sviluppare diverse applicazioni. La principale funzione della GUI, ridimensionabile a discrezione dell'utente, é la visualizzazione in tempo reale dei carichi applicati al sensore. La ricezione dei dati sulle capacità dei trasduttori, inviati dal sensore, innesca un evento seriale che a sua volta dà il via al calcolo dei carichi. I valori delle capacità vengono utilizzati per ricavare gli input per il calcolo matriciale secondo una modalità che verrà spiegata nella sezione 4.1. Gli input, moltiplicati per la matrice di calibrazione (sez. 4.1), consentono di ottenere i valori dei carichi applicati al dispositivo. Nel caso in cui questi siano superiori ai limiti consentiti, modificabili attraverso gli appositi parametri a seconda della tipologia di attività collaborativa da svolgere, viene inviata una segnalazione al robot al quale il sistema é connesso. In questo modo il robot può intraprendere le adeguate procedure per garantire la sicurezza dell'operatore. Se i carichi eccedono i limiti costruttivi del sensore (sez. 3.2.3), inoltre, viene mostrato un messaggio pop-up per avvertire l'utente del rischio di arrecare danni allo strumento e di possibili malfunzionamenti, legati per esempio a eventuali cortocircuiti tra le armature dei trasduttori.

Per ogni grafico l'utente può impostare il valore massimo e/o il valore minimo visualizzabili o, in alternativa, spuntare la casella che abilita la funzionalità dell'interfaccia di eguagliare,

istante per istante, i suddetti valori ai massimi e minimi ricevuti nell'intervallo di tempo rappresentato sui grafici stessi. Questa funzionalità della GUI, in particolare, ha reso necessario limitare la frequenza di ricezione dei dati. Le numerose operazioni da svolgere, infatti, intasano l'interfaccia causandone malfunzionamenti quando la frequenza viene alzata sopra una certa soglia. Questa dipende anche dall'ampiezza dell'intervallo temporale rappresentato sui grafici. Il numero di operazioni da svolgere è infatti direttamente proporzionale al numero di campioni da testare per individuare massimo e minimo di ogni tracciato, pari al prodotto tra la frequenza di ricezione dei dati in [Hz] e, appunto, l'ampiezza dell'intervallo in [s]. Pertanto, stabilito il massimo intervallo di interesse, sono state effettuate diverse prove per individuare la massima frequenza di ricezione dei dati che la GUI è in grado di sostenere, risultata pari a 10Hz.

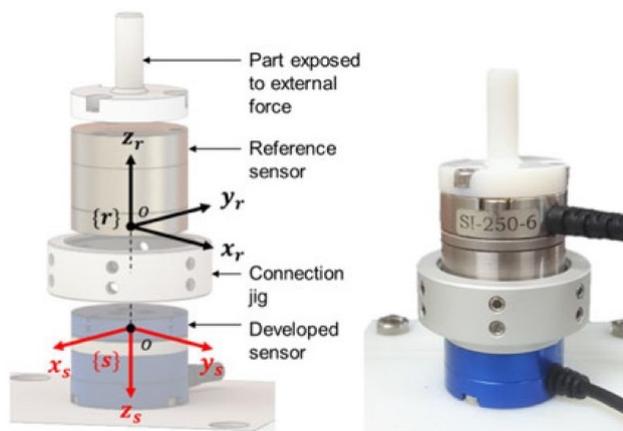
Nella parte superiore della GUI è stato creato un menù che permette di utilizzare l'interfaccia. Esso consente, in primo luogo, l'accoppiamento col sensore. Dopo aver selezionato la porta seriale COM del PC alla quale il modulo Bluetooth HC-05 è connesso, tra quelle disponibili nel primo menù a tendina "Port" all'istante della selezione, e dopo aver impostato la frequenza di comunicazione per il protocollo Bluetooth nel secondo menù "Rate", è quindi possibile procedere con l'accoppiamento premendo il pulsante "Connect". Quando il sensore non risulta essere ancora accoppiato, esso invia dei segnali che, qualora ricevuti dall'interfaccia grafica dopo aver premuto il suddetto tasto, confermano l'avvenuto accoppiamento tra i rispettivi moduli Bluetooth. La GUI risponde dunque inviando a sua volta un segnale che fa sì che il sensore inizi a quel punto a fornire informazioni sui carichi applicatigli. Il tasto "Save" consente invece di salvare i dati sui carichi di cui sopra, opportunamente formattati, in un file di testo posizionato in una cartella contenuta nella directory della GUI. Allo stesso tempo, premendo il suddetto tasto vengono inviati dei comandi al sensore che provocano la chiusura o l'apertura dell'interruttore interposto tra i pin ausiliari. Sono stati inseriti poi tre comandi che, insieme alla possibilità di impostare massimi e minimi visualizzabili su ogni tracciato, consentono di configurare al meglio i grafici mostrati sull'interfaccia a discrezione dell'utente. Col pulsante "Clear" è possibile ripulire i grafici, i quali mostrano i dati su un intervallo di tempo selezionabile dall'utente utilizzando il menù "Time". Con il tasto "Unbias" è possibile inoltre sottrarre ai valori mostrati nei grafici le rispettive medie, calcolate su un numero di campioni modificabile aggiustando il parametro corrispondente. Dopo aver opportunamente cambiato gli indirizzi IP inseriti nel codice, il pulsante "Robot" consente invece di connettere l'interfaccia al sistema robotico al quale il sensore è agganciato. Infine, in basso a sinistra sono stati posizionati tre LED virtuali, utilizzati per segnalare rispettivamente se il sensore è connesso all'interfaccia, se i dati mostrati sui grafici vengono contemporaneamente salvati e se il sistema è effettivamente connesso al robot.

## Capitolo 4

# Realizzazioni sperimentali e valutazione

### 4.1 Calibrazione

Parafrasando la definizione data dalla “Joint Committee for Guides in Metrology” (JCGM) in [33], la calibrazione é un insieme di operazioni per stabilire una relazione tra i valori quantitativi forniti da alcuni strumenti di misurazione di riferimento e le corrispondenti indicazioni ottenute da uno strumento in fase di sviluppo per ottenere, in una seconda fase, delle misure della grandezza di interesse a partire dalle suddette indicazioni attraverso l’utilizzo della matrice di calibrazione ricavata. La metodologia più ricorrente per acquisire i dati necessari per calibrare i sensori di carico consiste nell’applicare forze e momenti a un sistema costituito dal sensore in fase di sviluppo agganciato in serie a un sensore di riferimento. Affinché essi misurino gli stessi carichi, é necessario che i sistemi di riferimento dei due sensori siano collocati nello stesso punto materiale, come mostrato in figura 4.1.



**Figura 4.1:** Esempio di setup sperimentale per confrontare i dati forniti da un sensore in via di sviluppo con i dati ottenuti da uno strumento di riferimento [16].

In questo modo é possibile mettere direttamente in relazione i dati forniti dai due dispositivi, al limite applicando delle correzioni dovute alle diverse direzioni degli assi. In caso contrario, infatti, i momenti esercitati sui due sensori non sarebbero uguali, a causa dei differenti bracci delle forze applicate al sistema. In questa circostanza non sarebbe possibile confrontare direttamente i dati forniti dai due strumenti senza compensare algebricamente la suddetta

differenza. Questa operazione, seppur fattibile, richiederebbe delle misurazioni dei bracci delle forze, le quali introdurrebbero maggiori incertezze nella calibrazione. Il processo di campionamento dello spazio a sei dimensioni nel quale variano simultaneamente le tre forze e i tre momenti é tipicamente lungo e tedioso. Infatti, per calcolare la matrice ottima, una corretta calibrazione richiede un numero molto elevato di combinazioni differenti di carichi, tanto più vista la dimensione dello spazio di interesse visto che essi devono essere applicati in maniera sistematica per coprirlo interamente. La procedura può essere svolta applicando i carichi ai due sensori in serie attraverso un sistema di pulegge come in figura 4.2a. Questo procedimento può essere utile però per calibrare un sensore dal comportamento lineare, vale a dire un sensore per il quale il problema dell'accoppiamento tra le deformazioni provocate dai diversi tipi di carichi semplici é stato risolto attraverso una complessa progettazione strutturale. Per questo tipo di sensori é sufficiente infatti campionare i carichi singolarmente, dal momento che l'applicazione di altre forze e momenti non influenza le indicazioni fornite a proposito di quello in esame. In questo modo, la dimensione dello spazio da campionare si riduce di fatto a uno, richiedendo un numero molto minore di dati per una corretta calibrazione. Per sensori, come quello realizzato, per i quali il problema dell'accoppiamento meccanico non é stato risolto tramite la progettazione strutturale, tuttavia, questo processo risulta molto lungo e tedioso, come detto in precedenza. Per questa ragione é stato pensato di condurre l'acquisizione dei dati con una modalità più automatizzata. In [22] viene proposto un metodo per calibrare un sensore di carico utilizzando un robot, il cui movimento é sfruttato per orientare in diversi modi il sistema agganciato alla flangia, costituito dal sensore in fase di sviluppo, dal sensore di riferimento e da un peso disassato, posti in serie (fig. 4.2b). In questo modo, ripetendo il processo con pesi dalla massa variabile e modificando la distanza tra i loro assi e quello dei sensori, é possibile applicare al sistema carichi variabili in maniera pressoché uniforme all'interno di tutto lo spazio a sei dimensioni da campionare. Per fare ciò, é necessario muovere il robot in maniera tale che la sua flangia descriva una circonferenza, il cui raggio e centro non sono particolarmente rilevanti. I vantaggi di questo metodo risiedono nella sua automaticità, che riduce sensibilmente i tempi e la tediosità del processo, migliorandone allo stesso tempo la qualità. Per quanto detto in precedenza, infatti, questo costituisce di fatto anche un primo passo verso la riduzione del problema dell'accoppiamento delle deformazioni. Questo non é eliminato bensì tollerato e contemplato nel processo di calibrazione, il quale consente così di ottenere una matrice di trasformazione ottima tenendo conto della non-linearità del comportamento della struttura.

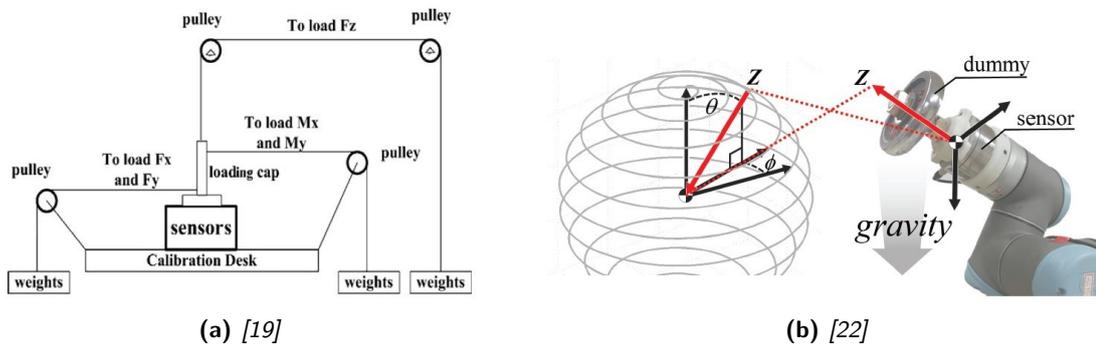


Figura 4.2: Esempi di setup sperimentali per l'applicazione dei carichi durante la calibrazione dei sensori.

In figura 4.3 si può osservare dunque il setup sperimentale realizzato in accordo con quanto detto in precedenza. Si può notare per l'appunto come il sensore sviluppato, il sensore di riferimento ATI Nano17 e il contenitore per i pesi siano stati connessi in serie attraver-

so opportuni adapter plates, realizzati col metodo della stampa 3D secondo le indicazioni contenute in [18], con dei fori per l'aggancio all'interfaccia meccanica del sensore.

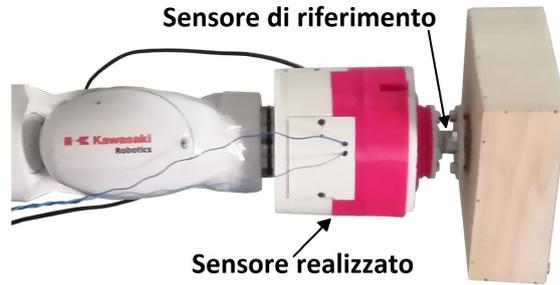


Figura 4.3: Setup sperimentale realizzato per la calibrazione del sensore.

Il contenitore dei pesi é stato realizzato in modo tale da consentirne l'aggancio al sistema sia in maniera allineata agli assi dei sensori che in modo disassato. In particolare, ricordando che il sensore é stato ottimizzato per misurare forze risultanti fino a 22N e momenti su ogni asse fino a 500Nmm, la distanza tra il centro dei pesi e gli assi dei sensori sarebbe dovuta essere almeno  $\frac{500Nmm}{22.0N} = 22.7mm$ . Per abbassare il rischio di guasti durante la procedura di calibrazione, tuttavia, essa é stata alzata fino a 40.0mm, ovvero la distanza tra i fori presenti sull'interfaccia meccanica del sensore, così da poter ridurre il numero di quelli sul contenitore, preservandone dunque la solidità. Questo ha però causato l'incremento del momento dovuto al disallineamento dello stesso rispetto ai sensori, ritenuto comunque accettabile come verrà spiegato in seguito.

A questo punto é possibile comprendere anche come é stato individuato il limite massimo di forza esercitabile sul sensore, utilizzato anche nel processo di ottimizzazione (sez. 3.2.3). Sapendo di avere a disposizione per la calibrazione dei pesi da 1Kg e supponendo che il loro centro di massa si trovasse circa nel centro geometrico, é stata impostata un'equazione che ha permesso di ricavare il massimo numero di pesi utilizzabili eguagliando il momento massimo esercitato da questi a quello massimo tollerabile dal sensore ATI, diviso per un fattore di sicurezza pari a 2. La forza limite é stata dunque ottenuta risolvendo l'equazione 4.1:

$$b_{MAX}P_{MAX} = \frac{M_{MAX}}{\xi} \quad (4.1)$$

dove:

$M_{MAX}$  é il momento massimo tollerabile dal sensore ATI sui diversi assi (tab. 2.3);

$\xi$  é il fattore di sicurezza;

$P_{MAX} = 9.81 \frac{m}{s^2} x$ , dove x rappresenta la massa limite applicabile al sistema nonché il numero massimo di pesi utilizzabili;

$b_{MAX}$  é il braccio massimo del peso  $P_{MAX}$ , ottenibile quando gli assi dei sensori sono orientati orizzontalmente, come in figura 4.3, e pari a:

$$b_{MAX} = h_{ATI} + h_{adapters} + h_{legno} + \frac{h_{peso}}{2}x \quad (4.2)$$

dove:

$h_{ATI}$  é l'altezza del sensore ATI;

$h_{adapters}$  é lo spessore degli adapter plates, contenuto il più possibile visto che provoca un

errore sistematico nella calibrazione dei momenti  $M_x$  e  $M_y$ , dovuto alla separazione che uno di essi introduce tra i sistemi di riferimento del sensore sviluppato e il Nano17, ma comunque tale da rendere gli adattatori in grado di tollerare i carichi generati durante la calibrazione;  $h_{legno}$  é lo spessore del legno utilizzato per creare il contenitore dei pesi;  $h_{peso}$  é l'altezza dei pesi a disposizione, divisa per 2 nel computo del braccio massimo nell'ipotesi che il loro centro di massa coincidesse all'incirca col centro geometrico.

Da un lato quindi, pur non generando situazioni di rischio per l'integrità del sensore Nano17, la calibrazione così impostata comporta l'applicazione di carichi non compresi nell'intervallo di misura dello stesso, il quale non garantisce così la solita accuratezza. In questo modo, tuttavia, é possibile campionare uniformemente tutto l'intervallo di interesse, con i vantaggi sopraccitati. Dall'altro lato, i momenti applicati durante la calibrazione eccedono anche quelli massimi previsti per l'ottimizzazione dell'elemento sensibile. Anche in questo caso, alla luce dell'elevato margine di sicurezza ottenuto come risultato dalle simulazioni svolte con ANSYS sulla struttura ottima (sez. 4.2), questo non é stato ritenuto un problema dal punto di vista strutturale, semmai un problema da affrontare a livello software per la gestione dei dati acquisiti durante il verificarsi di eventuali cortocircuiti tra le armature di uno o più trasduttori.

In figura 4.3 si possono notare inoltre i due cavi connessi durante la fase di calibrazione ai pin ausiliari, attraverso i fori appositamente realizzati sullo sportello. Essi sono fondamentali per sincronizzare i valori delle capacità, salvati durante il processo dal sensore sviluppato, con i dati sui carichi, acquisiti dal sensore ATI. Nel file generato da quest'ultimo, infatti, la connessione tra i due é segnalata attraverso il livello logico basso del tracciato corrispondente. Chiudendo e aprendo l'interruttore interposto tra i due pin rispettivamente all'inizio e alla fine del salvataggio dei dati, pertanto, é possibile ottenere un tracciato il cui valore logico può essere utilizzato per selezionare i campioni acquisiti dal sensore di riferimento durante la finestra temporale di salvataggio.

Utilizzando "K-ROSET", il software di simulazione robot offline di "Kawasaki", per verificarne la fattibilità, é stato scritto infine il programma in linguaggio AS per controllare la traiettoria da far compiere al robot durante la calibrazione. Il manipolatore in dotazione era infatti un MC004N della "Kawasaki Robotics" (fig. 1.3a). I robot Kawasaki della serie MC sono robot antropomorfi per applicazioni farmaceutiche e medicali, sviluppati per prevenire errori umani e rischi di contaminazione. Essi soddisfano le specifiche per le apparecchiature in uso nel settore sanitario per accuratezza, compattezza e pulizia, rendendoli ideali per applicazioni di assemblaggio, dispensazione, ispezione e manipolazione dei materiali [4]. Nella tabella 4.1 sono riportate alcune specifiche tecniche del manipolatore in questione. In particolare, esso é in grado di reggere fino a 4Kg agganciati alla flangia, più che sufficienti per effettuare la calibrazione descritta vista anche la massa complessiva inferiore a 0.8Kg del sensore sviluppato.

**Tabella 4.1:** Alcune specifiche del robot MC004N della Kawasaki Robotics [34].

Gradi di libertà	6+1
Ripetibilità	±0.05mm
Portata	4Kg
Sbraccio	506mm
Massa	25Kg
Controllore	E71

Il manipolatore é gestito da un controllore E71, che richiede una tensione di alimentazione compresa nell'intervallo [200;240]V alla frequenza di 50/60Hz e consente sia l'utilizzo manuale del sistema che l'esecuzione dei programmi contenuti in memoria. Il codice é stato dunque caricato nella memoria del controllore utilizzando "Notepad++", un software che consente di stabilire una connessione IP con lo stesso per inviare comandi o ricevere informazioni.

Sfortunatamente, durante gli ultimi preparativi prima di iniziare ad acquisire i dati per la calibrazione del dispositivo, il sensore ATI Nano17, da utilizzare come riferimento, ha smesso di funzionare. Visti gli elevati costi dei sensori di carico a sei gradi di libert  e i lunghi tempi di riparazione, é stato necessario eseguire una calibrazione alternativa rimuovendo dal setup sperimentale il sensore di riferimento. I dati salvati dal dispositivo sviluppato sono stati quindi messi in relazione con dei carichi calcolati manualmente a partire dalla massa dei pesi adoperati e dai bracci delle forze, i primi misurati con una bilancia dalla risoluzione di 1g e i secondi con un calibro dalla risoluzione di 0.1mm. L'automazione di questo processo, seppur resa possibile dagli encoder presenti nel braccio robotico che tengono traccia delle posizioni dei giunti, avrebbe richiesto una conoscenza pi  approfondita del sistema e sarebbe stata pertanto piuttosto lunga. Ovviamente la procedura cos  impostata non poteva essere eseguita in tempo reale durante il movimento del robot n  tantomeno era possibile calcolare i carichi applicati al sensore in ogni configurazione prevista dalla traiettoria programmata, pertanto il robot é stato posizionato manualmente in alcune posizioni che agevolavano il calcolo dei carichi e i dati sono stati acquisiti soltanto in queste configurazioni, variando la posizione del contenitore dei pesi rispetto all'asse del sensore e modificando la massa degli stessi ogni 500g fino a circa 2.2Kg.

I dati ottenuti sono stati quindi utilizzati per ricavare la matrice di calibrazione che consente di calcolare i carichi applicati al sensore a partire dai valori delle capacit  dei trasduttori. Questo é stato fatto impostando un problema di ottimizzazione su MATLAB, nello specifico un problema di minimizzazione della somma dei quadrati degli errori di misura. I dati importati nell'ambiente di calcolo sono stati opportunamente elaborati prima di iniziare il processo di ottimizzazione. In particolare, i valori dei carichi sono stati normalizzati per i rispettivi massimi, in modo tale che le scale non influissero sul calcolo della matrice di calibrazione. In caso contrario infatti, visto il differente ordine di grandezza dei momenti rispetto a quello delle forze, l'algoritmo ai minimi quadrati avrebbe favorito un'eccessiva riduzione degli errori sul calcolo dei primi a discapito degli errori sulla misura dei secondi. Oltre a questo, i valori ottenuti dai trasduttori non sono stati utilizzati direttamente come input per il calcolo matriciale. Questo si basa infatti sull'ipotesi di funzionamento lineare del sistema, tuttavia la capacit  di un condensatore é inversamente proporzionale alla distanza tra le sue armature (eq. 2.5), il parametro la cui variazione determina la componente desiderata dell'oscillazione del segnale da utilizzare per calcolare i carichi. I valori campionati dai convertitori sono stati dunque invertiti e ad essi sono stati sottratti gli inversi delle rispettive medie, calcolate col sensore non caricato durante il movimento del robot a descrivere una sfera. In questo modo (eq. 4.3) sono state ottenute, a meno di costanti inglobate nella matrice di calibrazione, le deformazioni subite dall'elemento elastico nei punti dove sono posizionati i trasduttori e nelle direzioni perpendicolari alle loro armature.

$$\Delta x(t) = d(t) - d_0 \propto \frac{1}{C(t)} - \frac{1}{C_0} \quad (4.3)$$

dove:

$\Delta x(t)$  é la deformazione subita all'istante  $t$  dall'elemento elastico nel punto in cui é posizionato uno qualsiasi dei trasduttori e nella direzione perpendicolare alle sue armature;

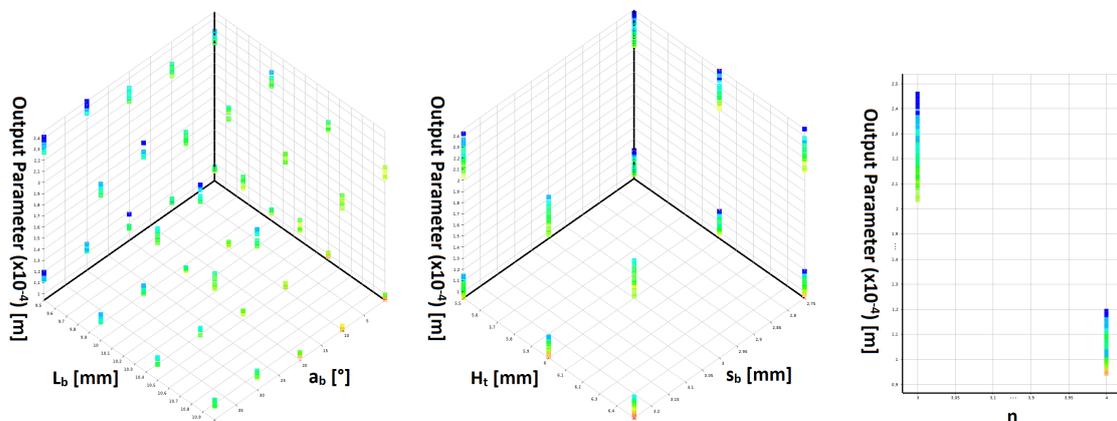
$C(t)$  é la capacit  all'istante  $t$  del trasduttore corrispondente, funzione della distanza  $d(t)$  tra le sue armature;

$C_0$  é la capacit  a riposo dello stesso trasduttore, funzione della distanza  $d_0$  tra le armature quando il sensore non é sottoposto all'applicazione di alcun carico. Questa é calcolata come la media delle capacit  campionate col sensore non caricato durante il movimento del robot a far compiere una traiettoria sferica al centro della flangia, cos  da compensare il peso dell'elemento sensibile ai carichi e dell'interfaccia meccanica del sensore sviluppato nella misurazione dei carichi applicatigli.

Secondo la nota legge di Hooke per i materiali elastici, infatti, i carichi applicati sono direttamente proporzionali alle deformazioni da loro causate. La struttura del sensore, tuttavia, non pu  dirsi caratterizzata da un comportamento lineare, tanto pi  alla luce del problema dell'accoppiamento delle deformazioni, che non é stato affrontato dal punto di vista della progettazione strutturale. Per questa ragione, oltre che campionare per quanto possibile tutto lo spazio a sei dimensioni dei carichi, sono state seguite inoltre le indicazioni riportate in [21], per cui alle deformazioni semplici sono stati aggiunti i termini di secondo grado e i termini incrociati di terzo grado come input per il calcolo matriciale. In particolare i termini incrociati, sia di secondo che di terzo grado, rendono conto del livello di accoppiamento tra le deformazioni nelle diverse direzioni. Aumentando il grado massimo dei termini considerati migliora anche il livello di approssimazione del comportamento reale della struttura ma aumenta proporzionalmente anche il costo computazionale del calcolo dei carichi. Per questa ragione ci si é limitati a considerare i suddetti termini, ritenuti sufficienti per applicazioni pratiche [21]. La matrice di calibrazione 6x58 cos  ottenuta é stata inserita all'interno del codice dell'interfaccia grafica per il calcolo dei carichi applicati al sensore, moltiplicati per i rispettivi valori massimi al termine delle operazioni descritte sopra, a causa della normalizzazione eseguita a monte del calcolo della matrice.

## 4.2 Risultati

In figura 4.4 sono rappresentati i design points, le combinazioni dei parametri dell'elemento sensibile ai carichi simulati da ANSYS Workbench durante l'esecuzione dell'ottimizzazione.



(a) Parametro di uscita al variare della larghezza e dell'angolazione dei bracci.

(b) Parametro di uscita al variare dell'altezza delle travi sottili e dello spessore dei bracci.

(c) Parametro di uscita al variare del numero di bracci e di travi sottili.

**Figura 4.4:** Rappresentazione dei design points simulati da ANSYS Workbench durante l'esecuzione dell'ottimizzazione.

La figura é tripartita vista l'impossibilit  di apprezzare in un unico grafico la variazione dei cinque parametri geometrici. Per la stessa ragione, a ogni valore o coppia di valori dei parametri sono associati pi  design points, dovuti al contemporaneo cambiamento delle variabili rimanenti. Come spiegato nella sezione 3.2.3, tra quelle accettabili   stata scelta la configurazione associata al valore massimo del parametro di uscita, calcolato come media aritmetica delle deformazioni subite dalle strutture associate nelle diverse direzioni. Non   sorprendente pertanto constatare nella figura 4.5, per esempio, che la struttura risultante   dotata di tre bracci anzich  quattro (fig. 4.4c). Nella tabella 4.2 sono quindi riportati i valori assunti dai parametri del modello al termine dell'ottimizzazione eseguita.

**Tabella 4.2:** Combinazione migliore dei parametri del modello dell'elemento sensibile ai carichi (fig. 3.14a) individuata attraverso l'ottimizzazione eseguita.

Parametro (Sigla)	Valore
Larghezza bracci ( $L_b$ )	11.0mm
Altezza bracci ( $H_b$ )	6.00mm
Angolazione bracci ( $a_b$ )	40°
Spessore bracci ( $S_b$ )	3.25mm
Larghezza travi sottili ( $L_t$ )	18.0mm
Altezza travi sottili ( $H_t$ )	6.50mm
Spessore travi sottili ( $S_t$ )	4.00mm
Numero bracci e travi sottili ( $n$ )	3

L'elemento elastico cos  ottenuto presenta un margine di sicurezza teorico minimo per le due simulazioni di carico effettuate superiore a 4.0.

Complessivamente il sensore realizzato (fig. 4.6)   alto circa 105mm e ha un diametro di circa 115mm, per un peso leggermente inferiore a 0.8Kg. Esso, prodotto con la tecnologia della stampa 3D,   dotato di un'interfaccia meccanica che replica quella del robot in dotazione.

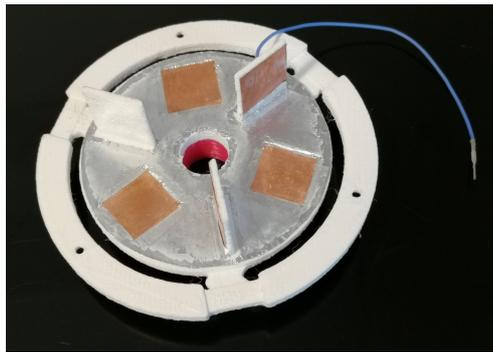


Figura 4.5: L'elemento sensibile ai carichi del sensore realizzato.



Figura 4.6: Il sensore di carico realizzato.

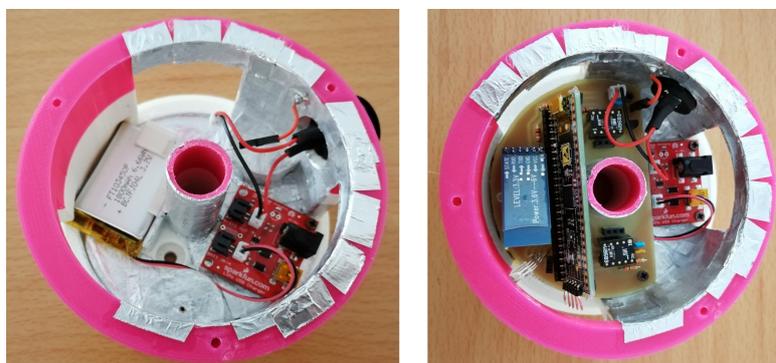


Figura 4.7: Viste dell'interno del supporto del sensore realizzato.

In figura 4.7 é mostrato lo spazio ricavato all'interno del suo supporto, adibito al contenimento dell'elettronica. Si possono notare, in particolare, la presenza della batteria per l'alimentazione nonché quella del modulo Bluetooth e dell'apertura sulla schermatura per consentire la comunicazione col PC, i quali hanno permesso di rendere il dispositivo completamente wireless.

Per la realizzazione della struttura sono stati utilizzati materiali differenti con un costo complessivo stimabile intorno ai 50€, mentre la spesa per i componenti elettronici e altri materiali si aggira sui 95€.

Circa il 15% dei dati acquisiti durante il processo di calibrazione, estratti tra questi in maniera aleatoria, sono stati utilizzati per analizzare l'accuratezza del sensore sviluppato, il quale é stato progettato per misurare fino a 22N di forza risultante e 500Nmm di coppia attorno a ogni asse. Nella figura 4.8 é possibile osservare il confronto tra i carichi misurati dallo stesso (in blu) e i valori di riferimento teorici calcolati manualmente (in rosso), mentre nella figura 4.9 sono riportati i valori assoluti degli errori corrispondenti. A prima vista é possibile notare come i carichi calcolati dal sensore seguano abbastanza bene l'andamento di quelli effettivamente applicatigli, a eccezione del momento intorno all'asse Z. Gli errori (tab. 4.3) medi rilevati nella misurazione delle forze applicate nelle diverse direzioni risultano essere comparabili e corrispondenti a un'accuratezza (tab. 4.4), calcolata come percentuale del fondo scala, intorno al 93%. Oltre a questo, le deviazioni standard degli errori sono abbastanza contenute, segno che la buona accuratezza é una caratteristica alquanto generalizzata. In alcuni punti, tuttavia, sono stati rilevati dei picchi di errori fino a 15N, con accuratezza minima intorno al 65%. Per quanto riguarda i momenti, escludendo quello in direzione Z, le valutazioni sono analoghe. Gli errori sono piú elevati, in virtú del fondo scala di un ordine di grandezza superiore rispetto a quello delle forze. L'accuratezza media e la minima sono però in linea con i valori calcolati per queste ultime. Se si considera tuttavia anche il momento  $M_z$  le valutazioni cambiano; l'accuratezza media appare comunque abbastanza elevata ma la minima cala al 41%. Come si può notare dalla figura 4.8, infatti, il momento  $M_z$  misurato dal sensore risulta essere sempre circa 0Nmm, con una piccola variabilità che non appare significativamente correlata alla variazione effettiva della coppia in direzione Z. Per questa ragione, in corrispondenza dei valori massimi e minimi di riferimento si notano degli errori elevati con accuratezza vicina al 50%, questo perché l'intervallo di misura é centrato appunto su 0Nmm in quanto il momento di intensità massima, così come gli altri carichi, può essere applicato sia in verso positivo che in verso negativo. Per le stesse ragioni, l'accuratezza media ottenuta sulle misurazioni del momento  $M_z$  appare sovrastimata e dovuta principalmente a quei sistemi di carichi i quali non prevedono l'applicazione di alcuna coppia in direzione Z.

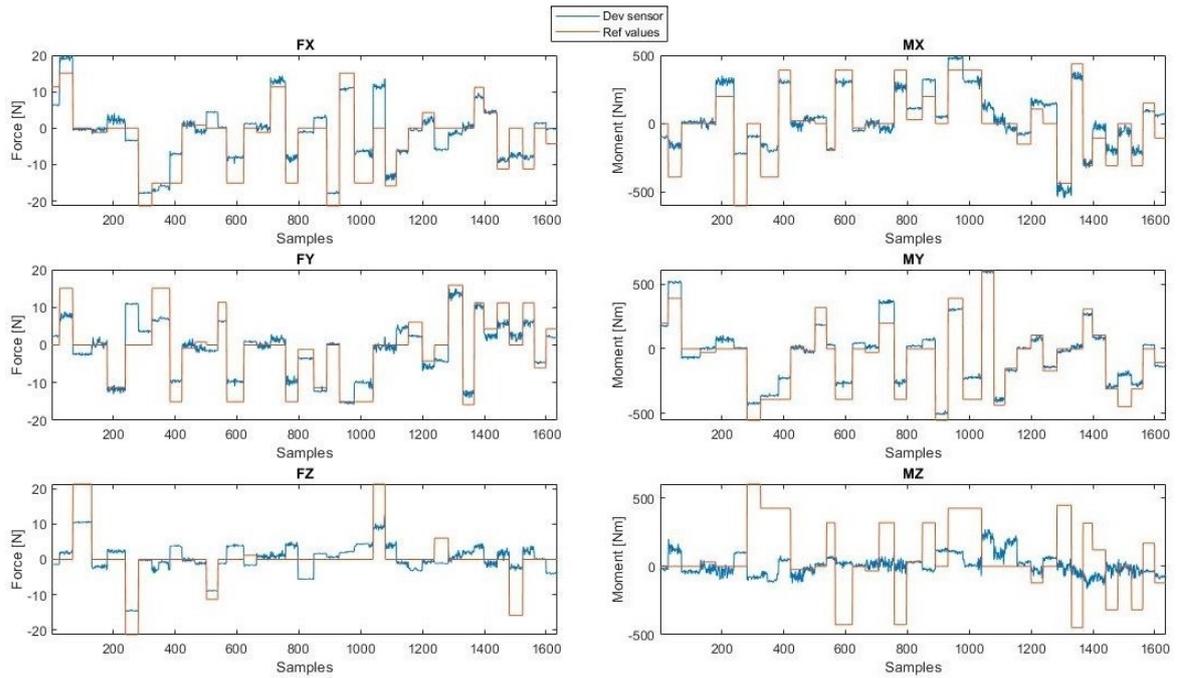


Figura 4.8: Confronto tra i carichi calcolati dal sensore sviluppato e i valori di riferimento teorici.

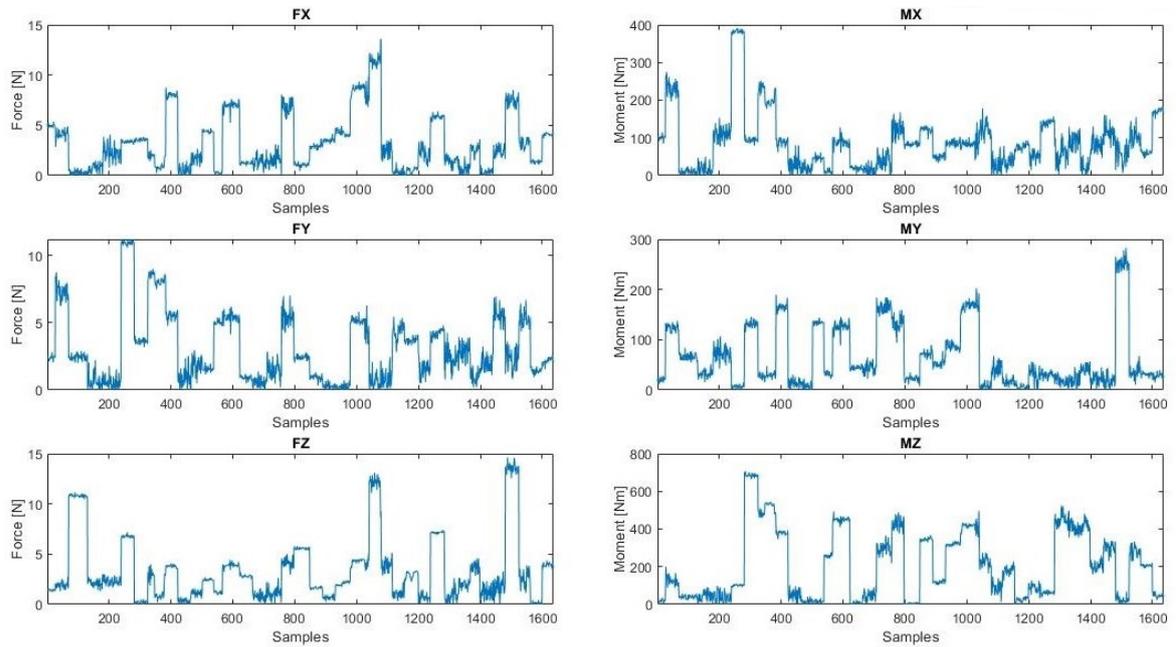


Figura 4.9: Valore assoluto degli errori teorici commessi dal sensore sviluppato nella determinazione dei carichi applicatigli.

**Tabella 4.3:** *Errori massimi, errori medi e deviazioni standard degli errori commessi in valore assoluto nella misurazione dei diversi tipi di carichi dal sensore sviluppato.*

	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Errore massimo	13.6N	11.2N	14.6N	392Nmm	283Nmm	708Nmm
Errore medio	3.18N	3.03N	3.30N	87.3Nmm	64.9Nmm	207Nmm
Deviazione standard	2.74N	2.52N	3.22N	73.0Nmm	59.8Nmm	182Nmm
Errore massimo	14.6N			708Nmm		
Errore medio	3.17N			120Nmm		
Deviazione standard	2.84N			119Nmm		

**Tabella 4.4:** *Accuratezza minima e accuratezza media del sensore sviluppato nella misurazione dei diversi tipi di carichi.*

	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
Accuratezza minima	68.1%	73.8%	65.7%	67.5%	76.6%	41.3%
Accuratezza media	92.6%	92.9%	92.3%	92.8%	94.6%	82.8%
Accuratezza minima	65.7%			41.3%		
Accuratezza media	92.6%			90.1%		

### 4.3 Discussione

Sebbene non costituisca di per sé un elemento di innovazione per i sensori di carico, l'ottimizzazione eseguita rappresenta un passaggio fondamentale nella realizzazione di un dispositivo le cui prestazioni dipendono in gran parte proprio dal comportamento meccanico della sua struttura. Grazie a essa è stato infatti possibile massimizzare la sensibilità del dispositivo realizzato, quantomeno dal punto di vista teorico. È necessario considerare però la disparità tra i risultati forniti dalle simulazioni svolte durante l'ottimizzazione su quella che è stata identificata come la versione migliore dell'elemento sensibile ai carichi e il comportamento reale del pezzo. Per come è stata progettata la struttura, applicando un sistema di carico massimale al sensore questo si sarebbe dovuto deformare in maniera tale da provocare variazioni della capacità dei trasduttori di circa  $\pm 15\text{pF}$ , mentre le oscillazioni reali sono dell'ordine di  $\pm 2\text{pF}$ . Questo fenomeno certifica di fatto la differenza tra il comportamento teorico atteso e quello reale dell'elemento elastico. La causa è con ogni probabilità da attribuire alla produzione con la stampa 3D. La precisione dei pezzi realizzati è infatti limitata, soprattutto a causa delle modifiche geometriche associate al raffreddamento dei materiali al termine del processo, e le proprietà meccaniche dipendono, oltre che dalla densità impostata, anche dall'orientamento del pezzo sul letto della stampante [35] e dalla geometria di riempimento [36]. Pertanto, sebbene la densità del pezzo in esame sia stata impostata al 100% proprio per ottenere delle proprietà meccaniche in linea con quelle teoriche e il pezzo sia stato progettato in maniera tale da non richiedere l'apposizione di materiale di supporto durante la stampa, la cui rimozione manuale avrebbe potuto effettivamente determinare una modifica delle proprietà finali, vi sono altre variabili che possono aver causato questa discrepanza. Detto ciò, l'identificazione della struttura migliore, tra quelle ammissibili, attraverso la massimizzazione di un parametro ottenuto come media aritmetica delle deformazioni delle stesse quando sottoposte ai sistemi di carico massimali appare comunque sbilanciata a favore di quelle strutture che si deformano maggiormente nella direzione Z del sistema di riferimento utilizzato, penalizzando su tutte la misurazione del momento attorno allo stesso asse, proprio come evidenziato dall'accuratezza del sensore sviluppato nella rilevazione dei diversi tipi di carichi (tab. 4.4).

L'obiettivo del presente lavoro di tesi era realizzare un sensore di carico a sei gradi di libertà per applicazioni robotiche che risultasse meno fragile e costoso rispetto a quelli in commercio. Ebbene il sensore progettato, grazie alla flessibilità fornita dalla stampa 3D, può essere facilmente connesso a differenti bracci robotici. La struttura realizzata e i materiali scelti sono funzionali allo scopo tuttavia il metodo di aggancio risulta essere poco pratico, dal momento che per disconnettere il dispositivo è necessario smontarlo quasi completamente, a eccezione della parte deputata alla trasduzione dei carichi. Esso appare meno fragile rispetto ad altri sensori dal momento che è stato eliminato il cavo che tipicamente porta l'alimentazione al trasduttore e il segnale allo stadio di condizionamento e acquisizione, facilmente soggetto a guasti. Questa caratteristica del sensore realizzato costituisce di fatto un elemento di innovazione dal punto di vista concettuale e strutturale sia rispetto ai dispositivi individuati sul mercato che rispetto a quelli presenti in ambito di ricerca. Sebbene non siano stati implementati dei meccanismi per la protezione dai sovraccarichi, esso risulta essere piuttosto resistente anche a forze e momenti applicati erroneamente che eccedano leggermente i limiti previsti. Per quanto riguarda il costo del dispositivo realizzato, esso è notevolmente inferiore rispetto al prezzo medio dei dispositivi di questo tipo. Sebbene non siano state conteggiate l'usura della stampante 3D robox così come quella del sensore di riferimento che si sarebbe dovuto utilizzare durante la calibrazione, difficilmente quantificabili, in ogni caso queste non

avrebbero comportato un aumento del costo del dispositivo tale da coprire la differenza tra l'ammontare della spesa per i materiali utilizzati per la realizzazione e il prezzo dei sensori presenti sul mercato. Infatti, ammesso anche che sia proprio il processo di fabbricazione delle complesse geometrie degli elementi elastici ad aumentare i costi di produzione dei sensori, come sostenuto in [9], bisogna però considerare che persino il prezzo di acquisto della stampante in dotazione è abbondantemente inferiore alla suddetta differenza. Volendo considerare anche il valore associabile al tempo richiesto per la sua progettazione, in un confronto con i sensori commerciali, questo andrebbe suddiviso sui diversi prodotti realizzati idealmente su larga scala, pertanto esso inciderebbe in maniera marginale sul costo complessivo. Lo stesso discorso vale per gli abbonamenti ai software utilizzati, molti sono open source ma di altri sono state utilizzate le versioni educative, non adoperabili a fini commerciali.

Gli intervalli di misura effettivi, pari a  $[-22;+22]$ N e  $[-866;+866]$ Nmm, sono in linea con quelli previsti. Per quanto detto nella sezione precedente però, escludendo il momento  $M_z$ , quello realizzato risulta essere un sensore a cinque gradi di libertà piuttosto che a sei. Per quanto riguarda i carichi rimanenti, considerati i mezzi a disposizione, le prestazioni del dispositivo sono ritenute soddisfacenti, sebbene non all'altezza di quelle dei sensori commerciali come il Nano17 (tab. 2.3).

Tra i motivi dietro la differenza tra il rendimento del sensore progettato e quelli commerciali vi è sicuramente la calibrazione approssimativa che è stata condotta a causa della mancanza di un sensore di riferimento. Sebbene essa abbia permesso di ottenere dei dati con i quali calcolare una matrice di calibrazione comunque adeguata allo scopo, è tuttavia evidente che la procedura di acquisizione non abbia però consentito di campionare in maniera uniforme l'intero spazio dei carichi a sei dimensioni di interesse. Questo costituisce già di per sé un importante limite per la calibrazione di qualsiasi tipo di strumento ma lo è a maggior ragione per la calibrazione di un sensore di carico a sei gradi di libertà, a causa del problema dell'accoppiamento tra le deformazioni e quindi dei segnali. Non campionando uniformemente tutto lo spazio di interesse, infatti, non possono essere valutate in maniera approfondita le influenze che l'applicazione di un determinato carico ha sulla sensibilità del sensore a una forza o a un momento differenti. Per lo stesso motivo, inoltre, i carichi usati come riferimento erano senz'altro affetti da errori sistematici, legati alla limitata accuratezza nella misura della massa dei pesi applicati durante la calibrazione e soprattutto dei bracci delle forze applicate da questi al sensore. Essi si riflettono inevitabilmente in errori di misura commessi dal dispositivo. Questi contributi, tuttavia, non possono essere osservati nei grafici e nelle tabelle riportate dal momento che i dati utilizzati per la valutazione dei risultati erano affetti dalla stessa tipologia di errori. Come spiegato nella sezione 4.1, l'utilizzo di un sensore commerciale per ottenere i carichi di riferimento avrebbe risolto entrambi i problemi, migliorando sicuramente le prestazioni del sensore.

Alla base della disparità di rendimento vi sono però anche altre motivazioni. Queste possono essere ricercate, per esempio, nell'utilizzo di sensori di tipo capacitivo. Sebbene la scelta sia stata ponderata alla luce delle considerazioni esposte nella sezione 2.2.1, bisogna altresì sottolineare che l'ottimizzazione delle prestazioni di sensori di questo tipo è difficilmente conciliabile con una manifattura di tipo artigianale, come quella utilizzata per montare il sensore. Come si è detto, infatti, la loro sensibilità aumenta in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le armature, rendendoli di fatto ideali per applicazioni, come quelle robotiche, che richiedono un'elevata rigidità della struttura, caratterizzata quindi da limitate deformazioni. Nonostante gli sforzi per posizionare le armature dei trasduttori alla distanza minore possibile, tuttavia, non è stato possibile raggiungere con i mezzi a disposizione le distanze submicrometriche alle quali esse vengono tipicamente situate [16]. Inoltre,

nonostante tutte le precauzioni prese, é possibile osservare comunque del rumore nei segnali provenienti dai convertitori. Questo é presumibilmente legato all'influenza degli elementi elettronici inseriti nel supporto del sensore sui pin dei convertitori o sui cavi non schermati connessi alle armature. Non é ragionevole tuttavia escludere categoricamente l'eventualità che il rumore, o almeno parte di esso, possa essere legato alla finestra lasciata nella schermatura per consentire la comunicazione tra il sensore stesso e la GUI tramite il modulo Bluetooth. Per limitare questo problema sono stati utilizzati dei filtri digitali per migliorare il SNR, compromettendo però uno dei vantaggi connessi all'utilizzo dei trasduttori capacitivi, ovvero la buona risposta in frequenza, e non risolvendo neanche la questione in maniera definitiva (fig. 4.8).

Infine, se é vero che le armature sono state posizionate a una distanza relativamente elevata per questo tipo di trasduttori, é anche vero però che, per quanto detto in precedenza, la differenza tra il comportamento teorico atteso e quello reale dell'elemento deformabile ha reso il dispositivo meno sensibile rispetto alle previsioni.

In definitiva, quello realizzato risulta essere un apprezzabile sensore di carico a cinque gradi di libertà, in grado di segnalare il superamento dei carichi massimi ammissibili così da poter mettere in atto le adeguate strategie per garantire la sicurezza degli operatori durante applicazioni di robotica collaborativa. Sebbene le sue prestazioni non siano confrontabili con quelle dei sensori commerciali, i suoi punti di forza risiedono nell'elevato rapporto qualità/prezzo e nell'innovazione introdotta rendendo il dispositivo completamente wireless. Grazie a questo, inoltre, l'apparato é stato reso meno soggetto a eventuali guasti, i quali aggravano quindi ulteriormente il suddetto rapporto a sfavore dei dispositivi presenti sul mercato.

## Capitolo 5

# Conclusioni e prospettive future

Negli ultimi anni l'industria mondiale si sta rivoluzionando dando vita a quella che viene definita "Industria 4.0". Tra i capisaldi di questa rivoluzione vi é la collaborazione tra tutti gli elementi presenti nel processo produttivo, ovvero gli operatori, le macchine e i sistemi informatici. É necessario pertanto studiare delle soluzioni per il problema della sicurezza sul lavoro, introdotto proprio dall'interazione diretta tra uomini e macchine.

Lo scopo del presente lavoro di tesi era pertanto la progettazione di un sensore di carico a sei gradi di libertà per applicazioni robotiche. Il dispositivo, montato sulla flangia di un robot, doveva essere in grado di rilevare le collisioni con gli operatori per garantirne la sicurezza durante il lavoro collaborativo, ovvero applicazioni durante le quali il robot e l'operatore svolgono i rispettivi compiti a stretto contatto l'uno con l'altro e non separati da barriere di protezione. In particolare, rispetto ai dispositivi presenti in commercio il sensore doveva risultare meno fragile e costoso, in quanto il loro prezzo incide in maniera significativa sul costo complessivo del sistema robotico, a maggior ragione se questi si guastano e devono essere riparati o sostituiti.

Innanzitutto é stata scelta la tipologia di trasduttori da adottare per la rilevazione dei carichi. Dal momento che la loro sensibilità aumenta in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le armature che li costituiscono, i trasduttori capacitivi ad armature piane parallele risultano ideali per applicazioni, come quelle robotiche, che richiedono un'elevata rigidità della struttura, la quale implica piccole deformazioni ma permette anche di posizionare i piatti dei condensatori a distanze ridotte. Per questa ragione, nonostante la loro elevata sensibilità al rumore elettromagnetico ma alla luce degli svantaggi connessi all'utilizzo di trasduttori di natura differente, essi sono stati utilizzati per rilevare le deformazioni nelle direzioni perpendicolari alle rispettive armature causate dall'applicazione dei carichi. Sebbene la loro predisposizione a captare il rumore elettromagnetico sia stata individuata come uno dei fattori principali ad aver ridotto il rendimento del sensore, bisogna però considerare che la schermatura realizzata con dei fogli di alluminio messi a massa, inseriti proprio per limitare questo problema, può essere facilmente migliorata. Avvalendosi di metodi di produzione più avanzati rispetto alla stampa 3D, infatti, sarebbe possibile schermare il sensore in maniera sicuramente più affidabile, per esempio utilizzando cavi già schermati per le connessioni con i trasduttori o realizzando una piccola antenna sulla superficie del supporto per ridurre al minimo l'apertura lasciata per consentire la comunicazione Bluetooth tra il dispositivo e il PC. Con metodi di assemblaggio più automatizzati sarebbe possibile anche posizionare le armature a distanze più contenute rispetto a quella alla quale é stato possibile collocarle in questa versione, con i vantaggi spiegati sopra. Certamente bisognerebbe valutare l'impatto di queste tecnologie sul costo finale del dispositivo, dal momento che la stampa 3D é stata utilizzata proprio per abbassarne il prezzo. Se possibile, l'ideale sarebbe poter

realizzare l'elemento sensibile ai carichi con la tecnologia additiva e ricorrere a metodi più avanzati per le altre componenti, visto che tipicamente è proprio la fabbricazione del primo ad alzare notevolmente il prezzo dei sensori di questo tipo. Per migliorare le prestazioni dei trasduttori, inoltre, si potrebbe pensare di inserire un dielettrico tra le armature. Questo non è stato fatto in questa fase principalmente a causa delle difficoltà realizzative che l'utilizzo di un isolante avrebbe comportato, anche se si sarebbe tuttavia potuto sfruttare quantomeno il sottile strato di carta posizionato dietro ai fogli di rame utilizzati per creare le armature, anche per annullare il rischio di cortocircuiti tra le stesse.

La struttura del sensore è stata comunque progettata per contenere i costi anche in previsione di una possibile futura produzione con tecnologie differenti da quelle additive. La sua interfaccia meccanica replica quella del robot al quale è stato connesso, proprietà che può essere facilmente estesa all'utilizzo di manipolatori differenti grazie all'utilizzo della stampa 3D. Al suo interno sono stati posizionati sei trasduttori capacitivi, necessari per calcolare i carichi nelle tre direzioni del sistema di riferimento cartesiano inciso sull'interfaccia del sensore. Le dimensioni delle armature sono state scelte in maniera tale da massimizzarne la sensibilità, compatibilmente con l'idea di contenere l'ingombro radiale affinché questo non superasse eccessivamente quello della flangia del robot in dotazione. Sono stati inoltre applicati alcuni accorgimenti strutturali minori utili per limitare il problema dell'accoppiamento tra i segnali, dovuto al comportamento non lineare del sensore. Non sono stati invece implementati meccanismi per la protezione dai sovraccarichi, vista la difficoltà nel determinare la distanza di sicurezza alla quale posizionare le strutture di sostegno, causata proprio dall'accoppiamento tra le deformazioni subite dal sensore quando sottoposto a diversi tipi di carico. Al suo interno è stato però inserito il circuito elettronico che consente di alimentare il dispositivo e acquisire i dati da inviare alla GUI tramite protocollo Bluetooth. Questo ha consentito di ridurre la fragilità tipica dei sensori di carico, eliminando quel cavo che, specialmente in applicazioni robotiche, limita i movimenti del sistema. Esso, necessario nei sensori in commercio per alimentare i trasduttori e per portare i loro segnali allo stadio di condizionamento e acquisizione, è infatti facilmente soggetto a guasti, pertanto la sua rimozione costituisce di fatto un miglioramento dal punto di vista della fragilità. Il posizionamento dei vari componenti elettronici potrebbe sicuramente essere ottimizzato in maniera differente rispetto a quanto è stato fatto in questa versione del dispositivo, consentendo così anche di ridurre l'altezza e quindi il peso. Utilizzando metodi di assemblaggio più avanzati, come detto in precedenza, sarebbe possibile anche ridurre le dimensioni dei trasduttori e quindi l'ingombro radiale del dispositivo, senza comprometterne eccessivamente la sensibilità o addirittura migliorandola. Infine, anche il metodo di aggancio al robot potrebbe essere studiato meglio, magari creando una piattaforma apposita da frapponere tra il robot stesso e il sensore. Allo stato attuale, infatti, per disconnetterlo è necessario smontare quasi completamente il dispositivo a eccezione della parte deputata alla trasduzione dei carichi, studiata appositamente in modo tale che non si renda necessaria una nuova calibrazione ogniqualvolta si debba rimuovere il dispositivo dal robot.

I materiali utilizzati per realizzare la struttura del sensore sono stati scelti, tra quelli compatibili con la stampante 3D in dotazione, in virtù della conformità delle loro proprietà meccaniche alle necessità costruttive. In particolare per l'elemento sensibile ai carichi è stato scelto il "Nylon PA12 - Natural" della Robox, un materiale dal basso modulo elastico e, allo stesso tempo, caratterizzato da un limite elastico relativamente elevato. Il primo ha permesso, almeno a livello teorico, di sfruttare la distanza iniziale tra le armature dei trasduttori, contenuta il più possibile ma rimasta comunque piuttosto elevata per dei trasduttori capacitivi, più che altro per esigenze pratiche legate alla necessità di montare manualmente il sensore. Grazie a questo, infatti, è stato possibile ottenere, sempre a livello teorico, deformazioni ta-

li da coprire quasi interamente lo spazio a disposizione, incrementando in ultima analisi la ridotta sensibilità iniziale del dispositivo, dovuta all'elevata distanza tra le armature. Per quanto riguarda invece l'elevato limite elastico, questo è stato sfruttato per ridurre il rischio di deformazioni permanenti che comprometterebbero il funzionamento del sensore, rendendo quindi il dispositivo più resistente.

Una volta progettata la struttura del sensore e stabiliti i materiali da utilizzare per la realizzazione della stessa, è stata eseguita un'ottimizzazione della geometria dell'elemento elastico, in maniera tale da massimizzarne le deformazioni causate dall'applicazione dei carichi, nei limiti fissati in particolare dalla distanza iniziale tra le armature dei trasduttori. Ai vari componenti del sensore sono stati assegnati i materiali con i quali essi sarebbero poi stati realizzati, con le rispettive proprietà meccaniche, ed è stata definita la natura delle connessioni tra le diverse parti. Per rendere le simulazioni ancora più aderenti alla realtà, in una eventuale futura revisione del dispositivo, si potrebbero determinare sperimentalmente i coefficienti di attrito tra i pezzi realizzati dalla stampante e rendere così più realistici i contatti tra gli stessi elementi simulati durante l'ottimizzazione. Durante il processo, infatti, è stata simulata l'applicazione su diverse strutture, ottenute attraverso la variazione di alcuni parametri a partire dal modello iniziale, di alcuni sistemi di carico massimali, individuati a partire dai limiti strutturali degli strumenti da utilizzare durante la fase di calibrazione del dispositivo sviluppato. Per limitare i tempi computazionali, i parametri del modello sono stati fatti variare su un numero contenuto di valori, così come è stato necessario limitare il numero di sistemi di carico da simulare, riducendo però conseguentemente anche la qualità del processo. Avendo a disposizione calcolatori più performanti e magari anche in numero maggiore, si potrebbero testare sistemi di carico differenti e più combinazioni dei parametri inseriti nel disegno dell'elemento sensibile, potendo così confrontare più configurazioni o addirittura creare delle curve di regressione per predire la combinazione di parametri migliore. Per questo sarebbe proficuo anche determinare un parametro da ottimizzare differente dalla media aritmetica delle deformazioni subite dalle strutture nelle diverse direzioni, apparsa infatti non correttamente bilanciata. Questi miglioramenti sono però da subordinare alla più profonda comprensione del legame che intercorre tra le diverse impostazioni della stampa 3D e le proprietà finali dei pezzi realizzati. L'ottimizzazione risulta infatti vana se, come evidenziato dai risultati ottenuti, essa non riflette quanto osservabile nella realtà.

Prodotti i vari componenti strutturali del sensore con il metodo della modellazione a deposizione fusa, è stato realizzato il circuito elettronico, stampato su una scheda fotoresistiva in rame, e sono stati sviluppati il firmware del dispositivo e l'interfaccia grafica necessaria per utilizzarlo. Il controllore del sensore si occupa, in particolare, di acquisire i dati sulle capacità dei trasduttori e di inviarli alla GUI, non prima però di averli opportunamente filtrati per ridurre gli effetti del rumore elettromagnetico sul segnale. Questi vengono quindi utilizzati per calcolare i carichi applicati al dispositivo, visualizzati sui grafici mostrati a video. Nel caso in cui i valori superino i limiti massimi impostati dall'utente, viene inviata una segnalazione al robot al quale il dispositivo è connesso, il quale può quindi mettere in atto le adeguate strategie di sicurezza. Tra gli altri, la GUI mette a disposizione diversi comandi per personalizzare l'interfaccia, tuttavia alcuni di questi causano malfunzionamenti della stessa quando la frequenza di ricezione dei dati viene alzata sopra una soglia determinata sperimentalmente. Per cercare di risolvere questo problema, si potrebbe pensare in particolare come migliorare l'efficienza dell'algoritmo che consente di eguagliare, istante per istante, i massimi e i minimi visualizzabili sui grafici ai valori limite ricevuti nell'intervallo di tempo rappresentato sui grafici stessi. In questo modo la GUI sarebbe in grado di sopportare una frequenza di ricezione dei dati più elevata e quindi anche il contenuto in frequenza del segnale mostrato potrebbe essere esteso. Questa possibilità è però legata al miglioramento della schermatura

del sensore, in quanto i filtri che limitano la frequenza del segnale sono stati inseriti proprio per migliorarne il SNR. Pertanto, qualora si riuscisse a migliorare l'isolamento dalle fonti di rumore sarebbe possibile attenuare il filtraggio ed estendere quindi il contenuto in frequenza del segnale rappresentato sull'interfaccia.

Il calcolo dei carichi avviene a partire dai valori delle capacità campionate attraverso la moltiplicazione per una matrice di calibrazione, ottenuta mediante la definizione e la conseguente risoluzione di un problema di ottimizzazione ai minimi quadrati. Vista la mancanza di un sensore per l'acquisizione dei valori di riferimento dei carichi, essi sono stati calcolati manualmente a partire dalla massa dei pesi adoperati e dai bracci delle forze da questi applicate al dispositivo realizzato. La procedura di acquisizione, condotta orientando in diversi modi il sistema utilizzando il robot in dotazione, non ha però consentito di campionare in maniera uniforme l'intero spazio dei carichi a sei dimensioni di interesse, limitando così le prestazioni del sensore e, in un certo senso, pregiudicando anche la correttezza delle valutazioni ricavabili dai dati sulla qualità del resto del lavoro effettuato. Per questo, il primo passo da cui partire per perfezionare eventualmente il dispositivo è assolutamente la ripetizione della procedura di calibrazione utilizzando un sensore commerciale per l'acquisizione dei carichi di riferimento e la valutazione dei risultati ottenuti in questo modo. Questa procedura contribuirebbe anche a ridurre il problema legato all'accoppiamento delle deformazioni, consentendo di ottenere una matrice di trasformazione ottima che tenga conto della non-linearità del comportamento della struttura. Allo stato attuale, infatti, il livello di accoppiamento tra le deformazioni è contemplato nel calcolo matriciale attraverso l'inserimento dei termini incrociati di secondo e terzo grado delle deformazioni subite dal sensore nelle diverse direzioni, calcolate a partire dalle capacità campionate. Tuttavia i dati utilizzati per valutare il contributo di questi termini nel calcolo dei carichi sono stati pochi e l'utilizzo di un sensore commerciale sarebbe risolutivo anche da questo punto di vista.

Nonostante tutto, il rendimento del sensore realizzato è comunque soddisfacente. Escludendo il momento nella direzione perpendicolare all'interfaccia del dispositivo, esso è infatti in grado di stimare i carichi applicatigli con una buona accuratezza media all'interno di intervalli di misura conformi a quelli previsti. Per quanto riguarda il momento di cui sopra, invece, l'accuratezza è notevolmente inferiore, con picchi in negativo non trascurabili. Per queste ragioni, il dispositivo può essere considerato un buon sensore di carico a cinque gradi di libertà o, in alternativa, un più modesto sensore a sei gradi di libertà. Infine, il suo costo complessivo risulta essere assolutamente competitivo rispetto agli analoghi presenti sul mercato e sono state introdotte delle migliorie dal punto di vista della fragilità caratteristica di questi sensori. Tutto sommato, quindi, gli obiettivi iniziali del lavoro possono essere considerati raggiunti.

Tabella 5.1: *Limiti e prospettive future.*

Limiti	Prospettive future
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibrazione approssimativa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ripetizione della procedura utilizzando un sensore commerciale per la misura dei valori di riferimento.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Persistenza di rumore em. sui segnali;</li> <li>• Ridotta risposta in fr. dei trasduttori a causa del filtraggio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizzo di cavi schermati per le connessioni con i trasduttori capacitivi; <ul style="list-style-type: none"> <li>• Miglioramento della schermatura.</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discrepanza tra i risultati delle simulazioni svolte e il comportamento meccanico reale.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprensione del legame che intercorre tra le diverse impostazioni della stampa 3D e le proprietà meccaniche dei pezzi realizzati;</li> <li>• Determinazione dei coef. d'attrito tra i pezzi realizzati dalla stampante.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ridotta sensibilità.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risoluzione dei problemi citati sopra;</li> <li>• Impiego di metodi di produzione e assemblaggio più avanzati;</li> <li>• Incremento del numero di simulazioni per identificare la migliore combinazione dei parametri possibile;</li> <li>• Determinazione di un parametro da ottimizzare meglio bilanciato; <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inserimento di un dielettrico tra le armature dei trasduttori.</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Malfunzionamenti GUI.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Miglioramento dell'efficienza della funzione per il ridimensionamento automatico dei grafici.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodo di aggancio poco pratico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inserimento di una piattaforma intermedia tra il sensore e i robot.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibile riduzione delle dimensioni e quindi del peso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ottimizzazione del posizionamento dei componenti elettronici;</li> <li>• Impiego di metodi di produzione e assemblaggio più avanzati.</li> </ul>



# Bibliografia

- [1] Philipp Gerbert et al. *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. A cura di Boston Consulting Group. 2015. URL: [https://www.bcg.com/it-it/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries.aspx](https://www.bcg.com/it-it/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx).
- [2] Steven Wyatt et al. «IFR Press Conference». In: *World Robotics 2019 Industrial Robots*. 2019. URL: <https://ifr.org/downloads/press2018/IFR%20World%20Robotics%20Presentation%20-%2018%20Sept%202019.pdf>.
- [3] International Organization for Standardization. *ISO 8373:2012 Robots and Robotic Devices - Vocabulary*. 2012. URL: <https://www.iso.org/standard/55890.html>.
- [4] URL: <https://robotics.kawasaki.com/en1/>.
- [5] International Organization for Standardization. *ISO/TS 15066:2016 Robots and Robotic Devices - Collaborative Robots*. 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/62996.html>.
- [6] Ales Vysocky e Petr Novak. «Human - Robot Collaboration in Industry». In: *MM Science Journal* 2016.02 (giu. 2016), pp. 903–906. DOI: 10.17973/mmsj.2016\_06\_201611.
- [7] Isaac Asimov. *Runaround*. 1942.
- [8] BGIA - Institute for Occupational Safety e Health of the German Social Accident Insurance. *BG/BGIA Risk Assessment Recommendations According to Machinery Directive. Design of Workplaces with Collaborative Robots*. 2009. URL: [https://www.dira.dk/media/66056/bg-bgia\\_risk\\_assessment\\_recommendations\\_according\\_to\\_machinery\\_directive.pdf](https://www.dira.dk/media/66056/bg-bgia_risk_assessment_recommendations_according_to_machinery_directive.pdf).
- [9] Rodrigo Pérez Ubeda et al. «Design and Manufacturing of an Ultra-Low-Cost Custom Torque Sensor for Robotics». In: *Sensors* 18.6 (giu. 2018), p. 1786. DOI: 10.3390/s18061786.
- [10] International Organization for Standardization. *ISO 12100:2010 Safety of Machinery - General Principles for Design - Risk Assessment and Risk Reduction*. 2010. URL: <https://www.iso.org/standard/51528.html>.
- [11] International Electrotechnical Commission. *IEC 60204-1:2016 Safety of Machinery - Electrical Equipment of Machines - Part 1: General Requirements*. 2016. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/26037>.
- [12] Hans-Juergen Ottersbach. *Human Mechanical Strain Limits (Pain Thresholds)*. A cura di Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). 2015. URL: [https://www.dguv.de/medien/ifa/en/pub/ada/pdf\\_en/aifa0372e.pdf](https://www.dguv.de/medien/ifa/en/pub/ada/pdf_en/aifa0372e.pdf).

- [13] Mohsin I. Tiwana, Stephen J. Redmond e Nigel H. Lovell. «A Review of Tactile Sensing Technologies with Applications in Biomedical Engineering». In: *Sensors and Actuators A: Physical* 179 (giu. 2012), pp. 17–31. DOI: 10.1016/j.sna.2012.02.051.
- [14] Pinyo Puangmali et al. «State-of-the-Art in Force and Tactile Sensing for Minimally Invasive Surgery». In: *IEEE Sensors Journal* 8.4 (apr. 2008), pp. 371–381. DOI: 10.1109/jsen.2008.917481.
- [15] Dong-Hyuk Lee et al. «A Capacitive-Type Novel Six-Axis Force/Torque Sensor for Robotic Applications». In: *IEEE Sensors Journal* 16.8 (apr. 2016), pp. 2290–2299. DOI: 10.1109/jsen.2015.2504267.
- [16] Uiikyum Kim et al. «A Novel Six-Axis Force/Torque Sensor for Robotic Applications». In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22.3 (giu. 2017), pp. 1381–1391. DOI: 10.1109/tmech.2016.2640194.
- [17] Inc. ATI Industrial Automation. *F/T Sensor Data Acquisition (DAQ) Systems*. URL: [https://www.ati-ia.com/app\\_content/documents/9620-05-DAQ.pdf](https://www.ati-ia.com/app_content/documents/9620-05-DAQ.pdf).
- [18] Inc. ATI Industrial Automation. *Six-Axis Force/Torque Sensor System*. URL: [https://www.ati-ia.com/app\\_content/documents/9620-05-Transducer%20Section.pdf](https://www.ati-ia.com/app_content/documents/9620-05-Transducer%20Section.pdf).
- [19] Qiaokang Liang et al. «Design and Fabrication of a Six-Dimensional Wrist Force/Torque Sensor Based on E-Type Membranes Compared to Cross Beams». In: *Measurement* 43.10 (dic. 2010), pp. 1702–1719. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.09.010.
- [20] Qiaokang Liang et al. «A Novel Miniature Four-Dimensional Force/Torque Sensor With Overload Protection Mechanism». In: *IEEE Sensors Journal* 9.12 (dic. 2009), pp. 1741–1747. DOI: 10.1109/jsen.2009.2030975.
- [21] S. Hirose e K. Yoneda. «Development of Optical Six-Axial Force Sensor and its Signal Calibration Considering Nonlinear Interference». In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Comput. Soc. Press, 1990. DOI: 10.1109/robot.1990.125944.
- [22] Hyun Seok Oh et al. «Force/Torque Sensor Calibration Method by Using Deep-Learning». In: *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*. IEEE, mag. 2017. DOI: 10.1109/urai.2017.7992824.
- [23] URL: <http://www.cel-robox.com/gallery-media/robox-2016/>.
- [24] cel-robox. *User Guide, v1.4*. URL: <https://cel-uk.com/wp-content/uploads/RoboxDocuments/Robox%20User%20Manual%20v1.4.pdf>.
- [25] Cypress Semiconductor Corporation. *PSoC<sup>®</sup> 5LP: CY8C58LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip*. 2018. URL: <https://www.cypress.com/file/45906/download>.
- [26] Texas Instruments. *FDC1004Q 4-Channel Capacitance-to-Digital Converter for Capacitive Sensing Solutions*. 2015. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/fdc1004-q1.pdf>.
- [27] NXP Semiconductors. *UM10204 I<sup>2</sup>C-Bus Specification and User Manual*. 2014. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
- [28] Cypress Semiconductor Corporation. *I<sup>2</sup>C Master/Multi Master/Slave, V3.50*. 2015. URL: <https://www.cypress.com/file/175671/download>.

- [29] Microchip Technology. *MCP1700 Low Quiescent Current LDO*. 2013. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP1700-Low-Quiescent-Current-LDO-20001826E.pdf>.
- [30] Microchip Technology. *MCP73831/2 Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers*. 2013. URL: [https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/6/9/5/MCP738312.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/6/9/5/MCP738312.pdf).
- [31] Cypress Semiconductor Corporation. *Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART), V2.50*. 2017. URL: <https://www.cypress.com/file/177171/download>.
- [32] Cypress Semiconductor Corporation. *Timer, V2.80*. 2017. URL: <https://www.cypress.com/file/376411/download>.
- [33] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), cur. *International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd Edition*. 2008. URL: [https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_200\\_2012.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf).
- [34] Kawasaki Robotics. *Specification of Robot MC004NFE70*. 2013. URL: [https://www.tiesserobot.it/risorse/media/41-90101-2228DEA\\_MC004NFE70.pdf](https://www.tiesserobot.it/risorse/media/41-90101-2228DEA_MC004NFE70.pdf).
- [35] Jason Cantrell et al. «Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts». In: *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Volume 3*. Springer International Publishing, set. 2016, pp. 89–105. DOI: 10.1007/978-3-319-41600-7\_11.
- [36] Daniel Farbman e Chris McCoy. «Materials Testing of 3D Printed ABS and PLA Samples to Guide Mechanical Design». In: *Volume 2: Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing*. American Society of Mechanical Engineers, giu. 2016. DOI: 10.1115/msec2016-8668.

