# ViMeLa
## DISEGNO
## istruzioni
### di laboratorio

## SQUADRA

Dorota Kamińska, Anna Firych-Nowacka,
Marcin Lefik, Grzegorz Zwoliński,
Tomasz Sapiński, Kamil Chruściński,
Sławomir Wiak, Goga Cvetkovski,
Lidija Petkovska, Maja Celeska,
Mihail Digalovski, Maria Evelina Mognaschi,
Paolo Di Barba, Najmeh Rezaei,
Rain Eric Haamer, Toomas Tikk,
Gholamreza Anbarjafari

Cofinanziato da
Programma Erasmus +
Unione Europea

Coordinatore:
POLITECHNIKA LODZKA
Partner:
Ss. CYRIL AND METHODIUS UNIVERSITY IN SKOPJE
TARTU ULIKOOL
UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PAVIA

www.vimela.p.lodz.pl

2017-2019

Dorota Kamińska, Grzegorz Zwoliński, Tomasz Sapiński, Anna Firych-Nowacka, Marcin Lefik, Kamil Chruściński, Sławomir Wiak

Goga Cvetkovski, Lidija Petkovska, Maja Celeska, Mihail Digalovski

Maria Evelina Mognaschi, Paolo Di Barba, Najmeh Rezaei

Rain Eric Haamer, Toomas Tikk, Gholamreza Anbarjafari

Questa pubblicazione è stata cofinanziata dall'Unione Europea nell'ambito del Programma Erasmus+(Strategic Partnership, ViMeLa, 2017-1-PL01-KA203-038675).

Questa pubblicazione riflette il solo punto di vista degli autori, l'Agenzia Nazionale e la Commissione Europea non possono essere ritenute responsabili per nessun uso che possa essere fatto delle informazioni qui contenute.

# SOMMARIO

SOMMARIO ..... 3
1. INTRODUZIONE ..... 5
1.1. Introduzione ..... 5
1.2. Imparare la Meccatronica ..... 6
1.3. Mondo Reale vs Virtuale ..... 7
1.4. Progetto ViMeLa ..... 8
2. Scenario 1 - Costruzione e Principi Operativi dei Motori Elettrici ..... 10
2.1. Scopo dello Scenario 1 ..... 10
2.1.1. Motore a Induzione (IM) ..... 10
2.1.2. Macchine Sincrone (SM) ..... 12
2.1.3. Macchine a Corrente Continua (DCM) ..... 18
2.2. Assemblaggio Virtuale delle Macchine Elettriche ..... 20
2.2.1. Motore Sincrono a Magneti Permanenti (PMSM) ..... 27
2.2.2. Motore a Induzione (IM) ..... 29
2.2.3. Motore a riluttanza commutata (SRM) ..... 30
2.2.4. Motore DC con Commutatore a Statore Avvolto (WSDCCM) ..... 31
2.2.5. Motore DC a Magneti Permanenti (PMDC) ..... 32
2.2.6. Permanent Magnet Generator (PMG) ..... 33
2.3. Principi di Funzionamento delle Macchine Elettriche ..... 34
3. Scenario 2 -CONSTRUCTION AND OPERATING PRINCIPLES of Electric Motors 36
3.1 Linguaggio FBD (diagramma a blocchi funzionali) ..... 36
3.2 Blocchi di base del linguaggio FBD ..... 37
3.3 Blocchi funzionali standard ..... 39
3.4 Costruzione del controllore ..... 45
3.5 Descrizione del programma VR ..... 46
Scenario 3 - LINEA DI SMISTAMENTO A NASTRO ..... 49
3.6 Scopo dello Scenario ..... 49
3.7 Introduzione ..... 49
3.8 Assemblaggio Virtuale della Linea di Smistamento ..... 51
3.9 Sensore capacitivo ..... 52

3.10 Sensore induttivo .....53
3.11 Attuatore elettromagnetico .....55
3.12 Funzionamento della linea di smistamento .....56
Appendice A -HTC VIVE: MANUALE DELL'UTENTE .....57
Introduzione .....57
Controllers .....57
Attivazione .....58
Luce di stato .....58
Utilizzo .....58
Stazioni di base .....59
Installazione .....59
Attivazione .....60
Luce di stato .....60
Cuffia .....60
Regolazione delle lenti .....60
Pulizia del cuscino del viso .....61
Pulizia delle lenti .....61
Luce di stato .....62
Box di collegamento .....62
Configurazione di Steam VR .....63

# 1. Introduzione

## 1.1. Introduzione

Nel XXI secolo, l'istruzione superiore è passata da libri e penne all'uso di tecnologie interattive per aiutare gli studenti a comprendere e trasmettere conoscenze. Al giorno d'oggi, l'istruzione tradizionale e i metodi di insegnamento, nonostante sfruttino tecniche di insegnamento significativamente migliorate, non riescono a catturare abbastanza interesse da parte di studenti che sono cresciuti con Internet, cellulari e tablet. Particolarmente sensibili a questi problemi sono gli studenti in ingegneria, ed in particolare, in meccatronica.

La moderna tecnologia dell'informazione è in rapida adozione in Ingegneria Meccatronica come strumento per arricchire l'esperienza pratica degli studenti. La formazione pratica è una parte vitale dell'istruzione per quanto riguarda l'Ingegneria Meccatronica. Tuttavia, l'alto costo necessario per implementare esperimenti di laboratorio (per scopi educativi) ha portato allo sviluppo di strutture virtuali in cui i sistemi fisici possono essere virtualmente controllati tramite le simulazioni di realtà virtuale (VR).

Le tecnologie multimediali e VR offrono un grande potenziale per presentare i concetti teorici e gli esperimenti di laboratorio in modo stimolante e interessante, ma comunque economico.

Gli studenti sono in grado di visualizzare concetti astratti, di osservare eventi su piccola o grande scala, di visitare vari ambienti ed interagire con eventi e dispositivi che di solito a causa di fattori ambientali, temporali, o di sicurezza non sono disponibili. Le simulazioni di laboratorio VR offrono un'esperienza interattiva. Gli utenti possono muoversi liberamente nell'ambiente, interagire con gli oggetti, eseguire test e fare decisioni ed errori, fino a quando non hanno acquisito padronanza con l'argomento.

## 1.2. Imparare la Meccatronica

La Meccatronica è una sinergia ed un'interazione di sistemi meccanici, elettrici e informatici come si vede in Figura 1.1. Si tratta quindi di una combinazione interattiva di ingegneria meccanica, controllo elettronico e tecnologia informatica, con l'obiettivo di raggiungere un equilibrio ideale tra la struttura meccanica, il suo controllo e le sue prestazioni complessive. I sottosistemi di meccatronica sono elettromeccanica, robotica e controllo.

I concetti multidisciplinari che si fondono nell'ingegneria meccatronica richiedono un'istruzione accademica superiore in grado di fornire un adeguato equilibrio tra le capacità di ricerca e sviluppo, nonché ingegneri qualificati formati per la progettazione, la produzione, l'implementazione e la fornitura di servizi nelle loro aree professionali.

Attualmente, le lezioni di meccatronica sono divise in due parti: le lezioni teoriche e i corsi pratici di laboratorio con esperimenti che seguono il modello "imparare facendo".

1. Il lavoro pratico di laboratorio, anche se gli studenti hanno un accesso limitato alle macchine, fornisce una comprensione più profonda delle lezioni teoriche. Tuttavia, attrezzature costose e tempo limitato per la formazione non forniscono piattaforme educative sufficienti. Inoltre, a causa del fatto che ogni laboratorio è supervisionato dal personale tecnico, e dato che che gli studenti sono divisi in gruppi sempre più piccoli, vi è una finestra di tempo limitata per ogni tipo di esercizio da svolgere.
2. In alcuni casi, gli studenti conducono esercizi basati su simulazioni e imparano come i sistemi e i dispositivi meccatronici funzionano in realtà, nonostante possa sembrare astratto e poco chiaro per gli studenti e non rifletta pienamente i fenomeni fisici di particolari processi.

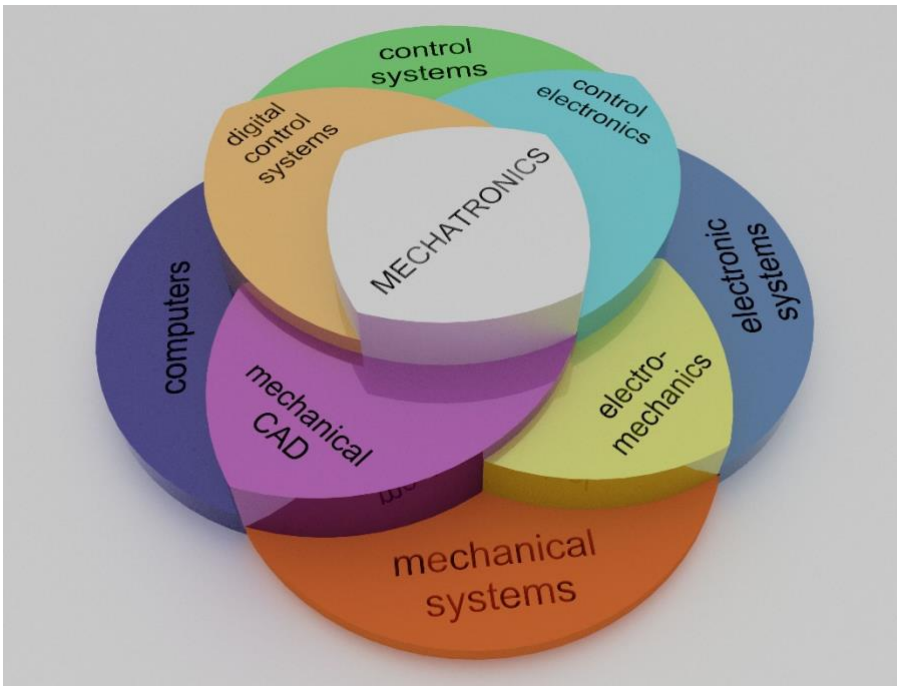



Figure 1.1. Struttura ed elementi chiave della meccatronica

Gli svantaggi descritti per lo studio della meccatronica sono notevolmente migliorati quando l'insegnamento in classe è supportato dalla tecnologia VR e dagli strumenti VR. I laboratori virtuali sono all'interno di queste soluzioni e offrono un'esperienza interattiva. Il risultato più significativo è che gli studenti imparano facilmente concetti astratti, in quanto possono sperimentarli e visualizzarli nell'ambiente virtuale.

## 1.3. Mondo Reale vs Virtuale

La Realtà Virtuale, per sua definizione pura, può offrire esperienze ed interazioni per gli studenti che non risultano pratiche oppure possibili nel "Mondo Reale".

La realtà virtuale è esistita in varie forme già a partire dagli anni '60, quando furono sviluppati i primi simulatori di volo digitali. Con l'avanzare della tecnologia, "realtà virtuale" è diventato il termine utilizzato per rappresentare i dispositivi che creano un ambiente immersivo e interattivo con realismo visivo. “Desktop VR” è emerso durante i primi anni 2000 perché i personal computer diventarono abbastanza potenti da simulare e rappresentare mondi virtuali 3D.

In effetti, la simulazione della realtà virtuale consiste nell’utilizzo di oggetti e ambienti 3D per creare esperienze di apprendimento coinvolgenti ed immersive. Il principio dell'e-learning della realtà virtuale è quello di impartire, esercitare e controllare le conoscenze

dell'utente utilizzando scenari ed ambienti interattivi per riflettere situazioni di vita reale. Utilizzando la tecnologia 3D, che viene definita ambienti del mondo reale, viene creato qualsiasi ambiente o situazione. Così, la simulazione di realtà virtuale fornisce un ambiente ed un'esperienza veramente interattivi. Gli studenti possono muoversi liberamente nell'ambiente, interagire con gli oggetti, effettuare test, e fare decisioni ed errori fino a quando non hanno acquisito padronanza con l'argomento.

## 1.4. Progetto ViMeLa

Virtual Mechatronic Laboratory - ViMeLa come strumento innovativo per insegnare ed imparare la Meccatronica. Il concetto si basa su un metodo di apprendimento misto che utilizza lezioni teoriche e la realtà virtuale – VR come uno strumento di sperimentazione. L'apprendimento misto consiste in questo caso in un metodo ibrido che combina i media digitali (attraverso la VR) con i metodi tradizionali della classe, risultando più efficace nell'apprendimento della meccatronica rispetto alle lezioni puramente frontali. La capacità di cambiare facilmente il mondo virtuale apre nuove possibilità per effettuare test e lavorare con le attrezzature, senza la necessità di disporre di costosi campioni fisici.

> "Tell me and I forget. Teach me and I remember.
> Involve me and I learn."
>
> (as per Benjamin Franklin)

Tre scenari sono parte integrante del progetto:

1. Costruzione, principi operativi e prestazioni dei motori elettrici.
2. Linea di smistamento con componenti pneumatici.
3. Linea di smistamento dei rifiuti con cintura.

L'innovazione del concetto proposto risiede nello sviluppare un sistema di apprendimento della meccatronica originale e nuovo, basato sulla tecnologia VR. E'stato sviluppato e creato un ambiente interattivo tramite computer – una fabbrica come si vede in Figura 1.2, dove sono collocati gli spazi di lavoro distinti per i tre scenari. Lo studente può osservare, entrare e muoversi in esso, con la possibilità di cambiamenti dinamici da scenario a scenario.

Figura 1.2. Capannone industriale creato nel progetto ViMeLa utilizzando VR

"L'unica fonte di conoscenza è l'esperienza "

(citazione di Albert Einstein)

# 2. Scenario 1 - Costruzione e Principi Operativi dei Motori Elettrici

## 2.1. Scopo dello Scenario 1

Lo scopo di questa parte dell'applicazione VR è quello di familiarizzare l'utente con i motori elettrici, con le loro parti principali e la loro costruzione, così come con i relativi principi di funzionamento. Pertanto, i modelli 3D di sei macchine elettriche reali vengono preparati in ambiente VR. Lo Scenario è costituito da due parti. La prima parte dell'esercizio consentirà agli studenti di apprendere le parti principali dei tipi selezionati di macchine elettriche e di acquisire l'abilità per effettuare l'assemblaggio ed il di assemblaggio virtuale delle macchine elettriche in correlazione con la corretta selezione delle loro parti principali (ad esempio il nucleo dello statore, il nucleo del rotore, i magneti permanenti, gli avvolgimenti, i cuscinetti, gli alberi, gli alloggiamenti, ecc.). Il modulo di simulazione è progettato per presentare i principi delle macchine utilizzate nei sistemi meccatronici. Nella seconda parte dello Scenario il modello virtuale di un motore sincrono a magneti permanenti consentirà agli studenti di analizzare l'impatto delle condizioni di alimentazione (cioè valori di tensione e frequenza, frequenza degli impulsi) sulle sue prestazioni e caratteristiche di lavoro.

### 2.1.1. Motore a Induzione (IM)

Una macchina a induzione è quella in cui le correnti alternate vengono fornite direttamente agli avvolgimenti dello statore e, mediante un’azione trasformatorica (induzione), al rotore. Il flusso di potenza da statore a rotore è associato ad un cambiamento di frequenza, e in uscita vi è la potenza meccanica trasmessa al carico collegato all'albero del motore. Il motore a induzione è il motore più impiegato nell'utilizzo industriale e commerciale dell'energia elettrica. I motivi che giustificano la popolarità dei motori a induzione includono semplicità, affidabilità e basso costo, uniti con capacità di sovraccarico ragionevole, minime necessità di manutenzione e buona efficienza. Il rotore di un motore a induzione può essere di due tipi. Nel motore a rotore avvolto, gli avvolgimenti distribuiti sono impiegati mediante

terminali collegati ad anelli di contatto isolati montati sull'albero motore (Fig. 1.3). La seconda tipologia è chiamata rotore a gabbia di scoiattolo (Fig. 1.4), dove gli avvolgimenti sono costituiti semplicemente da barre conduttrici incorporate nel rotore e cortocircuitate ad ogni estremità tramite anelli conduttivi. I terminali del rotore sono quindi inaccessibili in una costruzione a gabbia di scoiattolo, mentre nella costruzione a rotore avvolto i terminali del rotore sono resi disponibili attraverso spazzole di carbonio che poggiano sugli anelli di contatto. Lo statore di un motore a induzione trifase contiene tre diversi avvolgimenti che vengono distanziati di 120 gradi nello spazio, per costituire un avvolgimento trifase. L'applicazione di una tensione trifase all'avvolgimento statorico determina la comparsa di un campo magnetico rotante. È chiaro che le correnti indotte nel rotore (a causa del campo rotante) interagiscono con il campo stesso per produrre una coppia che ruota il rotore nella direzione del campo rotante.

Le parti principali di qualsiasi IM sono:

- Il nucleo magnetico dello statore, provvisto di cave;
- L'avvolgimento elettrico di statore;
- Il nucleo magnetico del rotore, provvisto di cave;
- L'avvolgimento elettrico di rotore;
- L'albero del rotore;
- Il telaio dello statore con i cuscinetti;
- Il sistema di raffreddamento;
- L'alloggiamento.

Le macchine a induzione possono essere classificate in molti modi. Di seguito ne vengono riportati alcuni:

- Con movimento rotativo o lineare;
- Alimentazione trifase, alimentazione monofase o alimentazione multifase;
- Con rotore avvolto oppure a gabbia.

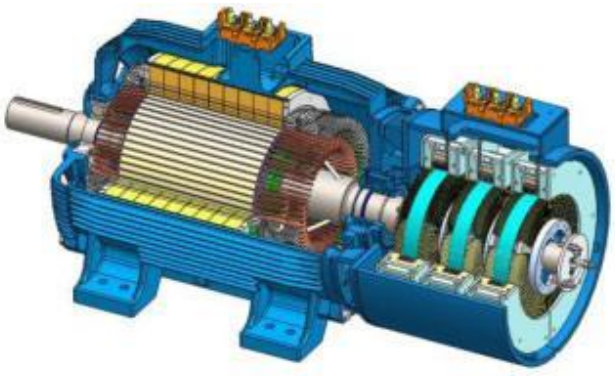


Figura 1.3. Motore a induzione con rotore avvolto

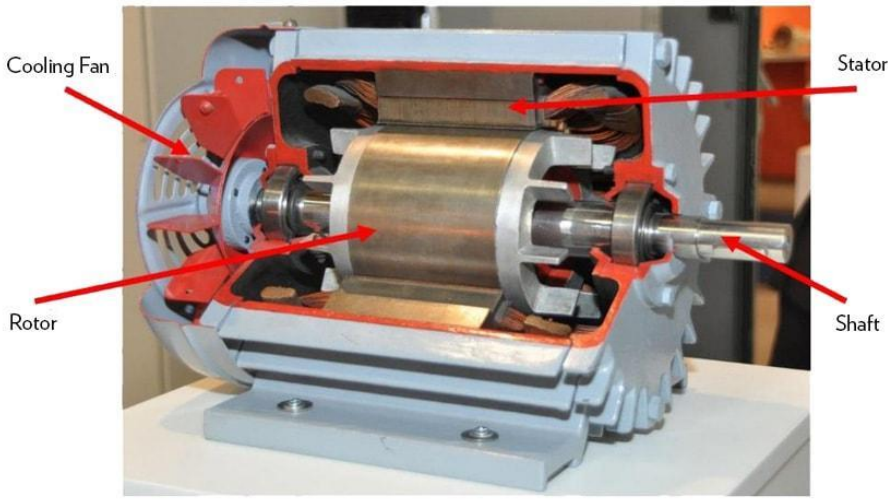



Figura 1.4. Motore a induzione con rotore a gabbia di scoiattolo

## 2.1.2. Macchine Sincrone (SM)

Un motore sincrono è una macchina che trasforma la potenza elettrica in potenza meccanica, o viceversa è un generatore quando trasforma la potenza meccanica in potenza elettrica. Ciò significa che le macchine sincrone sono macchine elettriche reversibili. Questo vale anche per tutte le altre macchine elettriche rotanti, come le macchine a induzione e le macchine in corrente continua. La velocità di rotazione in funzionamento normale è esattamente proporzionale alla frequenza del sistema a cui è collegata. Se non diversamente specificato, è generalmente sottointeso che un motore sincrono ha poli di campo eccitati con corrente continua. In alcune nuove topologie l'avvolgimento di eccitazione viene sostituito con magneti permanenti e quindi la macchina diventa una macchina sincrona a magneti permanenti. Negli ultimi anni i produttori di macchine elettriche tendono a produrre generatori sincroni a magneti permanenti che vengono utilizzati principalmente nell'ambito dell'energia eolica.
Il motore sincrono è costruito con un avvolgimento polifase distribuito in corrente alternata, indicato come l'armatura, che di solito si trova sullo statore ed è collegato al sistema di alimentazione AC. La configurazione del membro opposto, di solito il rotore, determina il tipo di motore sincrono. I motori con avvolgimenti di campo eccitati in corrente continua e collocati su rotori a poli salienti oppure isotropi, con potenze che variano da 150 kW a 75 MW ed ancora superiori, rappresentano la tipologia dominante in ambito industriale. Nel motore sincrono senza spazzole, l'eccitazione (corrente di campo) viene fornita, tramite raddrizzatori collocati sull'albero, da una macchina eccitatrice in corrente alternata. Nel motore sincrono con

anelli di contatto, l'eccitazione viene fornita mediante una macchina eccitatrice calettata sull'albero o da un'alimentazione in corrente continua separata. I motori sincroni ad induzione dotati di potenze inferiori ai 4 kW, di solito alimentati tramite azionamenti a velocità variabile, sono progettati con una diversa riluttanza lungo il traferro nell'asse diretto e nell'asse in quadratura per sviluppare la coppia di riluttanza e sono indicati come motori a riluttanza. I motori non hanno alcuna fonte di eccitazione per il funzionamento sincrono. I motori sincroni che impiegano un'eccitazione a campo magnetico permanente e sono azionati tramite un inverter da un'alimentazione in corrente continua sono indicati come motori dc brushless mentre se sono alimentati da una alimentazione trifase sono indicati come motori sincroni a magneti permanenti.

Questa sezione introduce la valutazione di progetto dei motori a magneti permanenti e del motore a riluttanza, poiché questi tipi di macchine sono inclusi nella parte di assemblaggio dello Scenario 1. Essa è organizzata nella maniera seguente. Le tre disposizioni geometriche di base dei magneti permanenti (Fig. 1.5), per le macchine a magneti permanenti con statori convenzionali sono:

1. Magneti superficiali.
2. Magneti permanenti interni.
3. Magneti permanenti sepolti

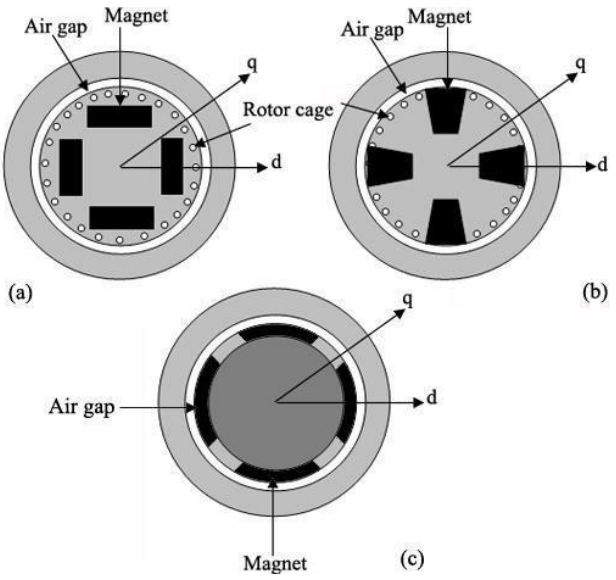



Figura 1.5. Disposizioni dei magneti permanenti sul rotore delle macchine sincrone PM
a) magneti interni,
b) magneti sepolti,
c) magneti superficiali

La Figura 1.6 mostra la morfologia magnetica di base del motore con magneti montati sulla superficie del rotore e con un avvolgimento dello statore convenzionale. Questo schizzo non mostra alcuni importanti aspetti meccanici della macchina, come i mezzi per fissare i magneti permanenti al rotore, e quindi si dovrebbe considerare come

generale. Inoltre, questo schizzo e gli altri che seguiranno non sono necessariamente realizzati in una scala propria delle macchine costruibili.

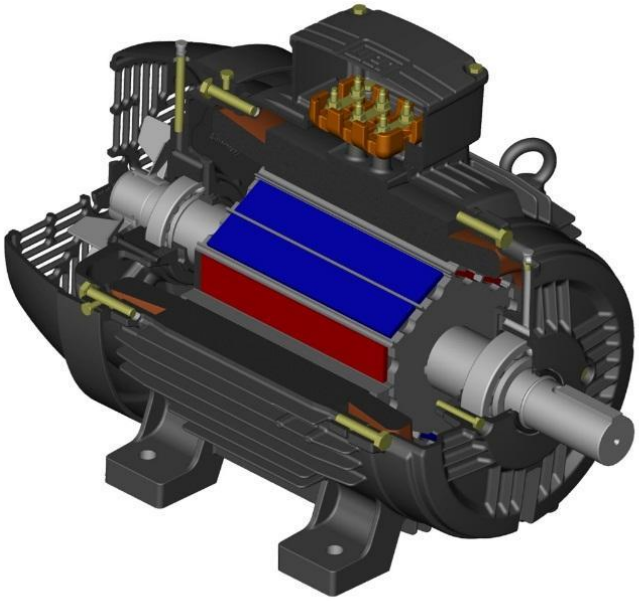


Figura 1.6. Macchina sincrona a magneti permanenti con magneti superficiali (con 2 magneti per polo)

Questa figura mostra una sezione assiale di una macchina a sei poli (p=3). I sei magneti sono montati su un “nucleo” di rotore cilindrico, o direttamente sull'albero (per piccoli motori), fatto di materiale ferromagnetico. Tipicamente, questo sarebbe semplicemente un albero d'acciaio. In alcune applicazioni, i magneti possono essere semplicemente incollati all'acciaio. Per le applicazioni in cui un giunto di colla non è soddisfacente (ad esempio per le macchine ad alta velocità), è necessaria una struttura di rotore provvista di bandeggio o di un anello di contenimento.

L'avvolgimento di statore di questa macchina è "convenzionale", molto simile a quello di un motore a induzione, costituito da fili collocati in cave poste sulla superficie del nucleo di statore. Il nucleo stesso è costituito da materiale ferromagnetico laminato (di solito lamine di ferro-silicio). Le caratteristiche e lo spessore di queste lamine sono determinati dalla frequenza operativa e da requisiti di efficienza. Esse sono tenute a convogliare campi magnetici alternati, quindi devono essere laminate per ridurre le perdite causate dalle correnti parassite. Questo tipo di macchina presenta una costruzione semplice. Si noti che la densità operativa del flusso magnetico nel traferro è quasi la stessa presente nei magneti, in modo che questo tipo di macchina non possa avere densità di flusso al traferro superiori al valore della rimanenza che caratterizza i magneti. Se si utilizzano magneti in ferrite a basso costo, questo significa ottenere un'induzione

relativamente bassa e di conseguenza un'efficienza ed una densità di potenza relativamente basse. Attenzione, tuttavia, che con i moderni materiali ad alte prestazioni utilizzati per la creazione dei magneti permanenti, in cui le densità di flusso residue possono essere dell'ordine di 1,2 T, le densità di flusso operative al traferro possono essere dell'ordine di 1 T. Data la struttura delle cave per trasportare la corrente di armatura, questo può essere, comunque, un limite pratico per la densità del flusso al traferro. È anche importante notare che i magneti in questa disposizione sono davvero collocati nel "traferro" della macchina, e sono quindi esposti a tutte le armoniche temporali - e spaziali- della forza magnetomotrice di statore (MMF). Poiché alcuni magneti permanenti presentano una conduttività elettrica (in particolare i magneti ad alte prestazioni), tutti i campi asincroni tenderanno a produrre correnti parassite e di conseguenza perdite nei magneti.

Figura 1.7. Macchina sincrona a magneti permanenti con magneti interni

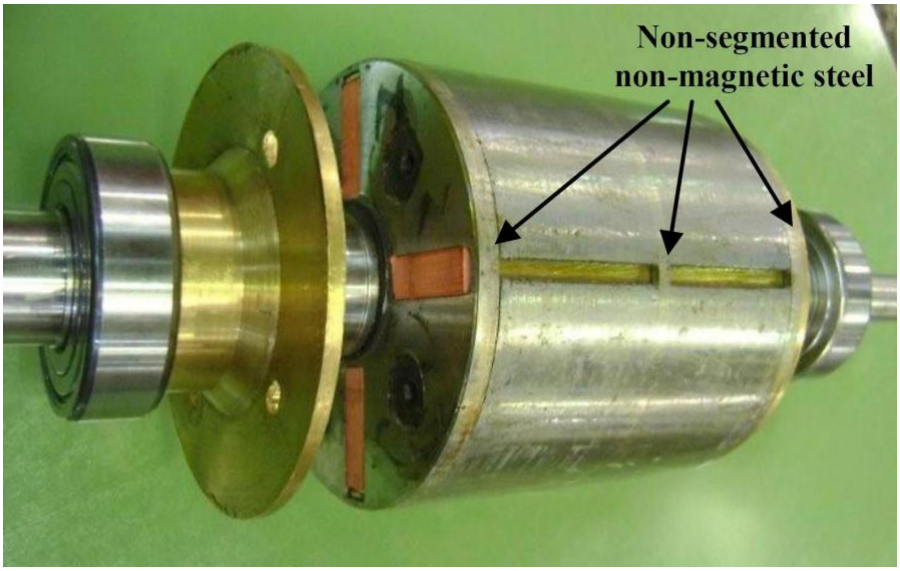



Figura 1.8. Macchina sincrona a magneti permanenti con magneti sepolti

Sono state sviluppate strutture con magneti interni e sepolti per contrastare diversi difetti, apparenti o reali, dei motori con magneti superficiali:

- Le strutture a concentrazione di flusso consentono alla densità di flusso al traferro di essere superiore alla densità di flusso nei magneti stessi.
- Nelle strutture a magneti interni, c'è un certo grado di schermatura dei magneti da campi armonici spaziali di alto ordine da parte dei blocchi polari.
- Ci sono vantaggi di controllo per alcune tipologie di motori a magneti interni.
- Alcune tipologie di strutture a magneti interni hanno (o si afferma che abbiano) vantaggi strutturali rispetto alle strutture dotate di magneti superficiali.

La geometria di un tipo di motore a magneti interni e quella di un tipo di motore a magneti sepolti viene mostrata in Fig. 1.7 ed in Fig. 1.8, rispettivamente. Viene visualizzata una macchina a quattro poli. Tipicamente, non ci si aspetta che le macchine a concentrazione di flusso abbiano un piccolo numero di poli, perché è difficile ottenere più area all'interno del rotore piuttosto che intorno alla periferia. D'altra parte, una macchina costruita in questo modo, ma senza una sostanziale concentrazione del flusso, sarà ancora caratterizzata da una certa salienza e dalle proprietà di schermatura dei magneti. A prima vista, queste macchine sembrano essere abbastanza complicate da analizzare, e quel giudizio sembra reggere.

Le parti principali di tutte le macchine sincrone a magneti permanenti sono:

- Il nucleo magnetico dello statore, provvisto di cave;
- L'avvolgimento elettrico di statore;
- Il nucleo magnetico del rotore;
- I magneti permanenti;
- L'albero del rotore;
- Il telaio dello statore con i cuscinetti;
- Il sistema di raffreddamento;
- L’alloggiamento.

Questa sezione contiene una breve introduzione al motore a riluttanza commutata (SRM) ed al suo principio di funzionamento. La chiave per la comprensione di qualsiasi macchina è il principio con il quale viene prodotta la coppia. Le implicazioni del funzionamento della macchina e le relative caratteristiche principali vengono dedotte dall'espressione della coppia. L'espressione della coppia richiede una relazione tra i flussi concatenati della macchina (o la sua induttanza) e la posizione del rotore. La caratteristica operativa che mette in relazione la coppia rispetto alla velocità della macchina viene derivata dalla caratteristica che mette in relazione l’induttanza della macchina rispetto alla posizione del rotore e, analogamente a quanto succede

per le altre macchine, viene formulato il circuito equivalente dinamico per SRM. Esistono varie configurazioni del motore a riluttanza commutata rotativo, comprese le macchine monofase. Le macchine monofase trovano applicazione in contesti in cui sono richieste basse performance ma vanno considerati volumi operativi elevati.
Dal 1969 è stato proposto un motore a riluttanza variabile per applicazioni a velocità variabile. Sebbene questa macchina sia un tipo di macchina sincrona, presenta alcune caratteristiche innovative. Ha le bobine di campo avvolte caratteristiche di un motore in corrente continua per i suoi avvolgimenti di statore e non ha bobine o magneti sul rotore. Sia lo statore che il rotore hanno poli salienti; quindi la macchina è indicata come una macchina doppiamente saliente. Una tipica macchina di questa tipologia è mostrata in Figura 1.9. Il rotore viene allineato ogni volta che due poli diametralmente opposti dello statore risultano eccitati. In un circuito magnetico, il rotore "preferisce" giungere alla posizione di riluttanza minima all'istanza di eccitazione. Mentre due poli di rotore sono allineati a due poli di statore, un altro gruppo di poli del rotore è fuori allineamento rispetto ad un diverso insieme di poli dello statore. Quindi, questo insieme di poli statorici viene eccitato per portare i poli del rotore in allineamento. Allo stesso modo, commutando in sequenza le correnti negli avvolgimenti dello statore, il rotore viene ruotato. Il movimento del rotore, e quindi la produzione di coppia e potenza, comporta la commutazione delle correnti negli avvolgimenti dello statore quando c'è una variazione di riluttanza; pertanto, questo azionamento del motore a velocità variabile viene indicato come un azionamento del motore a riluttanza commutata.

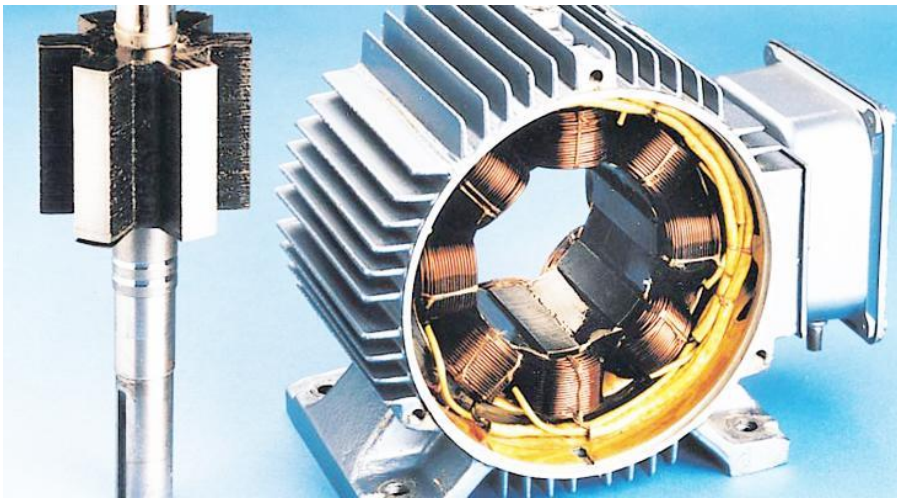


Figura 1.9. Macchina sincrona a riluttanza

Le parti principali di tutte le macchine sincrone a riluttanza sono:

- Il nucleo magnetico di statore a poli salienti;
- L'avvolgimento elettrico di statore;
- Il nucleo magnetico di rotore a poli salienti;
- L'albero del rotore;
- Il telaio dello statore con i cuscinetti;

- Il sistema di raffreddamento;
- L'alloggiamento.

Usualmente lo statore ed il rotore sono costituiti da un diverso numero di poli salienti. A titolo di esempio in Fig. 1.10 vengono presentate diverse combinazioni dei numeri di poli relativi allo statore ed al rotore.

a) 8/10 poli b) 16/12 poli c) 24/18 poli

Figura 1.10. Configurazioni del motore sincrono a

## 2.1.3. Macchine a Corrente Continua (DCM)

Da un punto di vista storico, la macchina DC è stata il primo dispositivo a venire sfruttato per la conversione elettromeccanica dell'energia ed ha annunciato l'alba dell'era elettrica. I famosi esperimenti effettuati su un disco di rame da Faraday hanno condotto ad ulteriori invenzioni che hanno contribuito all'evoluzione della macchina DC nella prima fonte di energia elettrica utilizzata per scopi di illuminazione.

La caratteristica più distintiva della macchina DC è la sua versatilità. La macchina è reversibile, quindi può funzionare sia come un generatore, che converte l'energia meccanica in energia elettrica sotto forma di corrente e tensione continua, sia come un motore, convertendo l'energia elettrica in utile lavoro meccanico. I generatori DC non sono ampiamente utilizzati attualmente perché la generazione, la trasmissione e la distribuzione di corrente alternata sono più vantaggiose dal punto di vista economico. I generatori DC possono essere utilizzati in situazioni in cui il consumo di energia elettrica avviene molto vicino al sito di generazione, e dove le tensioni di uscita devono assumere andamenti il più possibile uguali a quelli che risultano già pianificati. Quest'ultima area di applicazione può anche essere soddisfatta da dispositivi di raddrizzamento allo stato solido controllati.

Le caratteristiche operative dei motori DC offrono diversi vantaggi che li rendono attraenti per molte applicazioni industriali. Un'ampia varietà di caratteristiche velocità-coppia può essere ottenuta come risultato delle varie combinazioni delle connessioni ad eccitazione separata, ad eccitazione serie, shunt ed a campo composto degli avvolgimenti. Ampi intervalli di velocità ed un controllo preciso possono essere ottenuti facilmente utilizzando sistemi di macchine DC.

Una macchina DC è un dispositivo elettromeccanico rotante di conversione dell'energia che ha uno statore con poli salienti che sono eccitati da uno o più avvolgimenti di campo. L'avvolgimento di armatura in una macchina DC si trova sul rotore, con corrente che scorre, da o verso di esso, per mezzo di spazzole di carbonio a contatto con segmenti commutatori in rame. Uno spaccato di un motore DC a 2 poli viene mostrato nella Figura 1.11.

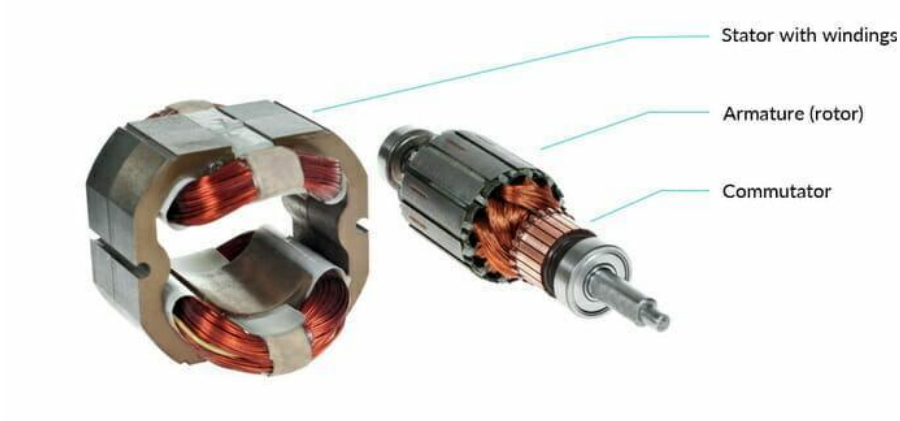



Figura 1.11. Motore DC a 2-poli con statore avvolto

Gli avvolgimenti di armatura sono costituiti da molti lati di bobina posizionati sul rotore con i conduttori paralleli all'albero. Gli avvolgimenti di campo sono alimentati con correnti continue, e di conseguenza il flusso al traferro è quasi costante sotto ciascuno dei poli salienti. In modalità di funzionamento da generatore, il rotore viene ruotato a velocità costante per indurre le tensioni nelle bobine di armatura.

Le tensioni indotte risultano alternate e devono essere raddrizzate per produrre corrente continua. Il raddrizzamento viene tradizionalmente effettuato utilizzando un commutatore, che è un cilindro montato sul rotore, costituito da segmenti di rame isolati l'uno dall'altro e dall'albero del rotore.

I segmenti del commutatore sono in contatto con spazzole di carbonio fisse. Il commutatore è essenzialmente un raddrizzatore meccanico a onda intera. Il campo magnetico generato dalla corrente nell'avvolgimento di campo è stazionario rispetto allo statore. Le correnti di armatura creano una distribuzione del flusso magnetico stazionaria il cui asse è ad angolo retto rispetto a quello del flusso di campo. L'interazione delle due distribuzioni di flusso crea la coppia nella macchina DC.

In alcune topologie più recenti l'avvolgimento di eccitazione sullo statore può essere sostituito con magneti permanenti e il motore diventa quindi un motore DC a magneti permanenti con commutatore. Una vista di questo motore è presentata nella Fig. 1.12.

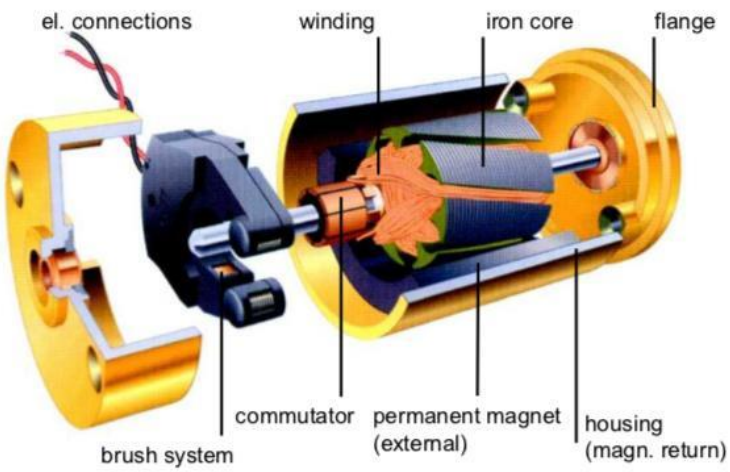



Figura 1.12. Motore DC a magneti permanenti con commutatore a 2-poli

Le parti principali di qualsiasi tipologia di motore DC sono:

- Il nucleo magnetico di statore a poli salienti con l'avvolgimento o il nucleo di statore con i magneti permanenti;
- Il nucleo magnetico del rotore, provvisto di cave;
- L'albero del rotore;
- Il telaio dello statore con i cuscinetti;
- Il sistema di raffreddamento;
- L'alloggiamento.

## 2.2. Assemblaggio Virtuale delle Macchine Elettriche

L'ambiente di lavoro per questo esercizio è un capannone industriale con scaffali e banco di assemblaggio. Una presentazione di questo ambiente è mostrata in Fig. 1.13. Una vista del banco di assemblaggio è mostrata nella Figura 1.14. Le parti per tutte e sei le macchine sono collocate sugli scaffali come presentato in Fig. 1.15, Fig. 1.16 e Fig.1.17.

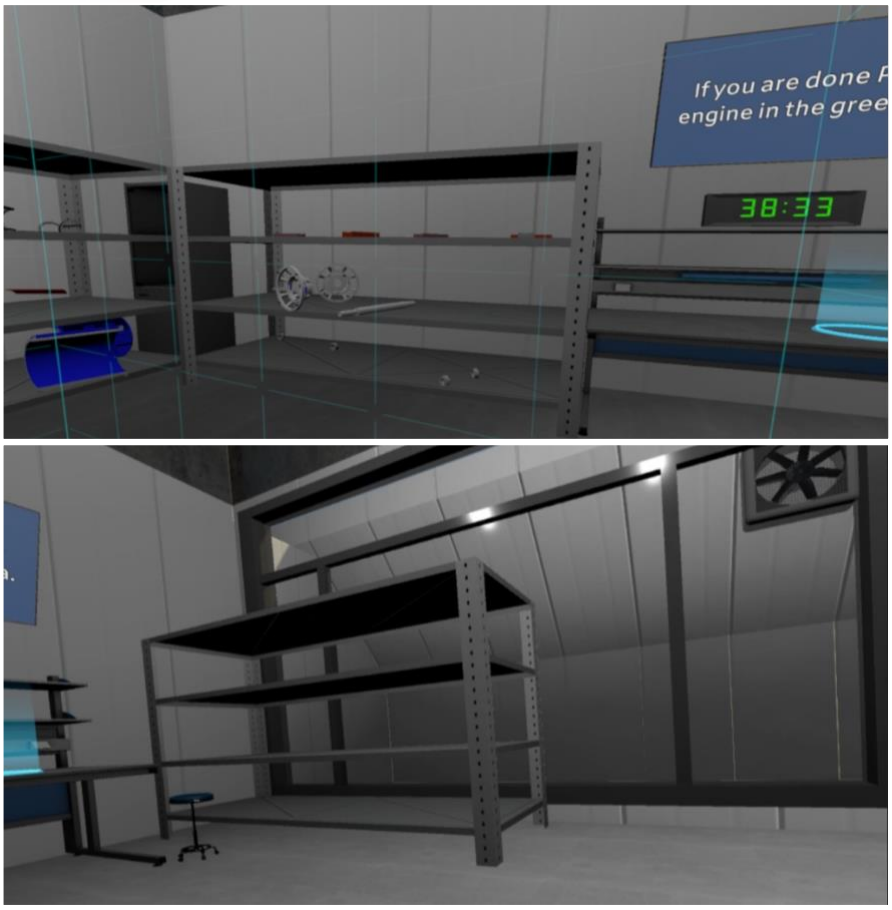



Figura 1.13. Presentazione dell'ambiente di lavoro per lo Scenario 1 – Costruzione di macchine elettriche

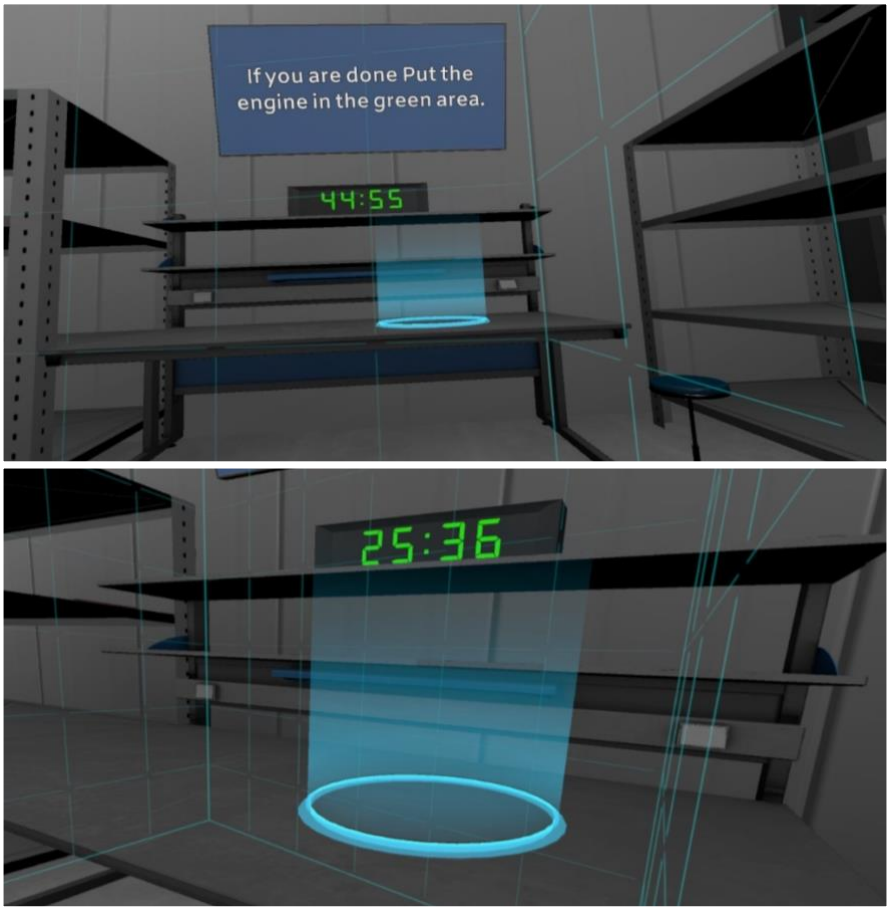



Figura 1.14. Presentazione del banco di assemblaggio per lo Scenario 1 – Costruzione di macchine elettriche

Figura 1.15. Presentazione degli scaffali con le parti della macchina elettrica per lo

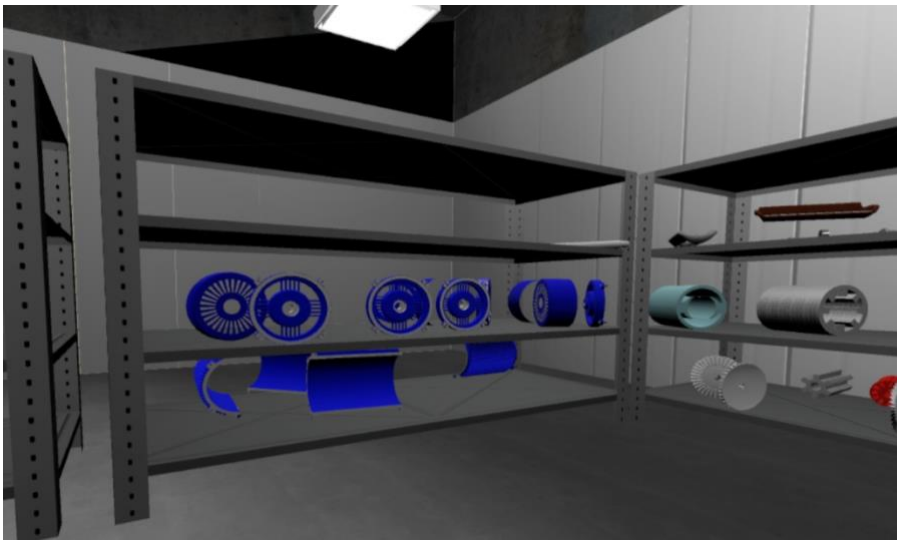


Figura 1.16. Presentazione degli scaffali con le parti della macchina elettrica per lo Scenario 1

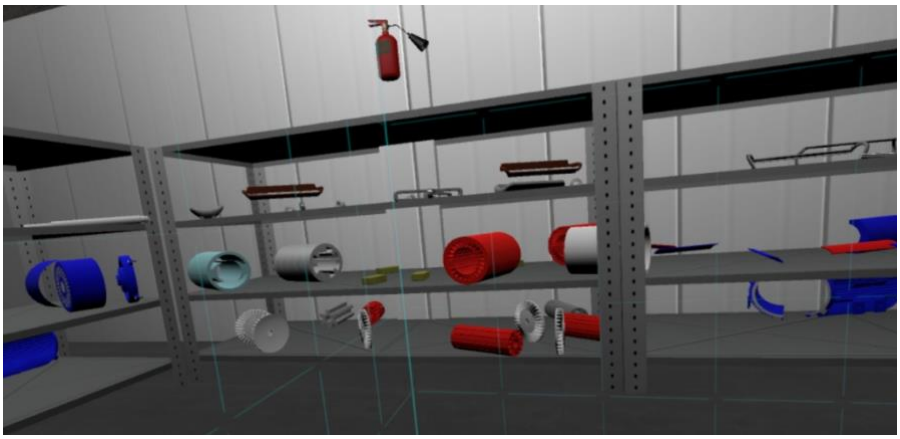


Figura 1.17. Presentazione degli scaffali con le parti della macchina elettrica per lo Scenario 1

Ogni studente avrà il compito di assemblare un certo tipo di macchina elettrica selezionata dall'elenco delle 6 macchine che sono state descritte in precedenza. Le parti, utilizzando le maniglie VR, devono essere prelevate dagli scaffali e posizionate sul banco di lavoro. Una vista delle maniglie nell'ambiente VR è mostrata in Fig. 1.18.

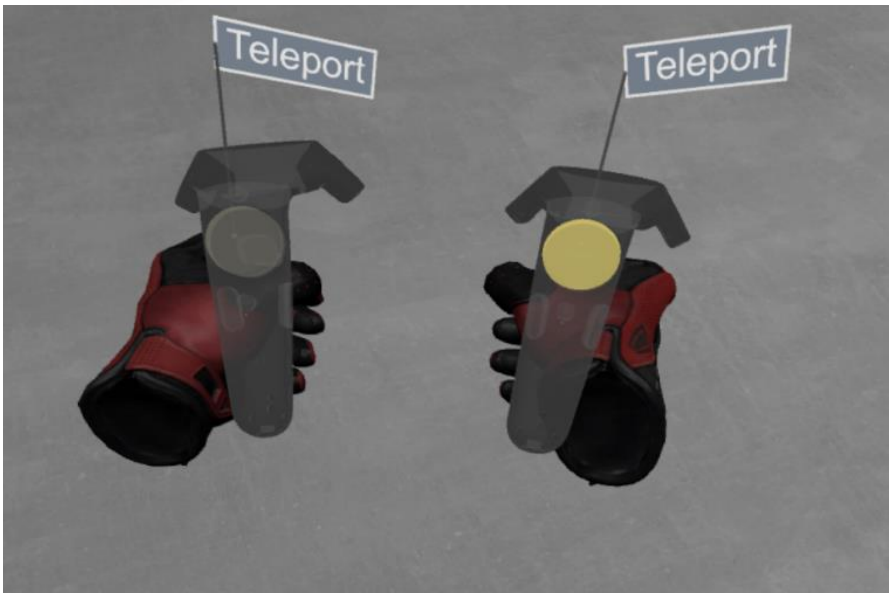
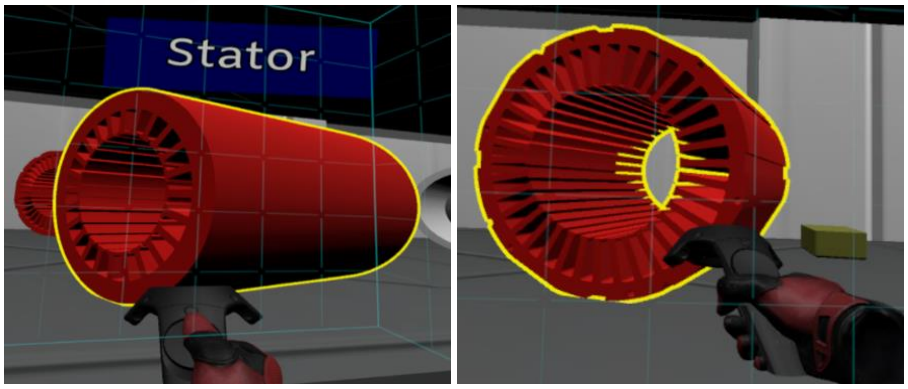



Figura 1.18. Presentazione delle due maniglie nell'ambiente VR viste con occhiali VR

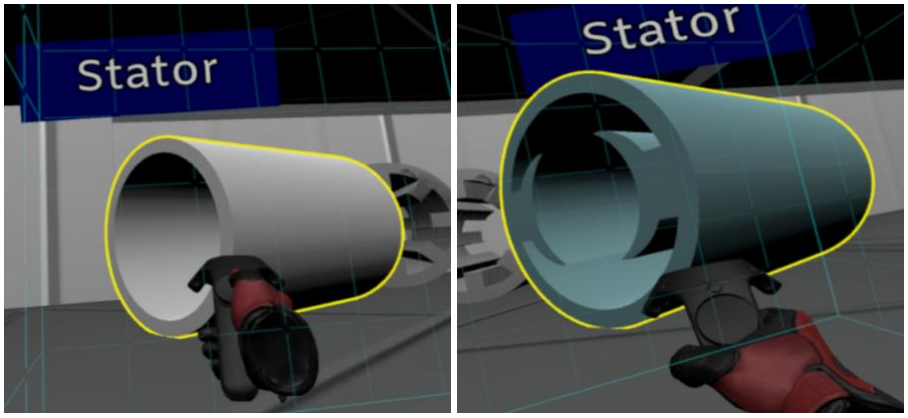
Con queste due maniglie l'utente può muoversi nell'area di lavoro, raccogliere le varie parti dagli scaffali e assemblare le macchine. Il grande pulsante rotondo nella parte superiore della maniglia (1) viene utilizzato per spostarsi nell'area di lavoro (teletrasporto). Il grilletto sul fondo della maniglia (7) viene utilizzato per raccogliere e posizionare sul posto di lavoro le parti del motore, come mostrato in Fig. A.1. Per prelevare la singola parte dagli scaffali è necessario spostare la maniglia molto vicino a quella parte che l'utente desidera selezionare. Una volta che la maniglia è abbastanza vicina la parte verrà contrassegnata con una linea di contorno gialla; in quella fase è necessario premere il grilletto e tenerlo in quella posizione fino a quando l'utente vorrà posizionarla sul tavolo di lavoro; una volta rilasciato il grilletto la parte verrà rilasciata e posizionata. La presentazione dei nuclei di statore selezionati è mostrata in Fig. 1.19, Fig. 1.20 e Fig. 1.21.

La presentazione dei nuclei, degli alberi e dei cuscinetti selezionati per il rotore è mostrata in Fig. 1.22, Fig. 1.23, Fig. 1.24 e Fig. 1.25 rispettivamente. Gli avvolgimenti dello statore e del rotore, le barre del rotore e gli anelli di corto circuito, cosi come il commutatore vengono mostrati in Fig. 1.26, Fig. 1.27 e Fig. 1.28 rispettivamente. La presentazione dei magneti permanenti selezionati per due tipi di motori viene effettuata in Fig. 1.29 e Fig. 1.30. La presentazione degli alloggiamenti superiore ed inferiore del motore e dei coperchi anteriore e posteriore dell'alloggiamento vengono mostrate in Fig. 1.31 e Fig. 1.32, rispettivamente. Come suggerimento per l'utente, quando la maniglia viene posta abbastanza vicino ad una parte del motore una spiegazione di essa viene visualizzata.




a) Motore a induzione b) Motore sincrono a magneti permanenti

Figura 1.19. Presentazione del nucleo in ferro dello statore selezionato




a) Motore DC a magneti permanenti b) Motore DC con commutatore a statore avvolto

Figura 1.20. Presentazione del nucleo in ferro dello statore selezionato

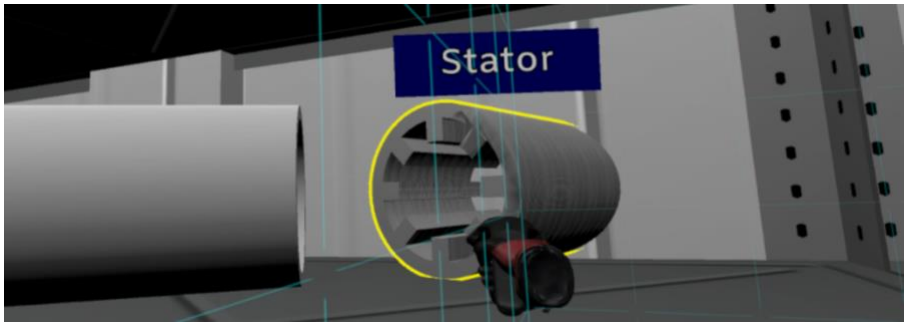
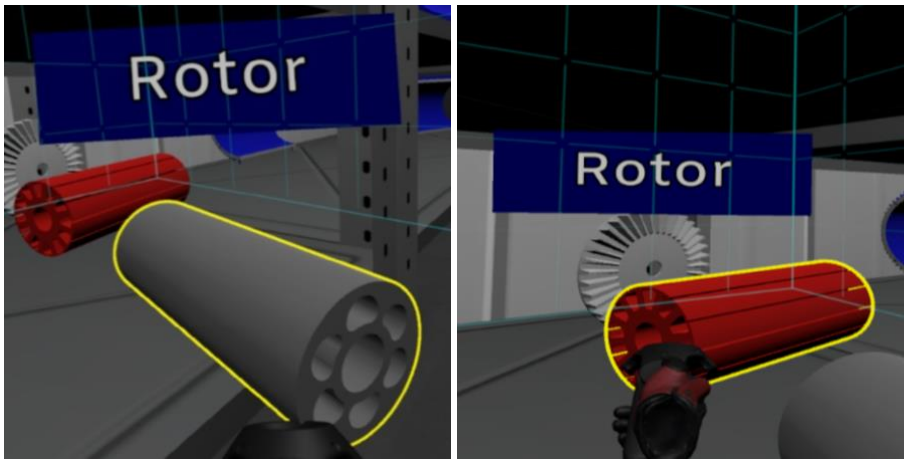
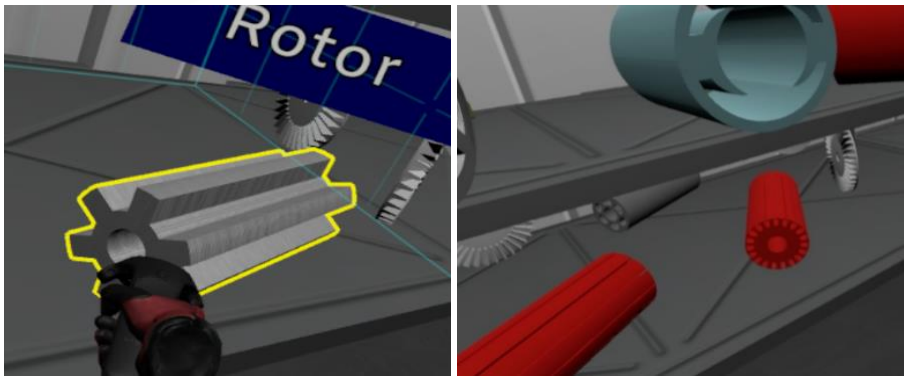



Figura 1.21. Presentazione del nucleo in ferro dello statore selezionato per il motore a riluttanza




a) Motore sincrono a magneti permanenti b) Motore DC con commutatore a statore avvolto

Figura 1.22. Presentazione del nucleo in ferro selezionato per il rotore




a) Motore a riluttanza b) Motore a induzione

Figura 1.23. Presentazione del nucleo in ferro selezionato per il rotore

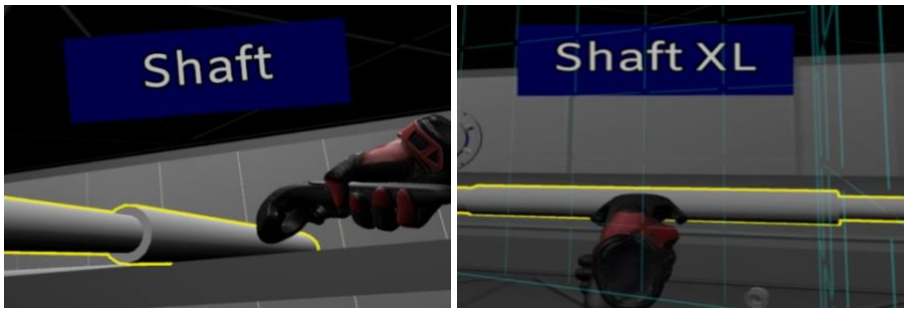



Figura 1.24. Presentazione degli alberi selezionati

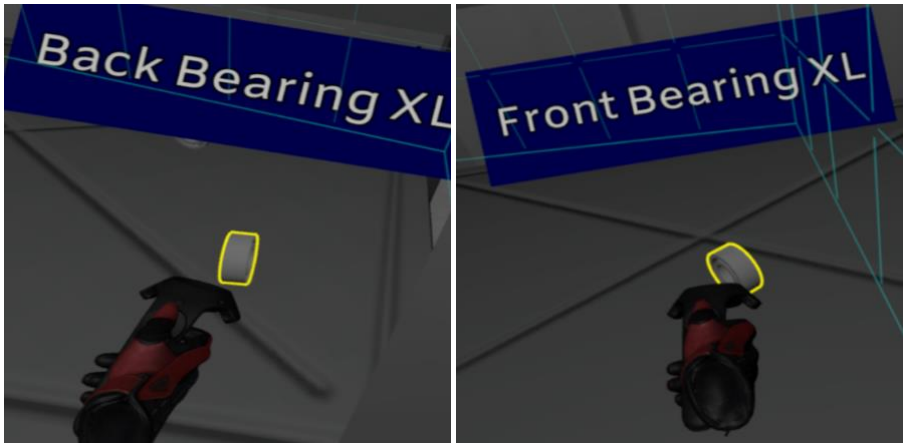



Figura 1.25. Presentazione dei cuscinetti selezionati

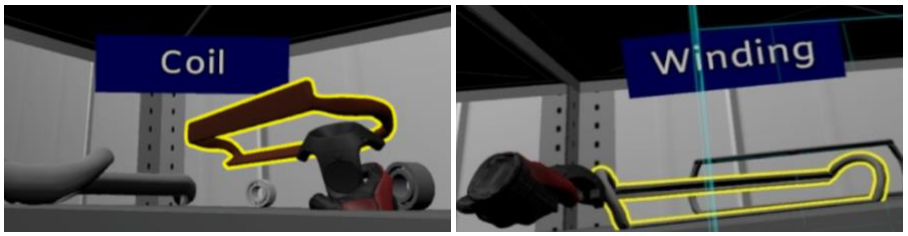



Figura 1.26. Presentazione delle bobine e degli avvolgimenti selezionati

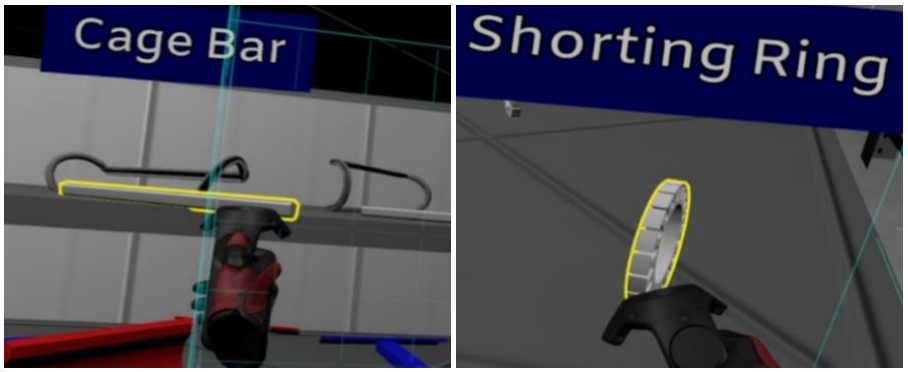



Figura 1.27. Presentazione delle barre conduttive e degli anelli di cortocircuito selezionati per il motore a induzione con gabbia di scoiattolo

Figura 1.28. Presentazione del commutatore selezionato per il motore DC con statore avvolto e per il motore PM DC con commutatore

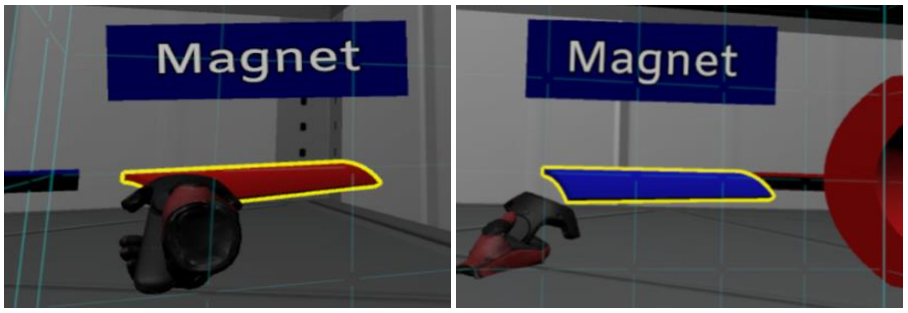



Figura 1.29. Presentazione dei magneti permanenti selezionati per il motore sincrono a magneti permanenti

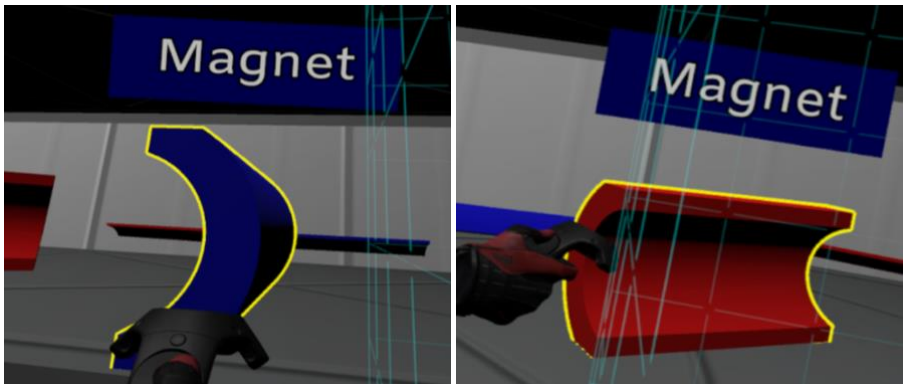



Figura 1.30. Presentazione dei magneti permanenti selezionati per il motore DC a magneti permanenti

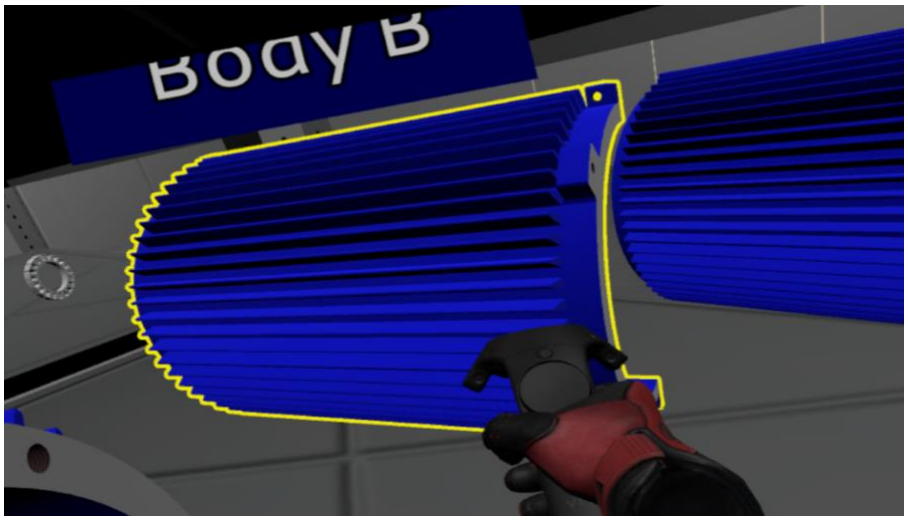


Figura 1.31. Presentazione degli alloggiamenti superiore ed inferiore selezionati per il motore

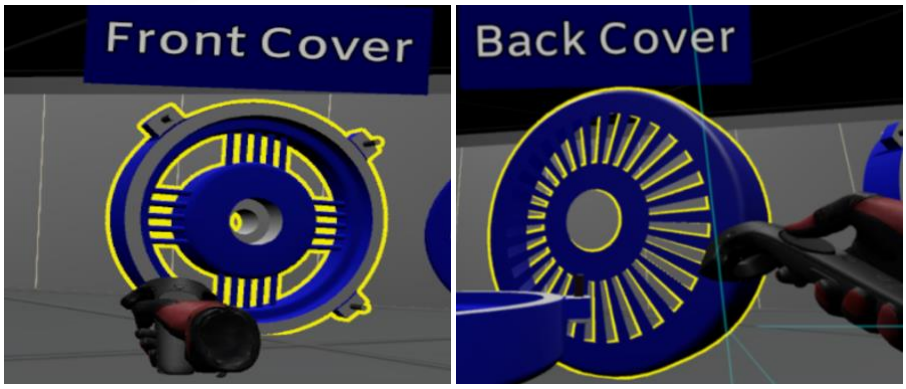



Figura 1.32. Presentazione dei coperchi anteriore e posteriore selezionati per l'alloggiamento del motore

Una volta che tutte le parti sono state collocate sul tavolo di lavoro l'utente può procedere alla costruzione della macchina elettrica. In primo luogo, l'utente dovrebbe costruire il rotore. Ciò significa che l'albero dovrebbe essere montato sul nucleo in ferro del rotore, così come i due cuscinetti. Questo può essere realizzato in modo tale che quando l'albero del rotore è vicino alla posizione corretta si attaccherà al nucleo in ferro del rotore. Se il rotore ha un avvolgimento allora esso dovrebbe essere montato e se il motore ha magneti permanenti allora i magneti dovrebbero essere montati. Inoltre, quando il motore ha un commutatore allora anche il commutatore dovrebbe essere montato. Successivamente l'utente dovrebbe procedere con la costruzione dello statore. L'avvolgimento dello statore dovrebbe essere collocato nelle cave di esso, o sui poli dello statore per il motore DC e per il motore a riluttanza. Se il motore ha solo i magneti permanenti sullo statore, allora solo i magneti permanenti dovrebbero essere posizionati sul nucleo dello statore (per il motore DC a magneti permanenti).

### 2.2.1. Motore Sincrono a Magneti Permanenti (PMSM)

Le parti per questo motore che devono essere assemblate sono:

| # | Parte | Numero di pezzi |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore con 36 cave | 1 |
| 2 | Avvolgimento dello statore | 1 |
| 3 | Nucleo in ferro del rotore | 1 |
| 4 | Albero motore | 1 |
| 5 | Magneti permanenti | 6 (3N & 3S) |
| 6 | Cuscinetti | 2 |
| 7 | Alloggiamento | 1 |

Tabella 1.1. Motore sincrono a magneti permanenti

La presentazione delle parti del motore è mostrata nella Tabella 1.2.

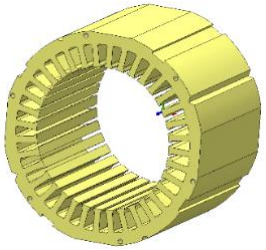
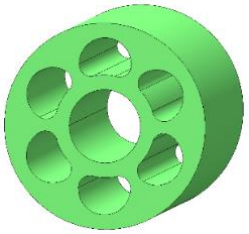
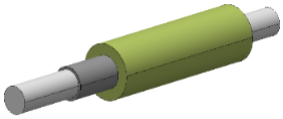
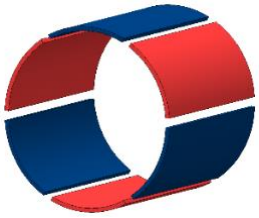
| # | Parte | Vista |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore con 36 cave |  |
| 2 | Nucleo in ferro del rotore |  |
| 3 | Albero motore |  |
| 4 | Magneti permanenti |  |

Tabella 1.2. Vista delle principali parti del motore

Tutte le parti necessarie sono collocate sugli scaffali della sala di assemblaggio VR. L'utente dovrebbe iniziare l'esercizio procurandosi le parti dallo scaffale per poi spostarle al tavolo di assemblaggio. In primo luogo, l'utente inserirà l'albero nel nucleo del rotore e quindi dovrà aggiungere i cuscinetti. Successivamente, i magneti permanenti verranno posizionati nella posizione corretta e nell'ordine corretto sul nucleo del rotore. Nella fase successiva, gli avvolgimenti dello statore dovrebbero essere collocati nelle cave del nucleo di statore. Il passo successivo consiste nel mettere l'intero rotore all'interno del nucleo di statore e successivamente aggiungere al motore assemblato le parti superiore ed inferiore dell'alloggiamento. Con quest'ultimo passaggio, la prima parte dell'esercizio è completata.

## 2.2.2. Motore a Induzione (IM)

Le parti per questo motore che devono essere assemblate sono:

| # | Parte | Numero di pezzi |
|---|---|---|
| **1** | Nucleo di statore con 24 cave | 1 |
| **2** | Avvolgimento dello statore | 1 |
| **3** | Nucleo in ferro del rotore con 19 cave | 1 |
| **4** | Barre del rotore | 19 |
| **5** | Anelli di cortocircuito del rotore | 2 |
| **6** | Albero motore | 1 |
| **7** | Cuscinetti | 2 |
| **8** | Alloggiamento | 2 |

Tabella 1.3. Motore a induzione

La presentazione delle parti del motore è mostrata nella Tabella 1.4.

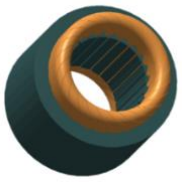
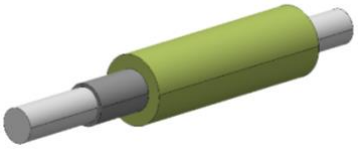
| # | Parte | Vista |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore con 24 cave e avvolgimento |  |
| 2 | Nucleo in ferro del rotore con 19 cave | |
| 3 | Albero motore |  |
| 4 | Barre di rotore e anelli di cortocircuito | |

Tabella 1.4. Vista delle principali parti del motore

Tutte le parti necessarie sono collocate sugli scaffali della sala di assemblaggio VR. L'utente dovrebbe iniziare l'esercizio procurandosi le parti dallo scaffale per poi spostarle al tavolo di assemblaggio. In primo luogo, l'utente inserirà l'albero nel nucleo del rotore e quindi dovrà aggiungere i cuscinetti. Successivamente, le 19 barre di rame del rotore vengono posizionate nelle 19 cave del rotore. Quindi, i due anelli di cortocircuito vengono collocati su ciascun lato del rotore andando a formare l'avvolgimento della gabbia di scoiattolo del rotore. Nella fase successiva, gli avvolgimenti dello statore dovrebbero

essere collocati nelle cave del nucleo di statore. Il passo successivo consiste nel mettere l'intero rotore all'interno del nucleo di statore e successivamente aggiungere al motore assemblato le parti superiore ed inferiore dell'alloggiamento. Con quest'ultimo passaggio, la prima parte dell'esercizio è completata.

### 2.2.3. Motore a riluttanza commutata (SRM)

Le parti per questo motore che devono essere assemblate sono:

| # | Parte | Numero di pezzi |
|---|---|---|
| **1** | Nucleo di statore con 8 poli e avvolgimento | 1 |
| **2** | Nucleo in ferro del rotore con 6 poli | 1 |
| **3** | Albero motore | 1 |
| **4** | Cuscinetti | 2 |
| **5** | Alloggiamento | 2 |

Tabella 1.5. Motore a riluttanza commutata

La presentazione delle parti del motore è mostrata nella Tabella 1.6.

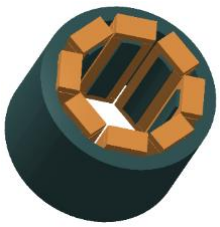
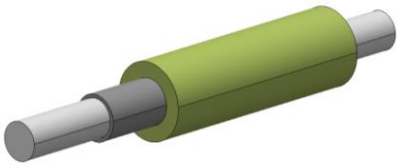
| # | Parte | Vista |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore con 8 poli e avvolgimento |  |
| 2 | Nucleo in ferro del rotore con 6 poli | |
| 3 | Albero motore |  |

Tabella 1.6. Vista delle principali parti del motore

Tutte le parti necessarie sono collocate sugli scaffali della sala di assemblaggio VR. L'utente dovrebbe iniziare l'esercizio procurandosi le parti dallo scaffale per poi spostarle al tavolo di assemblaggio. In primo luogo, l'utente inserirà l'albero nel nucleo del rotore con 6 poli e quindi dovrà aggiungere i cuscinetti. Nella fase successiva, gli avvolgimenti dello statore dovrebbero essere posizionati sugli 8 poli del nucleo di statore. Il passo successivo consiste nel mettere l'intero rotore all'interno del nucleo di statore e successivamente aggiungere al motore assemblato le parti superiore ed inferiore

dell'alloggiamento. Con quest'ultimo passaggio, la prima parte dell'esercizio è completata.

### 2.2.4. Motore DC con Commutatore a Statore Avvolto (WSDCCM)

Le parti per questo motore che devono essere assemblate sono:

| # | Parte | Numero di pezzi |
|---|---|---|
| **1** | Nucleo di statore con due poli | 1 |
| **2** | Bobine di statore | 2 |
| **3** | Nucleo in ferro del rotore con 12 cave e | 1 |
| **4** | Albero motore (taglia XL) | 1 |
| **5** | Commutatore | 1 |
| **6** | Cuscinetti (taglia XL) | 2 |
| **7** | Alloggiamento | 2 |

Tabella 1.7. Motore DC con commutatore a statore avvolto

La presentazione delle parti del motore è mostrata nella Tabella 1.8.

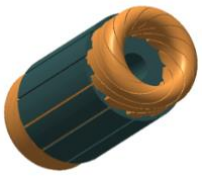
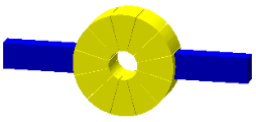
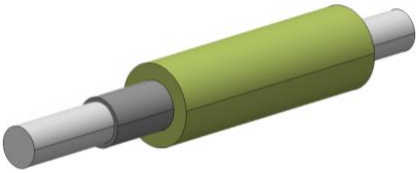
| # | Parte | Vista |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore con 2 poli e avvolgimento | |
| 2 | Nucleo in ferro del rotore con 12 cave e avvolgimento |  |
| 3 | Commutatore e spazzole |  |
| 4 | Albero motore (taglia XL) |  |

Tabella 1.8. Vista delle principali parti del motore

Tutte le parti necessarie sono collocate sugli scaffali della sala di assemblaggio VR. L'utente dovrebbe iniziare l'esercizio procurandosi le parti dallo scaffale per poi spostarle al tavolo di assemblaggio. In primo luogo, l'utente inserirà l'albero nel nucleo del rotore con 12 cave e quindi dovrà aggiungere l'avvolgimento, il commutatore ed i cuscinetti. Nella fase successiva, gli avvolgimenti dello statore dovrebbero essere posizionati sui 2 poli del nucleo di statore. Il passo

successivo consiste nel mettere l'intero rotore all'interno del nucleo di statore e successivamente aggiungere al motore assemblato le parti superiore ed inferiore dell'alloggiamento. Con quest'ultimo passaggio, la prima parte dell'esercizio è completata.

## 2.2.5. Motore DC a Magneti Permanenti (PMDC)

Le parti per questo motore che devono essere assemblate sono:

| # | Parte | Numero di pezzi |
|---|---|---|
| **1** | Nucleo di statore | 1 |
| **2** | Magneti permanenti di statore (1-N e 1-S) | 2 |
| **3** | Nucleo in ferro del rotore con 12 cave | 1 |
| **4** | Avvolgimento di armatura | 1 |
| **5** | Albero motore (taglia XL) | 1 |
| **6** | Commutatore | 1 |
| **7** | Cuscinetti (taglia XL) | 2 |
| **8** | Alloggiamento | 2 |

Tabella 1.9. Motore DC a magneti permanenti

La presentazione delle parti del motore è mostrata nella Tabella 1.10.

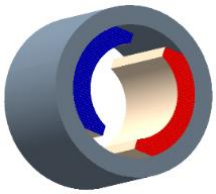
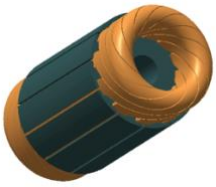
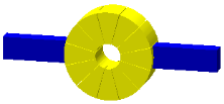
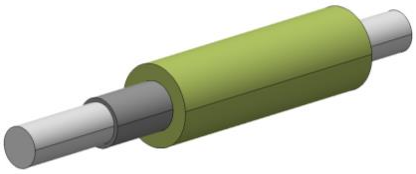
| # | Parte | Vista |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore con 2 magneti permanenti |  |
| 2 | Nucleo in ferro del rotore con 12 cave, avvolgimento di armatura |  |
| 3 | Commutatore e spazzole |  |
| 4 | Albero motore |  |

Tabella 1.10. Vista delle principali parti del motore

Tutte le parti necessarie sono collocate sugli scaffali della sala di assemblaggio VR. L'utente dovrebbe iniziare l'esercizio procurandosi le parti dallo scaffale per poi spostarle al tavolo di assemblaggio. In primo luogo, l'utente inserirà l'albero nel nucleo del rotore con 12 cave e quindi dovrà aggiungere l'avvolgimento, il commutatore e i cuscinetti. Nella fase successiva, i due magneti permanenti con

polarità N e S dovrebbero essere posizionati sul nucleo di statore. Il passo successivo consiste nel mettere l'intero rotore all'interno del nucleo di statore e successivamente aggiungere al motore assemblato le parti superiore ed inferiore dell'alloggiamento. Con quest'ultimo passaggio, la prima parte dell'esercizio è completata.

## 2.2.6. Permanent Magnet Generator (PMG)

Le parti per questo generatore che devono essere assemblate sono:

| # | Parte | Numero di pezii |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore | 1 |
| 2 | Avvolgimento dello statore | 1 |
| 3 | Magneti permanenti del rotore (2-N e 2-S) | 4 |
| 4 | Nucleo in ferro del rotore | 1 |
| 5 | Albero motore | 1 |
| 6 | Cuscinetti | 2 |
| 7 | Alloggiamento | 1 |

Tabella 1.11. Generatore a magneti permanenti

La presentazione delle parti del motore è mostrata nella Tabella 1.12.

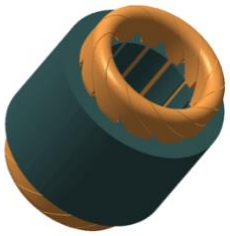
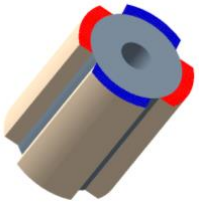
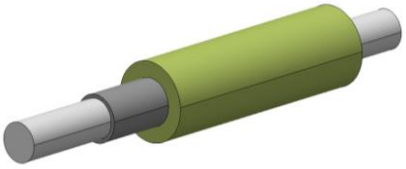
| # | Parte | Vista |
|---|---|---|
| 1 | Nucleo di statore con 12 cave e avvolgimento |  |
| **2** | Nucleo in ferro del rotore con 4 magneti permanenti (2-N e 2-S) |  |
| **3** | Albero motore |  |

Tabella 1.12. Vista delle principali parti del generatore

Tutte le parti necessarie sono collocate sugli scaffali della sala di assemblaggio VR. L'utente dovrebbe iniziare l'esercizio procurandosi le parti dallo scaffale per poi spostarle al tavolo di assemblaggio. In primo luogo, l'utente inserirà l'albero nel nucleo del rotore, quindi dovrebbe aggiungere i 4 magneti permanenti nella sequenza N-S-N-S e i cuscinetti. Nella fase successiva, l'avvolgimento dello statore dovrebbe essere collocato nelle cave del nucleo di statore. Il passo successivo consiste nel mettere l'intero rotore all'interno del nucleo di

statore e successivamente aggiungere al motore assemblato le parti superiore ed inferiore dell'alloggiamento. Con quest'ultimo passaggio, la prima parte dell'esercizio è completata.

**Nota:**
**Una volta che il motore è stato assemblato dovrebbe essere posizionato nell'area contrassegnata sul tavolo. Se il motore risulta assemblato correttamente l'esercizio procederà automaticamente al livello successivo che è Principi di Funzionamento delle Macchine Elettriche. Se il motore non risulta assemblato correttamente l'utente avrà altre due possibilità per costruire il motore assegnato.**

## 2.3. Principi di Funzionamento delle Macchine Elettriche

In questa parte dell'esercizio viene analizzato un motore sincrono a magneti permanenti. Il motore è preassemblato e posto sul banco di prova (come si vede in Fig. 1.34), insieme alle altre attrezzature utilizzate per l'analisi di laboratorio. Le grandezze nominali del Motore Sincrono a Magneti Permanenti sotto analisi sono: Un=50 V=const., nn=1000 min-1, In=11.38 A.
Il test deve essere realizzato secondo le fasi indicate di seguito:

**Fase 1** – Il motore deve essere collegato all'alimentazione. Dopo di che il motore è pronto per essere testato, come mostrato in Fig. 1.35.

**Fase 2** – Accendere l'interruttore dell'alimentazione.

**Fase 3** – Utilizzando la manopola di controllo dell'angolo di carico, iniziare ad azionare il motore con un tasso di variazione per l'angolo di carico fissato (ad esempio con un tasso di incremento di 5° o 10°). Dopo aver regolato ogni valore premere il pulsante Registra dati. I dati registrati dovrebbero venire visualizzati sul grafico come un nuovo punto oppure potrebbero essere visualizzati come una linea che collega i punti misurati precedentemente. Continuare le misurazioni fino al momento in cui il motore smette di funzionare, in presenza di un angolo di carico pari a 90°; l'interruttore ON/OFF dovrebbe passare automaticamente alla posizione OFF.

**Fase 4** – Una volta che il motore si ferma una domanda selezionata casualmente dovrebbe apparire, con una risposta a scelta multipla. L'utente deve selezionare una risposta per ottenere punti.

Dopo aver completato le due parti dello scenario agli studenti verrà assegnato un certo numero di punti in base all'efficacia con cui hanno svolto le due parti dell'esercizio ed in base alla risposta sulla domanda

data casualmente alla fine dello scenario. Se lo studente ha assemblato correttamente il motore proposto al suo primo tentativo, gli verrà dato il 100% dei punti per questa fase, al suo secondo tentativo riceverà il 75% dei punti e al suo terzo tentativo riceverà il 50% dei punti. Se lo studente fallisce in tutti e tre i tentativi riceverà zero punti e fallirà l'esercizio. Per la seconda parte dell'esercizio e per la domanda fornita casualmente lo studente avrà un solo tentativo. Se lo studente collega il motore correttamente ed esegue l'analisi in modo corretto riceverà il numero totale di punti prefissato. Lo stesso vale per la domanda fornita casualmente. Per una connessione sbagliata ed una risposta sbagliata lo studente riceverà zero punti.

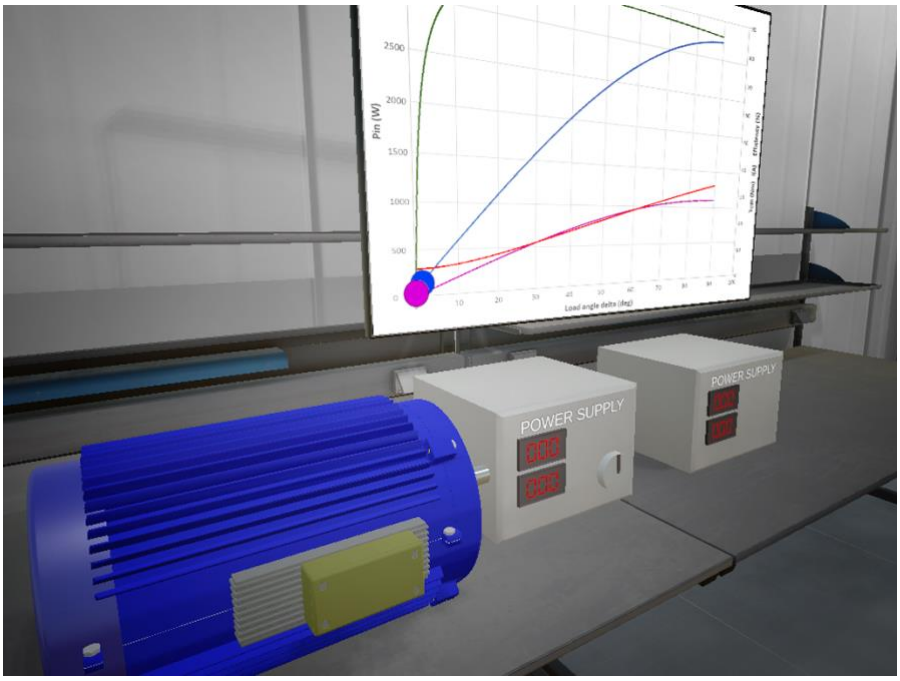


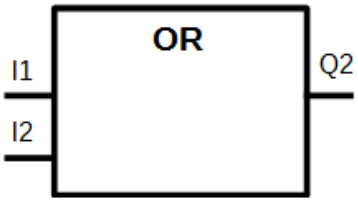

Figura 1.33. Vista del motore analizzato collegato alla strumentazione di analisi

# 3. Scenario 2 -Construction and Operating Principles of Electric Motors

## 3.1 Linguaggio FBD (diagramma a blocchi funzionali)

L'FBD (Diagramma a Blocchi Funzionali) è un linguaggio grafico. L'esecuzione del programma si basa su un flusso del segnale simile a quello presente tra gli elementi del sistema di elaborazione del segnale. Il flusso del segnale scorre dall'uscita (lato destro) della funzione o del blocco funzionale verso l'ingresso collegato (lato sinistro) della funzione successiva o del blocco funzionale successivo [1].

I simboli grafici che rappresentano i singoli elementi del diagramma di connessione a blocchi sono rettangoli ed elementi di controllo collegati da linee orizzontali e verticali [1]. Un esempio di un blocco di linguaggio FBD è illustrato nella Figura 3.1.




**Circuito -** un insieme di blocchi (elementi del linguaggio) interconnessi da una linea [1].
Esecuzione delle regole del programma [1]:

1. Il valore di qualsiasi elemento del circuito non è determinato se il valore di tutti i suoi ingressi non è determinato.
2. La determinazione del valore di un elemento del circuito non viene completata se il valore di tutte le sue uscite non è stato determinato.
3. L'esecuzione del programma per l'intero circuito non viene completata se il valore delle uscite per tutti i suoi elementi non è stato determinato.

4. Come parte dell'unità organizzativa software, l'esecuzione del programma per il circuito deve essere completata prima dell'inizio del circuito successivo, in cui vengono utilizzate le uscite del circuito precedente.

Regole di creazione del circuito [1]:

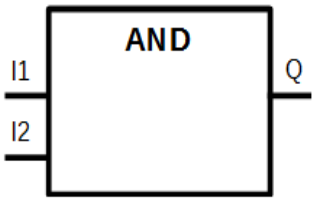
1. Le uscite dei blocchi funzionali non devono essere collegate tra loro.
2. Se le linee che collegano diversi elementi del circuito si intersecano, utilizzare i simboli di intersezione senza connessioni.
3. La struttura del programma deve essere lineare, con il minor numero possibile di linee intersecanti, in modo che sia il più leggibile possibile.
4. Il feedback può verificarsi nei circuiti quando l'uscita di una funzione o di un blocco funzionale è posta in ingresso ad un'altra funzione o ad un altro blocco funzionale nel circuito.
5. L'ordine di esecuzione dei circuiti può essere modificato mediante le istruzioni di salto

## 3.2 Blocchi di base del linguaggio FBD

Possono essere distinti i seguenti blocchi di base per il linguaggio FBD:

- **Funzione logica AND** – per fare in modo che l'uscita assuma lo stato 1, tutti gli ingressi devono assumere lo stato 1 [2];
- **Funzione logica OR** – per fare in modo che l'uscita assuma lo stato 1, qualunque ingresso deve assumere lo stato 1 [2];
- **Funzione logica XOR** – per fare in modo che l'uscita assuma lo stato 1, un numero dispari di ingressi deve assumere lo stato 1 [2];
- **Blocchi Output** - vengono utilizzati per specificare un bit di output; sono l'equivalente delle bobine LD. Ci sono 2 blocchi di uscita (per i controllori Siemens S7-1200) [2]:
    - blocco di controllo dell'uscita,
    - blocco di negazione dell'uscita.
- Blocchi di impostazione e reimpostazione dei bit:
    - **blocco impostazione** (set, S) – quando viene attivato, il valore della variabile all'indirizzo OUT è impostato su 1, mentre quando non è attivato questo valore rimane invariato;
    - **blocco reimpostazione** (reset, R) – quando viene attivato, il valore della variabile all'indirizzo OUT è impostato su 0, mentre quando non è attivato questo valore rimane invariato.

Le funzioni logiche hanno almeno due ingressi ed un'uscita. Per presentare i principi di funzionamento delle singole funzioni logiche, è possibile utilizzare la tabella della verità, che mostra gli stati di output in funzione degli stati di input. Gli input e gli output secondo la logica bit possono avere due stati: basso - contrassegnato come valore logico 0 (zero) e alto - contrassegnato come valore logico 1 (uno).
Nel linguaggio grafico FBD, che viene utilizzato per programmare i controllori PLC, le singole funzioni hanno i propri simboli grafici.
I simboli grafici delle funzioni logiche di base con le relative tabelle della verità vengono mostrati in Fig. 3.2, 3.3 e 3.4.

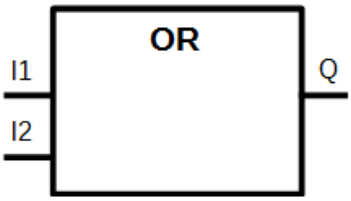



a)

| I1 | I2 | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

b)

Figure 3.2. Funzione AND:
a) simbolo FBD,
b) tabella della verità

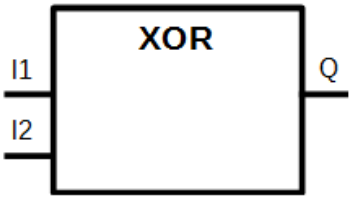



a)

| I1 | I2 | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

b)

Figure 3.3. Funzione OR:
a) simbolo FBD,
b) tabella della verità



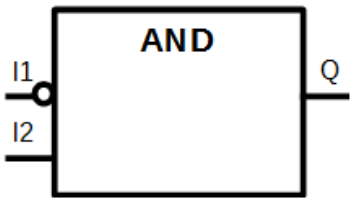

a)

| I1 | I2 | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

b)

Figure 3.4. Funzione XOR:
a) simbolo FBD,
b) tabella della verità

Le unità di ingresso o di uscita possono richiedere una negazione. Un ingresso o un'uscita negati invertono il segnale al contrario, cioè cambiano valore logico "1" in valore logico "0" e viceversa. Un esempio dell'ingresso negato è mostrato in Fig. 5, quello dell'uscita negata è mostrato in Fig. 3.6.

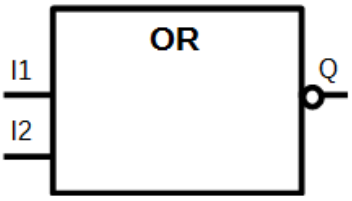



a)

| I1 | I2 | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

b)

Figure 3.5.




a)

| I1 | I2 | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

b)

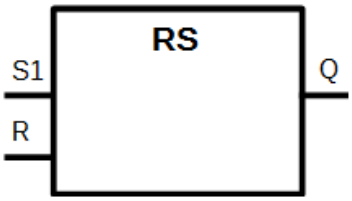
Figure 3.6.

## 3.3 Blocchi funzionali standard

I Bit latches sono elementi che consentono l'impostazione condizionata o l'eliminazione di un dato bit appartenente ad uno spazio di memoria. L'istruzione di blocco contiene due ingressi di controllo S ed R ed un'uscita. L'ordine di questi ingressi determina la priorità dell'ingresso e definisce quindi il tipo di bit latch [3]. Si possono riconoscere due stati per i bit latches [2]:

- RS – è un latch in cui domina il set. Se i segnali set (S1) e reset (R) sono entrambi 1, l'indirizzo di uscita OUT sarà impostato su 1.
- SR – è un latch in cui domina il reset. Se i segnali set (S) e reset (R1) sono entrambi 1, l'indirizzo di uscita OUT sarà impostato su 0.

I simboli grafici dei bit latches RS e SR, insieme con le tabelle della verità, vengono mostrati in Fig. 3.7 e 3.8.

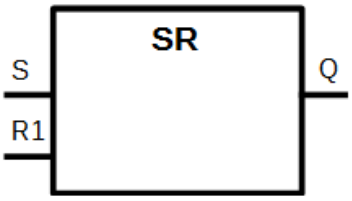



a)

| S1 | R | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | previous* state |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

b)

Figure 3.7. RS bit latch:
a) simbolo FBD [1],
b) tabella della verità [2]




a)

| S | R1 | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | previous* state |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

b)

Figure 3.8. SR bit latch:
a) simbolo FBD [1],
b) tabella della verità [2]

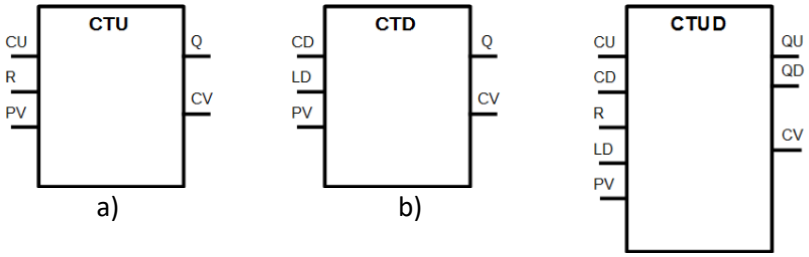
Il termine "stato precedente" significa che l'istruzione non viene eseguita se lo stato del segnale ai due ingressi S e R1 è 0. Lo stato del segnale dell'operando quindi rimane invariato.

**I contatori** vengono utilizzati per contare gli eventi interni al programma e gli eventi del processo interno, come per esempio il conteggio delle pressioni dei pulsanti o il conteggio delle operazioni del sensore di prossimità [2].

Esistono tre tipi di contatori di base [2]:

- CTU – contatore up.
- CTD – contatore down.
- CTUD – contatore up-down.

I simboli dei vari contatori sono mostrati in Fig. 3.9.




a) b) c)

Figure 3.9. Contatori:
a) up,
b) down,
c) up-down [1] [2]

**Contatore up CTU** (Fig. 3.9a):

- CU – conteggio dell'aumento delle pendenze dei segnali di ingresso,
- CV – valore attuale,
- R – reset,
- PV – valore preimpostato,
- Q – uscita Q; all'ingresso Q appare il valore logico 1, quando CV = PV.

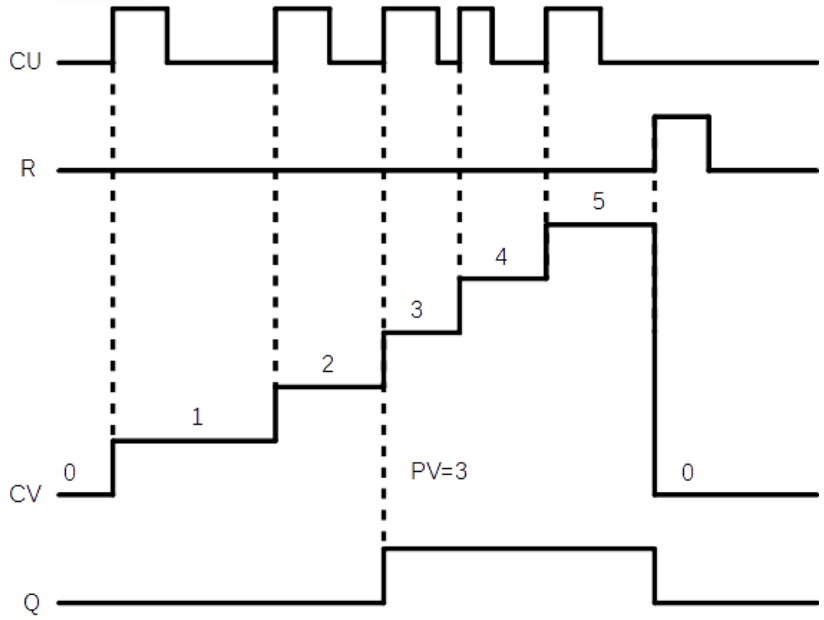



Figure 3.10. Segnali temporali del contatore up [2]

Il principio di funzionamento del contatore up può essere rappresentato attraverso segnali temporali. Queste forme d'onda sono mostrate in Fig. 3.10.

**Contatore down CTD** (Fig. 9b):

- CD – conteggio dell'aumento delle pendenze dei segnali di ingresso,
- CV – valore corrente, a) b) c) Fig. 5: Contatori: addizione (a), sottrazione (b), addizione-sottrazione (c)
- LD – carico,
- PV – valore preimpostato,
- Q – uscita Q; all'ingresso Q appare il valore logico 1, quando CV = 0.

Il principio di funzionamento del contatore down può essere rappresentato attraverso segnali temporali. Queste forme d'onda sono mostrate in Fig. 3.11.

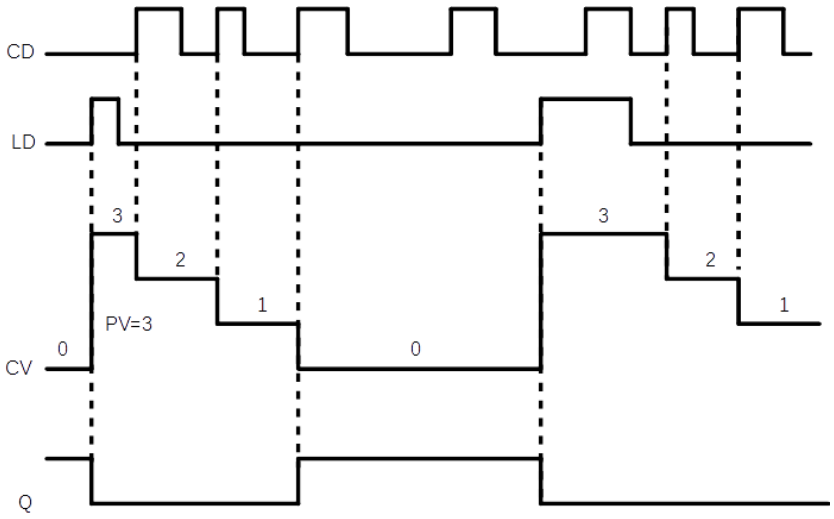



Figure 3.11. Segnali temporali del contatore down [2]

**Il Contatore up-down CTUD** (Fig. 3.9c) è una combinazione dei contatori CTU e CTD. Pertanto, ha 2 ingressi di conteggio, 2 uscite, ed inoltre 1 ingresso di reimpostazione ed un ingresso di ricarica.
Il principio di funzionamento del contatore up-down può essere rappresentato attraverso segnali temporali. Queste forme d'onda sono mostrate in Fig. 3.12.

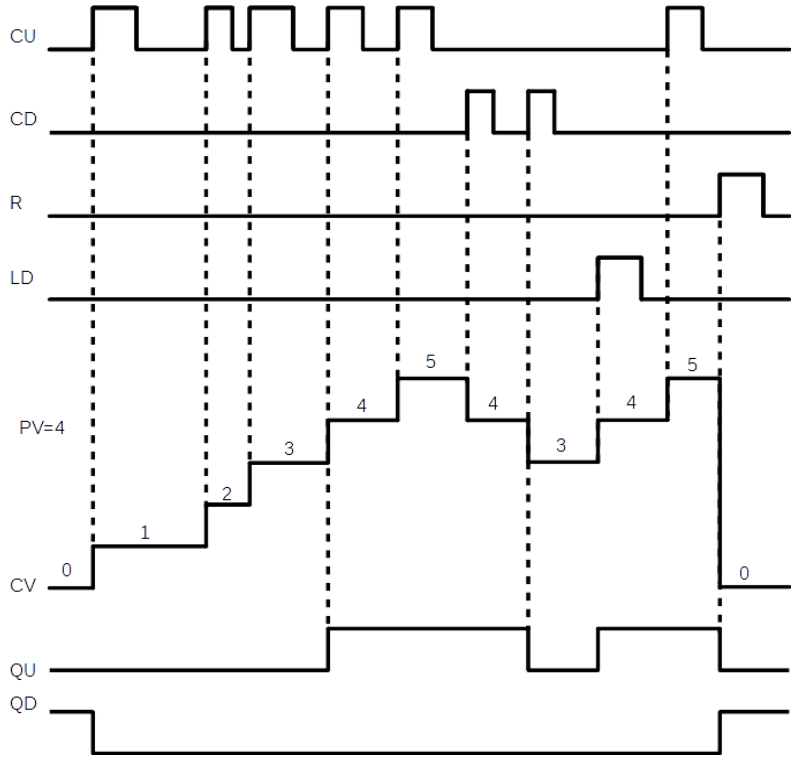
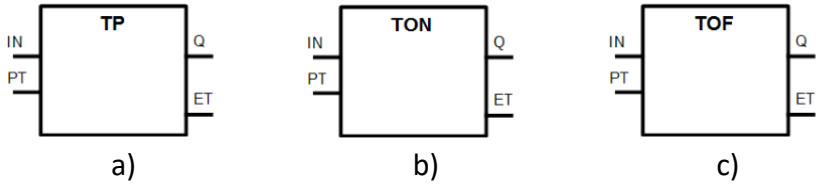



Figure 3.12. Segnali temporali del contatore up-down [2]

**I timers** sono blocchi funzionali utilizzati per la temporizzazione oppure per effettuare accensioni o spegnimenti tenendo conto delle condizioni temporali (ad esempio con ritardo) [1].
Esistono tre tipi di timer di base [1]:

- TP – impulso,
- TON – accensione con ritardo,
- TOF – spegnimento con ritardo.

I simboli dei vari timers sono presentati in Fig. 3.13.




a) b) c)

Figure 3.13. Timers:
a) TP,
b) TON,
c) TOF [1]

**Timer TP** (Fig. 3.13a):

- IN – ingresso per l'innesco del timer,
- PT – tempo preimpostato,
- ET – tempo trascorso,
- Q – uscita.

Il principio di funzionamento del timer TP può essere rappresentato attraverso segnali temporali. Queste forme d'onda sono mostrate in Fig. 3.14.

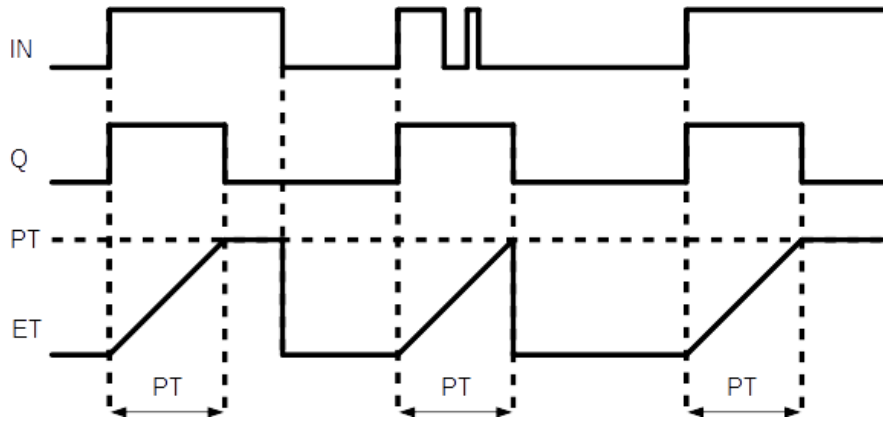



Figure 3.14. Segnali temporali del timer TP

Timer TON (Fig. 3.13b):

- IN – ingresso per l'innesco del timer,
- PT – tempo preimpostato,
- ET – tempo trascorso,
- Q – uscita.

Il principio di funzionamento del timer TON può essere rappresentato attraverso segnali temporali. Queste forme d'onda sono mostrate in Fig. 3.15.

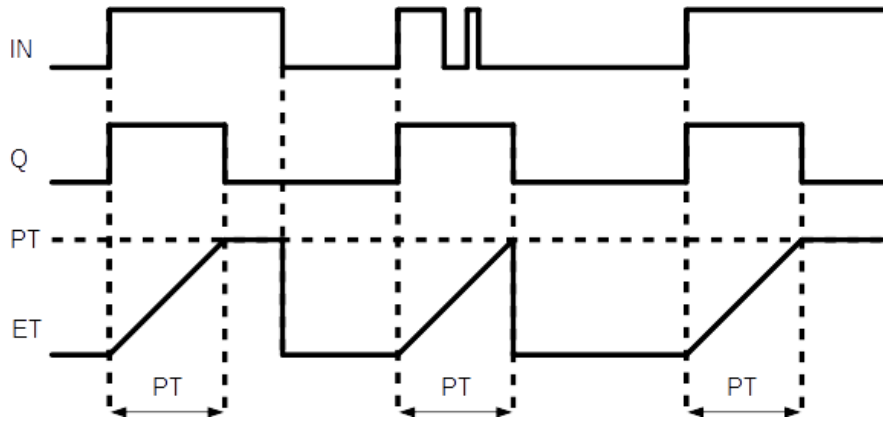



Figure 3.15. Segnali temporali del timer TON

**Timer TOF** (Fig. 3.13c):

- IN – ingresso per l'innesco del timer,
- PT – tempo preimpostato,
- ET – tempo trascorso,
- Q – uscita.

Il principio di funzionamento del timer TOF può essere rappresentato attraverso segnali temporali. Queste forme d'onda sono mostrate in Fig. 3.16.

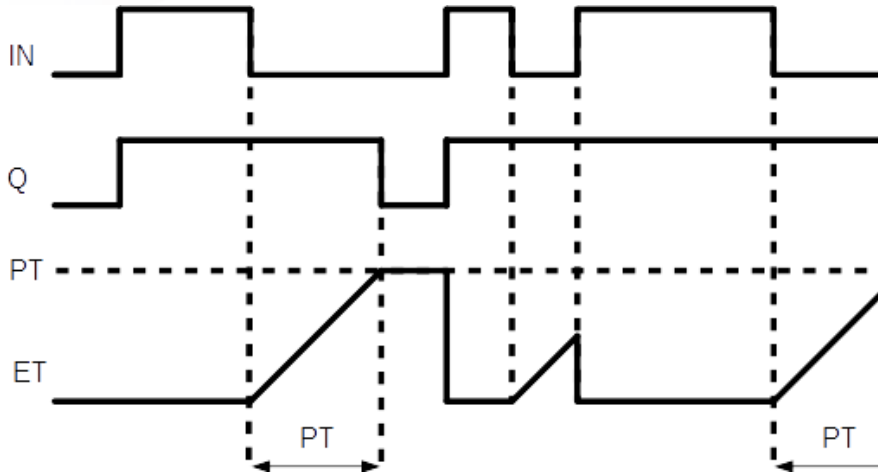



Figure 3.15. Segnali temporali del timer TOF

Le funzioni di confronto vengono utilizzate per confrontare due valori di dati dello stesso tipo assegnati agli input I1 e I2. Se la condizione di confronto viene soddisfatta, il valore logico 1 viene visualizzato nell'uscita Q. I simboli delle funzioni di confronto vengono visualizzati in Fig. 3.17 [2].

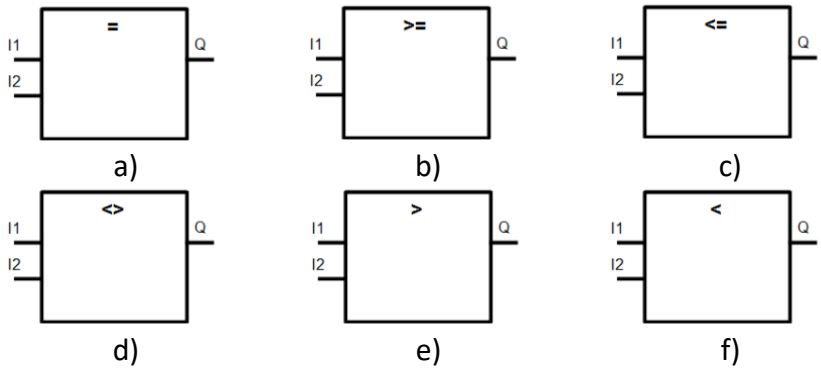



Figure 3.16. Funzioni di confronto con differenti tipologie di relazione:
a) uguale,
b) maggiore-uguale,
c) minore-uguale,
d) diverso,
e) più grande,
f) più piccolo [1]

## 3.4 Costruzione del controllore

Il PLC, o **Programmable Logic Controller**, è un computer industriale che esegue le seguenti funzioni sotto il controllo di un sistema operativo in tempo reale [1]:

1. **Raccoglie misurazioni (risultati)** inviate da sensori e dispositivi di misura utilizzando ingressi digitali e analogici;
2. **Esegue programmi utente** contenenti algoritmi di controllo ed elaborazione dati codificati, utilizzando i dati ottenuti sul processo o sulla macchina controllata;
3. **Genera segnali di controllo** appropriati ai risultati dei calcoli del programma utente e li trasmette, attraverso i moduli di uscita, ai componenti e ai dispositivi esecutivi;
4. **Trasmette i dati** utilizzando moduli e collegamenti di comunicazione;
5. **Svolge le funzioni di diagnostica** del software e dell'hardware.

Secondo la definizione, il PLC è un computer industriale. Pertanto, la costruzione del controllore dovrebbe collegarsi alla struttura di un computer. Elementi comuni per questi due dispositivi sono senza dubbio: un microprocessore, le memorie RAM e ROM, bus, sistema operativo (per i controllori è un sistema in tempo reale). Inoltre, il PLC è dotato di un sistema di input e output per smistare le informazioni tra i controllori e l'ambiente. L'Architettura semplificata di un tipico controllore logico programmabile è mostrata in Fig. 3.17.

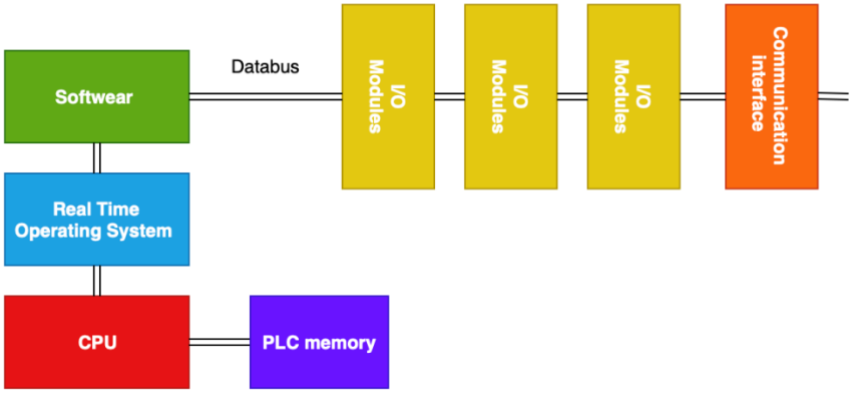


Figura 3.17. Architettura semplificata di un PLC [4]

## 3.5 Descrizione del programma VR

Il luogo in cui svolgere esercizi nello spazio VR in questo scenario è un ambiente di una fabbrica. L'ambiente ha una stazione con un carrello che si muove lungo i binari ed una PLC simulator board. La vista del capannone è mostrata in Fig. 3.18.

Figura 3.18. Ambiente di fabbrica

Lo schema della stazione è mostrato in Fig. 20. Il carrello è dotato di un proprio sistema di azionamento RL, che si muove con esso. Il carrello può muoversi lungo i binari R-L, e A e B. Il trasferimento ai binari adiacenti richiede la rotazione di 90 gradi. Le piattaforme rotanti A e B vengono utilizzate per la rotazione in entrambe le direzioni. Ogni piattaforma è dotata di un proprio sistema di azionamento - sistema di azionamento A e sistema di azionamento B, rispettivamente. Ogni binario ha anche sensori limite: binario A - Sensore A1 e Sensore A2, binario B - Sensore B1 e Sensore B2, e binario RL - Sensore R e Sensore L.

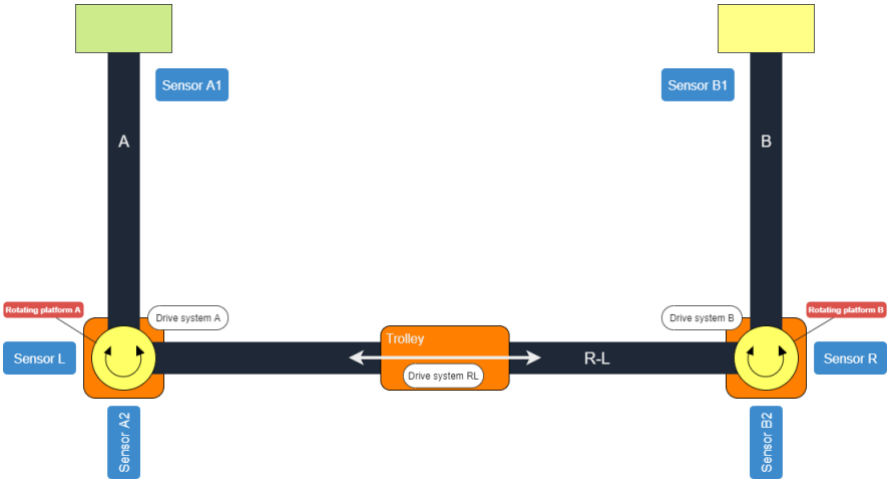
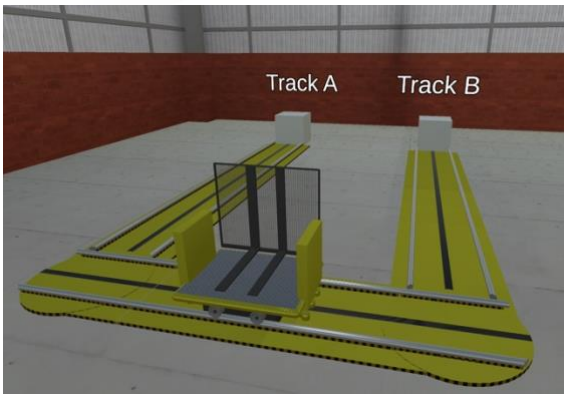



Figura 3.19. Schema della stazione




a)

b)

Figura 3.20. a) La stazione; b) Vista dall'alto

La PLC simulator board è costituita da una libreria di blocchi funzionali, uno spazio di lavoro in cui i blocchi di programma sono posizionati e collegati, e terminali di ingresso e di uscita. La vista della PLC simulator board è mostrata in Fig. [Pole]22. Il simulatore PLC ha 4 ingressi binari e 6 uscite binarie. I sensori sono collegati agli ingressi: Due di loro informano che il carrello si trova su una piattaforma rotante, la piattaforma rotante A o la piattaforma rotante B, e altri due sensori informano che il carrello ha raggiunto la fine del binario A o del binario B. Le uscite binarie danno segnali di controllo alle piattaforme rotanti - attivano la rotazione delle piattaforme nelle direzioni CW e CCW - mentre due uscite attivano l'azionamento del carrello (sinistra o destra).

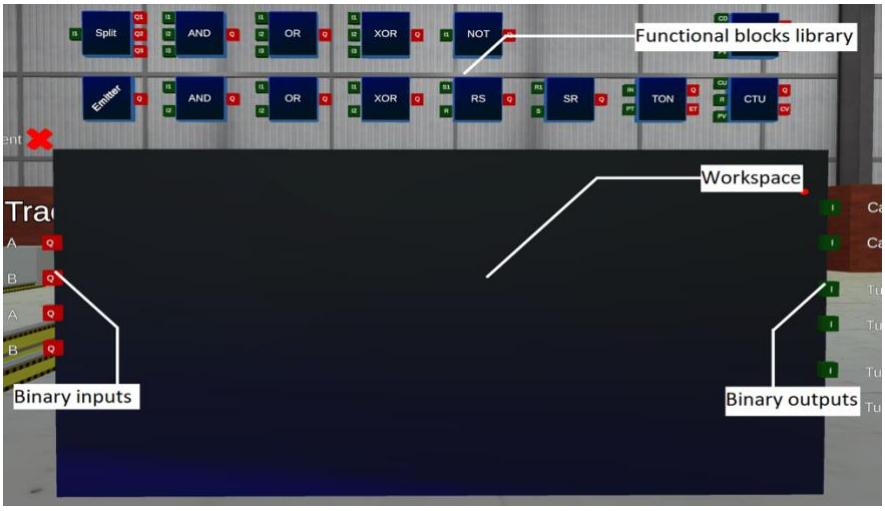



Figura 3.21. PLC simulator board

Sopra la PLC simulator board c'è una libreria di blocchi funzionali. Contiene i seguenti elementi:

- Funzione logica: AND, OR e XOR,
- Blocco di negazione: NOT,
- Latch bit: SR e RS,
- Timer: TON.

Gli elementi di cui sopra sono inclusi nella versione con due o tre ingressi. Inoltre, Split - blocco che separa il segnale - ed Emitter - il blocco sull'uscita logica "1" - sono disponibili.
La Fig. 3.22 riporta un esempio dei simboli dei blocchi funzionali che si trovano nella libreria del simulatore PLC.

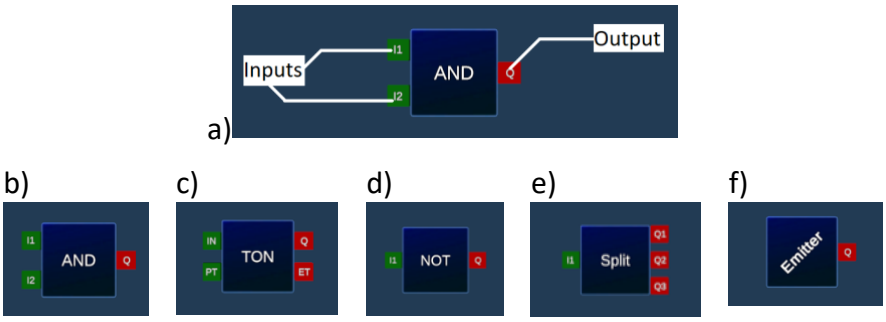



Figura 3.22. Simboli dei blocchi funzionali del simulatore PLC:
a) blocco funzionale con 2 ingressi,
b) blocco funzionale con 3 ingressi,
c) timer TON,
d) blocco negante NOT,
e) blocco Split,
f) blocco Emitter

La creazione di un programma di controllo delle applicazioni industriali richiede l'inserimento di blocchi funzionali appropriati nell'area di lavoro e la creazione delle connessioni corrette tra di essi. I blocchi vengono scaricati dalla libreria utilizzando una mano virtuale controllata da manipolatori. Il blocco scaricato dalla libreria deve essere inserito nell'area di lavoro e quindi combinato con gli altri blocchi. È possibile collegare l'uscita di un blocco con l'ingresso di quello successivo. Non si possono collegare le uscite dei blocchi. Tuttavia, è possibile dividere il segnale di uscita utilizzando un blocco Split. Per eseguire il programma, è necessario inserire il blocco Emitter. Il carrello può essere spostato nella posizione iniziale con il pulsante Reset Environment, accanto all'area di lavoro della PLC simulator board.


[1]. Kasprzyk J., Programowanie sterowników przemysłowych, WNT Warszawa 2006
[2]. Simatic S7 Programowalny sterownik S7-1200. Podręcznik systemu, Wydanie 04/2009
[3]. Kwaśniewski J., Sterowniki SIMATIC S7-1200 w praktyce inżynierskiej, BTC Legionowo 2013
[4]. Kwiecień R., Komputerowe systemy automatyki przemysłowej, Helion Gliwice 2013

## 3.6 Scopo dello Scenario

Negli ultimi decenni, lo smistamento automatico dei rifiuti è stato un argomento di interesse in tutto il mondo. Nel campo della ricerca, molti articoli sono stati scritti su nuovi metodi, sensori e attuatori per effettuare lo smistamento dei rifiuti in modo efficiente.
Gli studenti acquisiranno familiarità con il processo di riciclaggio, che comprende principalmente lo smistamento dei rifiuti. In particolare, gli studenti avranno la possibilità di impostare e utilizzare sensori e attuatori elettromagnetici da utilizzare in una linea di smistamento.
Tuttavia, nelle industrie, i rifiuti misti vengono smistati in base a metodi convenzionali. Normalmente la maggior parte dei materiali inutilizzati e di scarto consiste in metallo, vetro, carta, plastica o rifiuti biodegradabili dalla cucina. Questi materiali possono essere riciclati per un ulteriore utilizzo. Il primo passo verso il riciclaggio è lo smistamento dei rifiuti.
Con la costruzione della linea di smistamento, l'utente può sperimentare come impostare e utilizzare correttamente i sensori e gli attuatori resi disponibili nell'esercizio.

## 3.7 Introduzione

Ci sono due sottocategorie di smistamento, ovvero i rifiuti domestici e i rifiuti industriali, quindi ci sono due scenari da selezionare: rispettivamente lo smistamento dei rifiuti domestici e quello dei rifiuti industriali. La scelta può essere fatta attraverso il menu principale mostrato in Fig. 3.1. La freccia nella seconda riga offre la possibilità all'utente di selezionare lo scenario in cui desidera lavorare:

- Rifiuti domestici.
- Rifiuti industriali.

Nello smistamento dei rifiuti domestici ci sono tre categorie di materiali:

- Rifiuti organici;
- Vetro (bottiglie);
- Plastica (imballaggio alimentare).

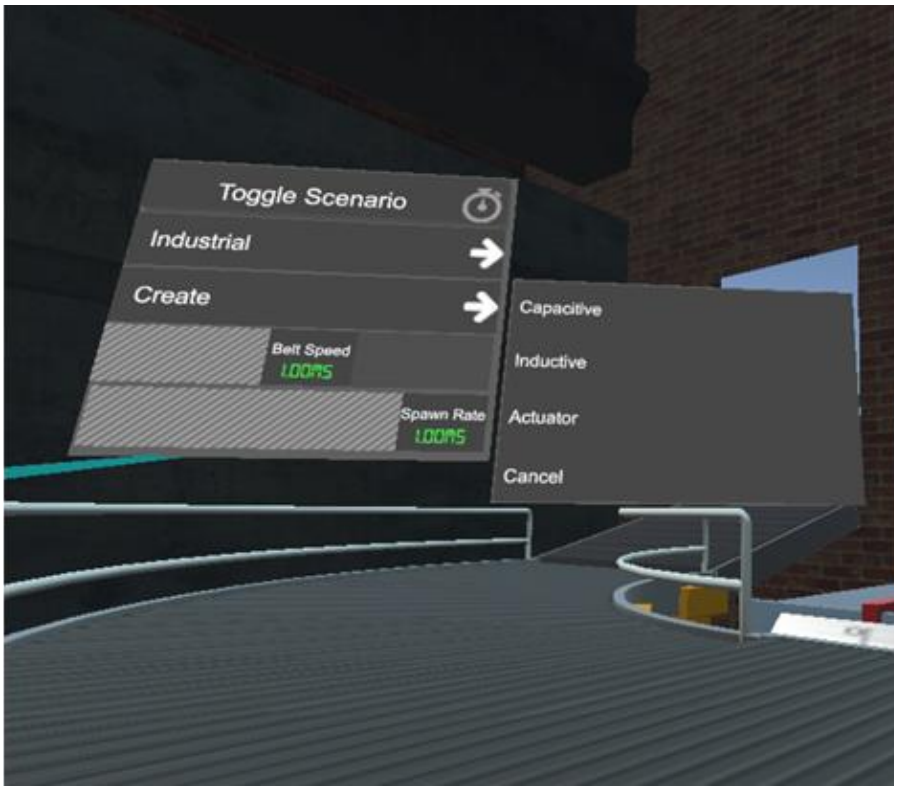



Figura 4.1. Menu principale

Nello smistamento dei rifiuti industriali ci sono tre categorie di materiali:

- Ferromagnetico e non conduttivo (come la ferrite del nucleo del motore e la schermatura dei cavi);
- Conduttivo e non ferromagnetico (come l'alluminio ed il rame delle barre e delle bobine del motore);
- Plastica (parti dei motori in plastica).

In questo Scenario è possibile utilizzare due tipi di sensori: induttivo e capacitivo. Il sensore induttivo è in grado di distinguere gli oggetti metallici e ferromagnetici mentre il sensore capacitivo risulta sensibile ai rifiuti plastici, di vetro e organici. Dopo che i sensori hanno rilevato il materiale dei rifiuti, gli attuatori spingono il rifiuto smistato nel relativo contenitore.
L'utente deve impostare la linea di smistamento. Non vi è alcun limite di tempo per l'impostazione della linea di smistamento.
Nel menu principale è possibile impostare anche la velocità del nastro ed il tasso di generazione dei rifiuti.

## 3.8 Assemblaggio Virtuale della Linea di Smistamento

I sensori e gli attuatori devono essere inseriti dall'utente (tramite il pulsante "create" del menu principale, vedi Fig.4.1) e collocati in posizioni predefinite. In particolare, poiché gli slot predefiniti sono larghi 20 cm, il sensore induttivo, il cui diametro è di 20 cm, deve essere collocato in uno slot predefinito. Il sensore capacitivo, il cui diametro è di 20-60 cm, può occupare fino a tre slot predefiniti su un lato del nastro (terminale alimentato) e tre slot sull'altro lato del nastro (terminale a terra). Gli attuatori devono essere collocati in uno slot predefinito.
Tutti i sensori e gli attuatori devono essere collocati nella posizione predefinita all'interno degli slot specifici sul nastro di smistamento; gli attuatori devono essere posizionati davanti a ciascun contenitore.
A titolo di esempio, in Fig. 4.2 è rappresentata una possibile configurazione della linea di smistamento per lo Scenario A (CS e CSG sono le due piastre del sensore capacitivo).

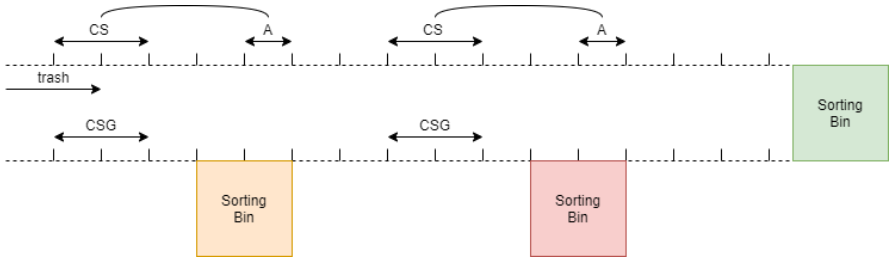



Figura 4.2. Possibile configurazione della linea di smistamento

Dopo aver assemblato la linea di smistamento, i parametri di ciascun sensore e di ciascun attuatore devono essere impostati.
Cliccando su ogni oggetto è possibile impostare i parametri relativi all'interno di un determinato intervallo.

## 3.9 Sensore capacitivo

Il sensore capacitivo è costituito da due piastre conduttive: una è messa a terra, l'altra viene alimentata con una tensione alternata. Il rifiuto da rilevare e smistare passa attraverso queste piastre. A causa delle diverse proprietà dielettriche appartenenti ai rifiuti da smistare, si verificano cambiamenti nella capacità C, che vengono rilevati dal sensore. Il sensore è mostrato in Fig. 4.3.

Figura 4.3. Sensore capacitivo

La lunghezza delle piastre risulta variabile. L'utente può impostare la lunghezza scegliendo tra 20, 40 o 60 cm, cioè occupando 1, 2 o 3 slot lungo il nastro.
L'utente può cliccare sul segno “più” del sensore per aprire un menu: qui l'utente può impostare l’ampiezza e la frequenza della tensione applicata, la lunghezza delle piastre (da scegliere tra 20, 40 o 60 cm) ed il tempo di reset. Il tempo di reset indica quanto tempo deve trascorrere prima che il sensore vada ad inviare un altro segnale all’attuatore, cioè se qualcosa va davanti al sensore la corrente va oltre la soglia e viene inviato un segnale. Dal momento che l'elemento rimane davanti al sensore il segnale all'attuatore viene inviato continuamente.

Oltre alla lunghezza delle piastre, la frequenza f e l'ampiezza V della tensione applicata possono variare all'interno di un intervallo predefinito come segue:

$$10\ \text{kHz} \leq f \leq 20\ \text{MHz}$$

$$100\ \text{mV} \leq V \leq 20\ \text{V} \qquad \text{(eq. 1)}$$

In sintesi, per questo sensore, l'ampiezza della corrente di rilevamento è data da

$$\mathrm{I} = \frac{V1}{\left|\frac{1}{j\omega C}\right|} = V2\pi f C \quad [A] \qquad \text{(eq. 2)}$$

La corrente che il sensore capacitivo è in grado di rilevare si trova nell'intervallo:

$$50[\mu\text{A}] \leq \mathrm{I} \leq 10\ [\text{mA}]. \qquad \text{(eq. 3)}$$

Se la corrente di uscita è inferiore a 50 µA, non risulta compresa nell'intervallo rilevabile e quindi non viene generato alcun segnale di uscita, mentre oltre i 10 mA il sistema genera un allarme poiché il sensore potrebbe bruciare dopo un po' di tempo (surriscaldamento del sensore). Tuttavia, per correnti che si trovano tra 50 µA e 10 mA, il sensore capacitivo funziona correttamente.

## 3.10 Sensore induttivo

Il sensore induttivo è in grado di rilevare oggetti conduttivi e ferromagnetici. Il principio per il rilevamento degli oggetti conduttivi si basa sulle correnti parassite: quando la bobina è alimentata da una corrente variabile nel tempo (nel nostro sensore una corrente alternata), le correnti parassite scorrono nel conduttore, modificando la distribuzione del campo magnetico. Il principio per il rilevamento dei materiali ferromagnetici si basa sulla modifica della distribuzione del campo magnetico causata dell'oggetto ferromagnetico che tende ad attirare le linee di campo. Il sensore è costruito con una bobina dotata di nucleo in ferro, alimentata tramite una tensione alternata, e con uno schermo conduttore. Quando la bobina è a vuoto (non ci sono né

oggetti ferromagnetici né oggetti conduttivi da rilevare), è caratterizzato da un certo valore di impedenza. Quando un oggetto conduttivo si trova davanti al sensore, l'impedenza della bobina diventa più bassa. Mentre quando un oggetto ferromagnetico si trova davanti al sensore, l'impedenza della bobina diventa più alta. Il sensore induttivo è mostrato nella Figura 4.4.

Figura 4.4. Sensore induttivo

L'utente può cliccare sul sensore per aprire un menu: qui l'utente può impostare la grandezza e la frequenza della tensione applicata ed il tempo di reset (si veda il paragrafo sul sensore capacitivo per la descrizione del tempo di reset). La frequenza f e l'ampiezza V della tensione applicata possono variare all'interno di un intervallo predefinito come segue:

$$10\ \text{kHz} \leq f \leq 1\ \text{MHz}$$

$$100\ \text{mV} \leq V \leq 10\ \text{V} \qquad \text{(eq. 4)}$$

In sintesi, per questo sensore, l'ampiezza della corrente di rilevamento è data da:

$$I = \frac{V}{|j\omega L|} = \frac{V}{2\pi f L}\ [A] \qquad \text{(eq. 5)}$$

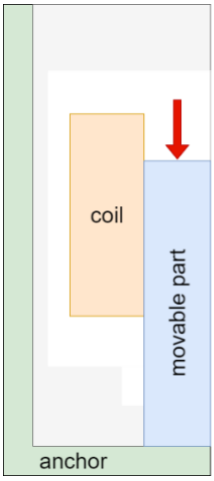
La corrente che il sensore induttivo è in grado di rilevare si trova nell'intervallo:

$$50\ [\mu A] \leq I \leq 10\ [mA]. \qquad \text{(eq. 6)}$$

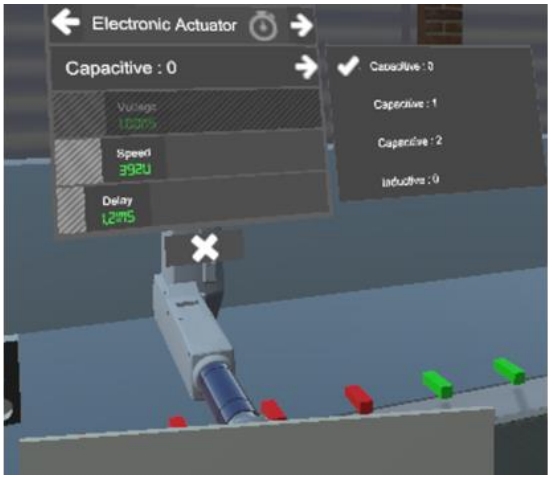
Se la corrente di uscita è inferiore a 50 µA non risulta compresa nell'intervallo rilevabile e quindi non viene generato alcun segnale di uscita, mentre oltre i 10 mA il sistema genera un allarme poiché il sensore potrebbe bruciare dopo un po' di tempo (surriscaldamento del sensore). Tuttavia, per correnti che si trovano tra 50 µA e 10 mA, il sensore induttivo funziona correttamente.

## 3.11 Attuatore elettromagnetico

L'attuatore è costituito da un circuito magnetico e da una bobina. Quando la corrente scorre nella bobina, la parte mobile dell'attuatore (in rosso in Fig. 4.5a) viene tirata all'interno dell'attuatore (movimento dal basso verso l'alto in Fig. 4.5a) e quindi l'ancora (in verde in Fig. 4.5a) spinge il pezzo di rifiuto. Quando non viene fornita corrente, la parte mobile esce dall'attuatore (movimento dall'alto verso il basso in Fig. 4.5a) e l'ancora viene mantenuta al suo interno. L'attuatore elettromagnetico che si può vedere nello Scenario è mostrato in Fig. 4.5b.




(a)




(b)

Figura 4.5. Attuatore elettromagnetico

L'utente può cliccare sull'attuatore per aprire un menu: qui l'utente può impostare la velocità dell'ancora. La velocità è correlata alla forza, che è proporzionale al quadrato della corrente.
L'attuatore deve essere collegato al relativo sensore, scegliendo nell'elenco dei sensori già creati, come mostrato in Fig. 4.5b.
L'attuatore è in grado di spingere il pezzo di rifiuto in un contenitore se la velocità è impostata all'interno del corretto intervallo di valori. In caso contrario l'oggetto verrà spinto fuori dal contenitore o rimarrà sul nastro.

È necessario impostare un ritardo per l'attuatore: conoscendo la velocità del nastro (vedi menu principale) e la distanza tra le barre verdi (o rosse) sul nastro, che è di 20 cm, è possibile calcolare il ritardo giusto da impostare.

## 3.12 Funzionamento della linea di smistamento

Dopo aver impostato la linea, l'utente provvede ad avviarla: la durata di questa parte dell'esercizio è di 2 minuti. Per attivare o mettere in pausa lo Scenario, l'utente deve fare clic su "Toggle Scenario" nel menu principale (vedi Fig. 4.1).
L'utente ottiene un punteggio basato sul numero di rifiuti che riescono a venire smistati correttamente (vedi Fig. 4.6).

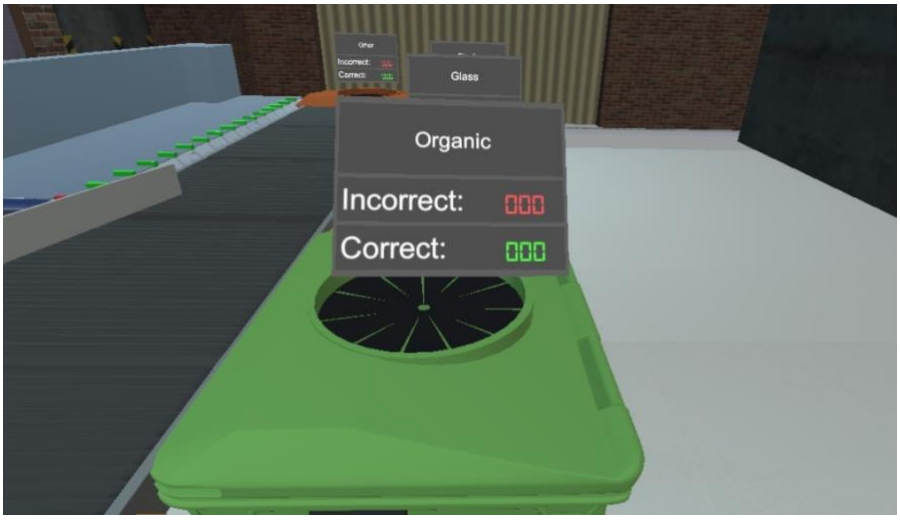



Figura 4.6. Contenitore per rifiuti organici e punteggio

# Appendice A -HTC VIVE: MANUALE DELL'UTENTE

## Introduzione

Questa guida è intesa come una guida di base per l'utente per la configurazione, l'utilizzo e la manutenzione del set HTC Vive VR. La guida contiene le istruzioni di base che devono essere seguite durante l'assemblaggio e la prima accensione del Vive. La sezione controllers descrive come esplorare l'ambiente VR. Infine, la sezione della cuffia descrive come pulire e mantenere la cuffia stessa. La guida si basa sulla guida utente ufficiale di HTC Vive:

https://www.htc.com/managedassets/shared/desktop/vive/Vive

## Controllers

1. Pulsante Menu
2. Trackpad
3. Pulsante di sistema
4. Luce di stato
5. Adattatore di ricarica USB
6. Sensore di tracciamento
7. Grilletto
8. Pulsante Grip

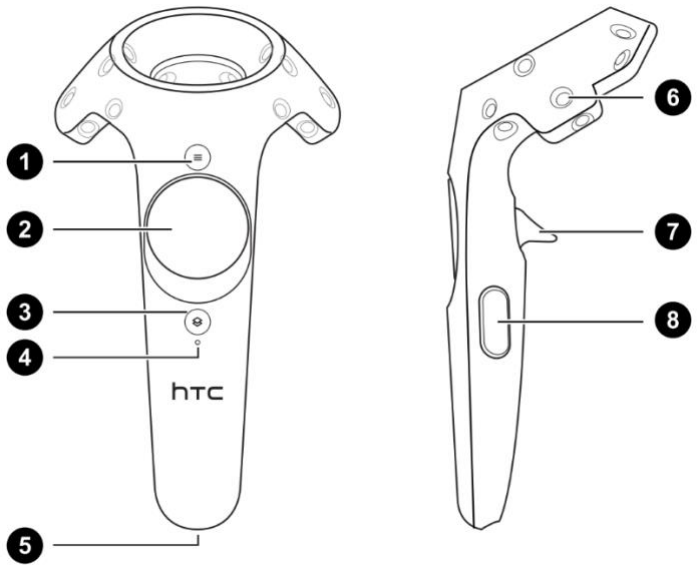



Figura A. 1. Controllore Vive

## Attivazione

Per accendere il controller, tenere premuto il pulsante di sistema fino a quando non si percepisce un segnale acustico. Per spegnere i controller, tenere premuto il pulsante Sistema finché non si percepisce un segnale acustico. Quando si accendono per la prima volta, i controller si associano automaticamente con la cuffia.
Per associare manualmente i controller, avvia l'app SteamVR, quindi vai a **Impostazioni ⇒ Dispositivi ⇒ Associa controller**

## Luce di stato

La luce bianca mostra che il controller è completamente carico durante la ricarica

1. La luce blu lampeggiante indica che i controller si stanno associando alla cuffia.
2. La luce diventa blu quando il controller è associato.
3. La luce rossa lampeggiante indica che la carica è bassa.
4. La luce diventa arancione quando il controller è in carica.
5. La luce è verde quando il controller è attivo.

## Utilizzo

Per navigare nell'ambiente VR, puntare un controller verso la prozioné di menu desiderata e premere il grilletto.
I trackpad possono essere utilizzati per il movimento all'interno della realtà virtuale. Per fare questo, bisogna tenere premuto il trackpad al fine di proiettare un indicatore di teletrasporto. Premendo nuovamente il trackpad, l'utente viene teletrasportato nella posizione selezionata.
Il pulsante di sistema può essere utilizzato per accedere al menu principale di SteamVR da qualsiasi ambiente VR e può essere disabilitato premendo il pulsante di sistema una seconda volta. Il menu di SteamVR non viene visualizzato su una schermata dedicata, apparirà solo come una perdita di risoluzione.

## Stazioni di base

1. Luce di stato
2. Lente a LED
3. Indicatore canale
4. Porta di alimentazione
5. Pulsante canale
6. Porta cavo di sincronizzazione
7. Porta Micro USB

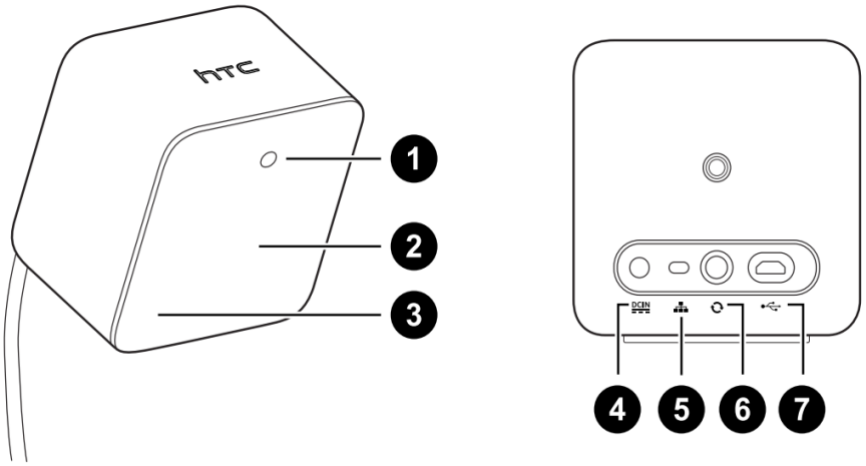



Figura A. 2. Stazioni di base

## Installazione

Posizionare le stazioni di base in diagonale nella stanza e sopra la vostra altezza. Per un corretto tracciamento, assicurarsi che la distanza massima tra le due stazioni di base sia di 5 metri e che la distanza minima sia di 2 metri. Ogni stazione base ha un campo visivo di 120 gradi. Si raccomanda di inclinarle tra i 30 e i 45 gradi.

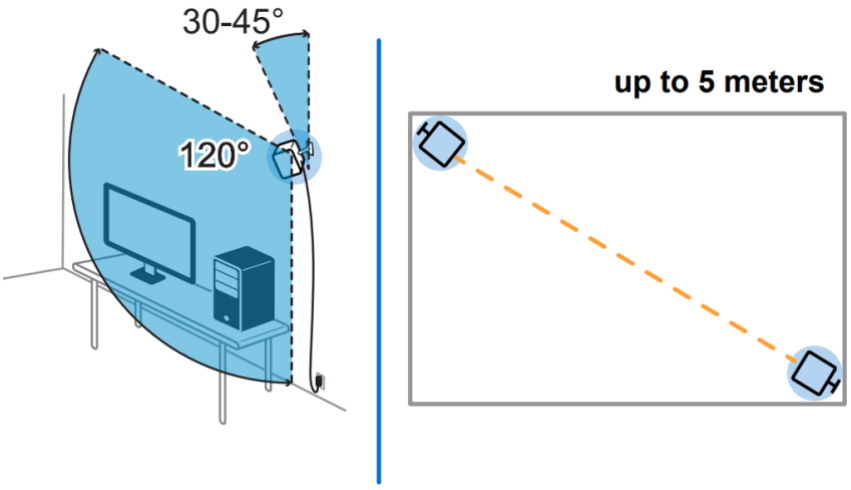



Figura A.3.

## Attivazione

Dopo aver collegato il cavo di alimentazione alla stazione base, premere i pulsanti canale sul retro delle stazioni base in modo che una stazione base sia impostata sul canale "b", mentre l'altra sia impostata sul canale "c".

## Luce di stato

1. Verde quando la stazione base è attiva.
2. Verde lampeggiante quando la stazione base è in standby.
3. Viola quando le stazioni base stanno tentando di sincronizzarsi.
4. Lampeggiante viola quando la sincronizzazione è bloccata.

# Cuffia

## Regolazione delle lente

Al fine di regolare la distanza inter-pupillare per le lenti, regolare la manopola sul lato inferiore sinistro dell'auricolare.

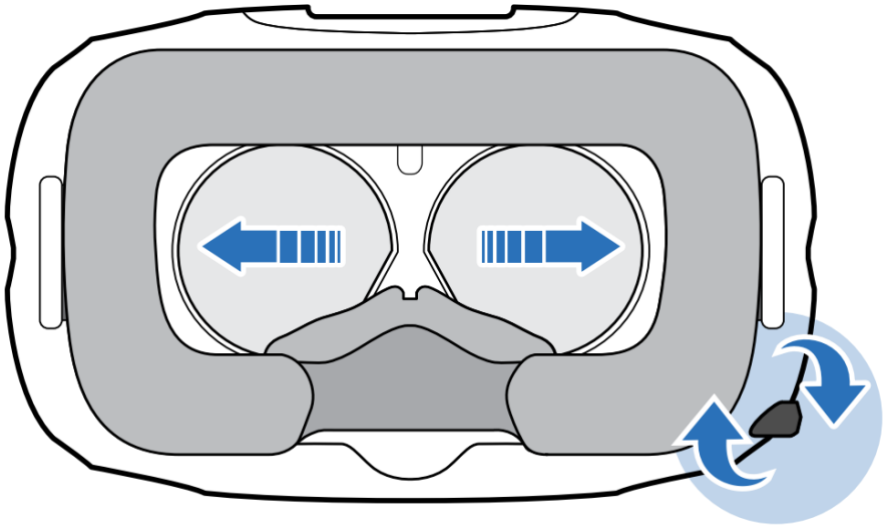


Figura A.4.

## Pulizia del cuscino del viso

Per pulire il cuscino del viso, sollevarlo da entrambi i lati fino a qu-andò si stacca dalla cuffia. Quindi pulire il cuscino con un panno liscio umido e asciugare a temperatura ambiente. Non immergere, strofinare, strizzare né sbiancare il cuscino del viso.

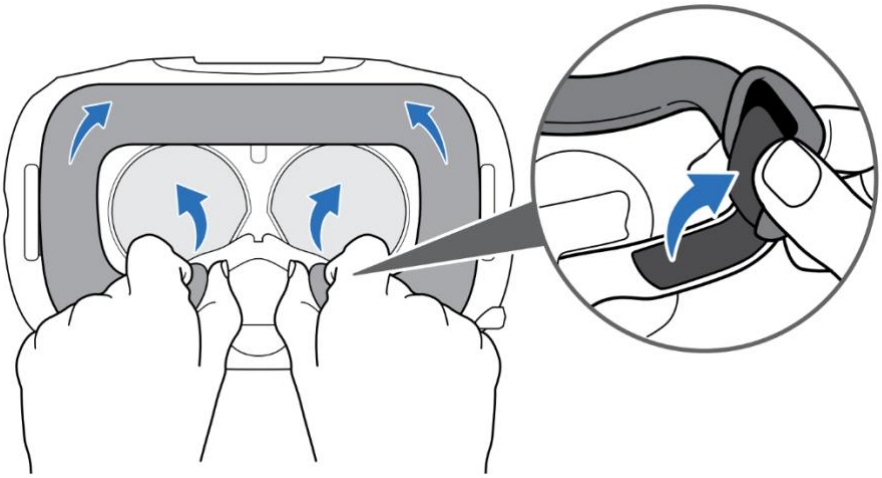


Figura A.5.

## Pulizia delle lente

Per pulire le lenti della cuffia, strofinarle tramite un panno in microfibra imbevuto di alcool (o di un detergente per lenti) con un movi-mento circolare. Non esporre le lenti alla luce solare diretta in quanto ciò potrebbe danneggiare il display.

Figura A.6.

## Luce di stato

1. La luce verde indica che la cuffia è attiva.
2. La luce verde lentamente lampeggiante indica che la cuffia è in standby.
3. La luce è rossa quando si è verificato un errore nei cavi o nel display.

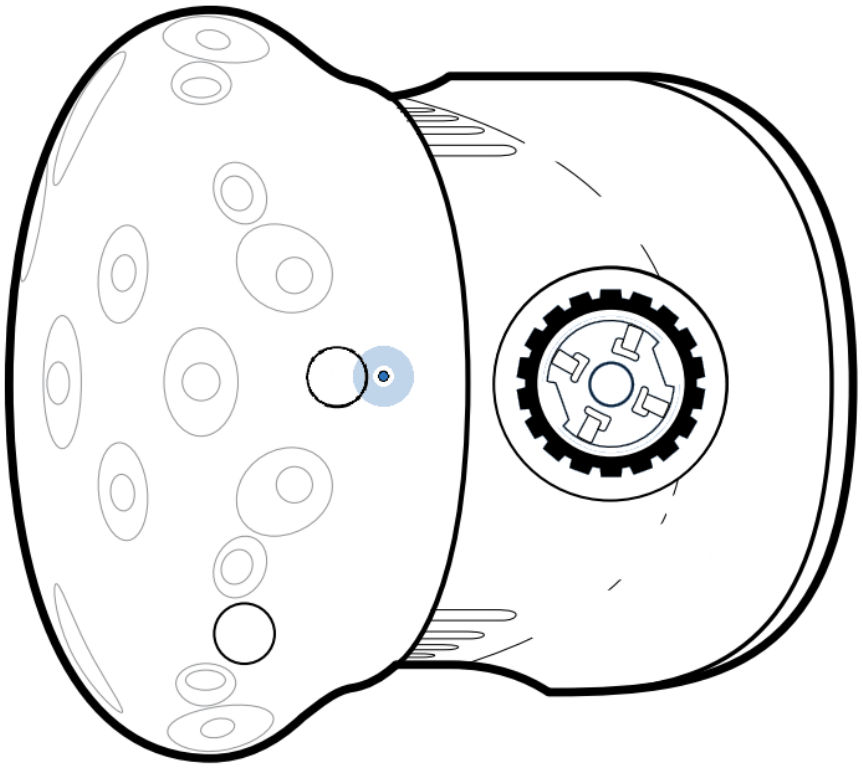


Figura A.7.

## Box di collegamento

Collegare la cuffia al computer utilizzando il box di collegamento ed i cavi forniti. La cuffia è alimentata da un caricabatteria separato attraverso il box di collegamento.

1. Cavo cuffia
2. Porta di alimentazione
3. Porta USB
4. Porta Mini Display (alternativa all'HDMI)
5. Porta HDMI

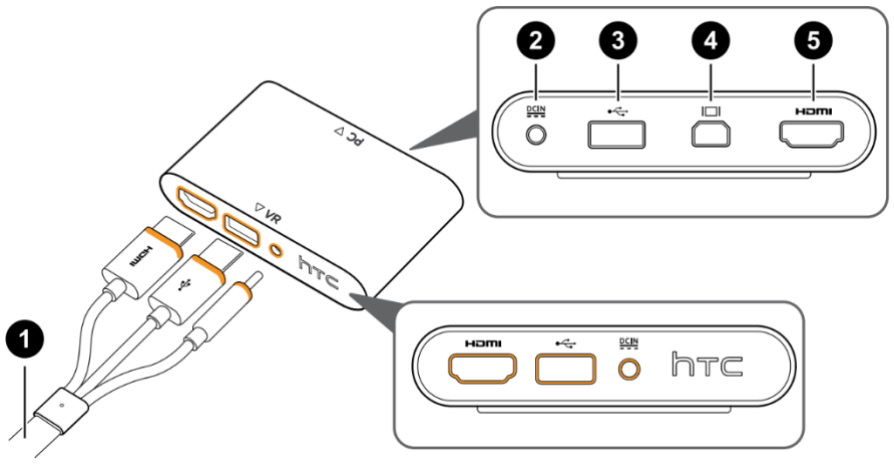



Figura A.8.

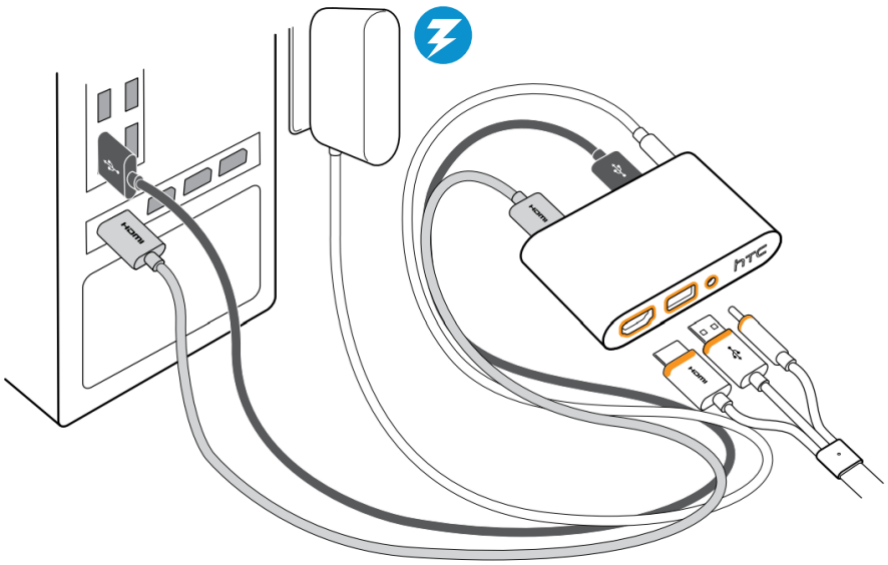



Figura A.9.

## Configurazione di Steam VR

Prima di poter utilizzare Vive, dovrai completare il processo di configurazione, che include la definizione della tua area di gioco. Per iniziare, scarica e installa l'app Steam da:
http://store.steampowered.com/about/. Dovrai creare un account Ste-am. Una volta installato Steam, o se hai già installato Steam, vai a Libreria ⇒ Strumenti per installare l'app SteamVR. Al termine, l'app SteamVR verrà avviata.
In SteamVR seleziona Avvia Configurazione stanza ⇒ Taglia di stanza e segui le istruzioni visualizzate sullo schermo.