

# Manutenzione preventiva per la robotica e l'automazione intelligente

Nicola Mori

September 2021

# Contents

<b>1</b>	<b>Supervisione e gestione dei guasti</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Terminologia della diagnosi</b>	<b>5</b>
2.1	Distinguere dal guasto . . . . .	5
2.2	Classificazione della Diagnosi . . . . .	5
2.3	Termini Utili . . . . .	6
2.3.1	Schema a V . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Affidabilità, Disponibilità e Manutenibilità di un Sistema</b>	<b>7</b>
3.1	Teoria dell’Affidabilità . . . . .	7
3.2	Distribuzioni . . . . .	8
3.2.1	Mean Time To Failure . . . . .	8
3.3	Manutenzione . . . . .	8
3.3.1	Correttiva . . . . .	8
3.3.2	Manutenzione Preventiva . . . . .	9
3.3.3	Manutenzione su Condizione . . . . .	9
3.3.4	Manutenzione Predittiva . . . . .	9
3.3.5	Mean Time To Repair . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Sicurezza e Integrità di Sistema</b>	<b>10</b>
4.0.1	Classificazione del rischio . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Modellazione di Processi e Segnali</b>	<b>12</b>
5.1	Guasto sui sensori . . . . .	12
5.2	Guasto sugli attuatori . . . . .	13
5.3	Modelli per processi . . . . .	13
5.3.1	Sfumature modelli . . . . .	13
5.4	Modello di processo statico . . . . .	13
5.5	Modello di Processo dinamico . . . . .	13
5.6	Modello di un processo lineare stazionario . . . . .	13
5.7	Analisi sui segnali . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Rilevamento a soglia</b>	<b>15</b>
6.1	Soglie Additive . . . . .	15
6.2	Rilevamento della soglia Off-Line e On-Line . . . . .	16
6.3	Soglie binarie . . . . .	16
6.3.1	Z-Test . . . . .	16
6.3.2	T-Test . . . . .	17
6.3.3	Chi-Squared Test . . . . .	17
6.4	Run-Sum Test . . . . .	17
6.4.1	Test di credibilità . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Rilevamento guasti mediante analisi dei segnali</b>	<b>18</b>
7.1	Segnale-Based Fault Detection . . . . .	18
7.1.1	Filtraggio a banda passante . . . . .	18
<b>8</b>	<b>Rilevamento Guasti Mediante Tecniche Di Identificazione</b>	<b>19</b>
8.1	Processi Non Stazionari . . . . .	20

<b>9</b>	<b>Rilevamento guasti mediante equazioni di parità</b>	<b>22</b>
9.1	Proprietà dei residui . . . . .	22
9.2	Firma del guasto . . . . .	22
<b>10</b>	<b>Rilevamento guasti mediante osservatori</b>	<b>24</b>
<b>11</b>	<b>Rilevamento guasti mediante Principal Component Analysis</b>	<b>25</b>
11.1	Utilizzare la PCA per rilevamento guasti . . . . .	26
<b>12</b>	<b>Elementi di diagnosi dei guasti</b>	<b>27</b>
12.1	Sistemi diagnostici . . . . .	27
12.2	Tecniche di Machine Learning . . . . .	28
12.2.1	La classificazione . . . . .	28
12.2.2	Classificatore geometrico . . . . .	28
12.2.3	Classificatore Bayesiano . . . . .	29
12.2.4	Alberi decisionali . . . . .	29
12.2.5	Reti Neurali . . . . .	29
12.3	Metrica di un sistema di diagnosi dei guasti . . . . .	29
<b>13</b>	<b>Sistemi tolleranti ai guasti</b>	<b>30</b>
<b>14</b>	<b>Manutenzione Preventiva</b>	<b>31</b>
14.1	Workflow . . . . .	31
14.2	Prognosi . . . . .	32
14.2.1	Come fare prognosi . . . . .	32
<b>15</b>	<b>Robotica</b>	<b>34</b>
<b>16</b>	<b>Caratteristiche dei sensori</b>	<b>35</b>
16.1	Sensori . . . . .	35
16.1.1	Caratteristiche statiche . . . . .	35
16.1.2	Caratteristiche Dinamiche . . . . .	36
<b>17</b>	<b>Elementi di condizionamento dei segnali</b>	<b>37</b>
<b>18</b>	<b>Elementi di filtraggio</b>	<b>38</b>

# 1 Supervisione e gestione dei guasti

Automazione intelligente, tutto ciò che può essere ricondotto alla tecnologia 4.0, termine nato in Germania, tutto del mondo industriale che fa base sulle tecnologie di IA, Robotica e Data Analytics. Hitachi produttore per Trenitalia e Lamborghini.

Avere dei sistemi in cui l'automazione sia propria sia informatica sempre più integrata scalza l'uomo dal processo fisico, ad esempio in una linea completamente automatizzata l'uomo non tocca nulla ma guarda da fuori, più è automatizzato più è necessario che la macchina deve capire se sta agendo correttamente oppure no. La parte di **supervisione** continua a diventare più importante con l'aumento della automazione. **Piramide dell'automazione**, la base più ampia field level, strumenti fisici che acquisiscono dati e il bus in cui transitano le info di basso livello. Sopra a questo livello c'è il livello di coordinamento e mi va dire ad ogni dispositivo cosa deve fare, ad esempio velocità di un motore. In questi due livelli di solito si ha quello che si definisce il **Controllo**, ogni azione volta a fenerare degli ingressi che garantiscono che il sistema che sto utilizzando abbia certe caratteristiche. Il terzo livello **Conduzione**, supervisione, garantire che l'automazione dei livelli inferiori si stia svolgendo in maniera corretta. Sopra il livello di gestione, ingegneria gestionale.

Non ci sarà un unica cosa da monitorare ogni processo avrà il suo controllore e il suo supervisore. L'output di un sistema di supervisione è normalmente un **consiglio**, un avviso.

Gli effetti F possono produrre variazioni nei parametri, negli stati e nell'uscita, non li conosco, ci sono, me ne accorgo perché ciò che ho descritto prima cambia. Le variazioni dipendono dai guasti ma non solamente da loro, ma anche dall'ambiente e dai disturbi, quindi fare diagnosi significa discriminare gli effetti dei guasti da quelli del rumore.

ESEMPIO SLIDE, se il sistema è automatizzato e ho il controllore C, se il sistema è a ciclo chiuso mi basta leggere solo l'uscita? Il controllore tende a mitigare quindi potrebbe correggere gli effetti del guasto, quindi potrei non accorgermene. Se misuro solamente l'uscita non me ne accorgo, se invece controllo anche l'ingresso così me ne accorgo. Dato un generico processo che è automatizzato, se c'è un guasto esso si riserverà sull'uscita, e devo controllare anche l'ingresso. Supervisione, analisi ingresso uscita, elabora genera un allarme.

Nella supervisione classica, le variabile sono confrontate con un valore **soglia**, quando c'è l'allarme o viene attivato l'allarme o la protezione automatica. I pro misuri confronti con una soglia, efficaci solo in condizioni in cui il guasto si è verificato, però se io ho un guasto importante mi si propaga su più variabili, ed inoltre ho bisogno di un certo tempo per dire se la soglia è superata o meno. Per migliorare questo lo facciamo superando la supervisione 'classica' introducendo una conoscenza a contorno, analizziamo quei dati utilizzando l'informazione che c'è sul processo con modelli matematici, identificazione e machine learning. Supervisione Avanzata. **Generazione delle feature**, caratteristica generata con i dati che contiene le info sulle quali dobbiamo diagnosticare, a noi interessa. Una volta generata l'andremo a testare per capire se c'è o non c'è guasto **Individuazione guasto**. Una volta che il guasto è stato rilevato vado ad **Isolamento del guasto**, per rilevare dove il guasto si è rivelato. Una volta che il guasto viene isolato devo darne una identificazione, capire come sta evolvendo il guasto nel tempo e quali sono le tua caratteristiche, **Diagnosi**. Dopo questa fase bisogna farne una **Valutazione**, per capire se è lieve o grave e se può aver effetto sulla persona e prendo una **Decisione** che andrà retroazionata per cambiare qualcosa del sistema. Se il sistema è riparabile posso effettuare la manutenzione, ovvero sostituire un componente prima che si rompa, non prima che c'è il guasto, c'è differenza tra guasto e rottura. La gravità si valuta in maniera qualitativa, con sicurezza e affidabilità e in base al valore decido di operare in una certa maniera.

I vantaggi della supervisione avanzata, analizzando ingresso e uscita con le feature è possibile fare analisi anche nei transitori, con velocità molto più elevate, si può anche fare la manutenzione

dell'impianto, permette di fare anche il controllo della qualità, gestire completamente il processo, sono necessarie queste info per i sistemi tolleranti ai guasti.

## 2 Terminologia della diagnosi

Definizioni prese da un comitato che è andata a normare tutte le definizioni in ambito della safety in ambito industriale.

**Guasto:** deviazione non permessa di almeno una proprietà caratteristica del sistema dalla condizione accettabile. Se ho una proprietà che deve andare in un modo ma in verità va in un altro allora posso considerare come guasto. Nella modellazione un guasto è uno stato del sistema, è una variabile del mio sistema, è un delta che si va ad aggiungere al mio sistema, variazione che influisce sul comportamento del mio sistema. Non è permessa ovvero deve esserci una soglia per stabilire se funzioni o meno. Anormale ovvero c'è una perdita di prestazioni, e ce ne sono diversi tipi ad esempio di progetto, ovvero se il progetto è stato fatto male, oppure di assemblaggio, di usura dove nei sistemi industriali è il più comune a causa del tempo di vita, HD o SW, oppure a causa dell'operatore, per esempio misurare la temperatura per il covid, a seconda dello spot sulla fronte c'è una diversa misurazione. Un guasto può provare un **fallimento/rottura**, vogliamo evitare che un calo di prestazioni arrivi fino al mancato funzionamento totale della macchina, più il guasto è piccolo più è difficile da trovare. **Failure:** interruzione permanente della capacità di un sistema di eseguire una funzione richiesta sotto specifiche condizioni operative. Questo non è uno stato che posso stimare per tornare indietro, qui invece se accade è un evento ovvero devo intervenire ed attuare un reset, ed è risultato di uno o più fault. I failure possono essere singoli, multipli e possono essere di tipo casuale. Si verifica di solito a seguito di uno stress, faccio lavorare il mio robot normalmente e piano piano con l'usura avviene il failure a causa del deterioramento di molte componenti.

**Malfunzionamento:** irregolarità intermittente del soddisfacimento di una funzione desiderata del sistema. Prima c'è poi non c'è, è una sorta di fault che si verifica a tratti, ad esempio il falso contatto per un cavo che rimane lento, ovvero un segnale arriva se il cavo è più o meno spostato.

### 2.1 Distinguere dal guasto

**Errore:** andare a fare la differenza tra valore misurato e quello di riferimento quello è l'errore, insito nei sistemi automatici ovvero tutti lo presentano.

**Disturbo:** ogni sistema funziona in determinate specifiche, ma funziona all'interno di un mondo in cui possono esserci degli ingressi sconosciuti che agiscono sul sistema e che non sono sotto il mio controllo.

**Residuo:** oggetti ad hoc che sono oggetti indicatori della presenza di un guasto, ad esempio uscita di un sensore e uscita di un modello nel quale faccio una simulazione. Indicazione della presenza di un fault.

**Sintomo:** cambiamento di una quantità osservabile dal valore nominale, mi permette di capire se c'è un guasto, lo starnuto è il sintomo di un raffreddore, un valore mi va sopra la soglia è il sintomo che mi dice che può esserci un guasto, può anche non esserlo.

### 2.2 Classificazione della Diagnosi

La diagnosi può essere fatta in diversi modi, in base al tipo e in base alle fasi. In base al tipo: dipende se ho un modello, **Diagnosi basata su modello matematico**, **Diagnosi senza modello matematico**, se non ho un modello posso comunque avere della conoscenza, Conoscenza euristica, ovvero un ingegnere di processo mi dà delle informazioni che voglio tramutare in un

modello grossolano, le altre due invece si basano su ciò che conosciamo, **Signal Based, Data driven**, la prima vengono valutati i segnali e cercare di capire se hanno cambiato comportamento, quella basata sui dati non ci basiamo su tutti i segnali, usiamo un database per estrarre delle feature su di esso.

Scelta la tipologia, individuazione, isolamento, identificazione, gestione del guasto.

SLIDE TIPI DI FUNZIONI NELLA DIAGNOSI.

SLIDE MODELLI NELLA FAULT DIAGNOSIS.

## 2.3 Termini Utili

**Reliability(Affidabilità):** capacità di realizzare una funzione richiesta sotto specifiche condizioni rispettando un obiettivo all'interno di uno spazio temporale. Una macchina è affidabile se fa quello che deve fare nel tempo prestabilito. Realizzare una funzione richiesta in un dato periodo di tempo, rappresenta la qualità per un certo periodo e se c'è un guasto l'affidabilità diminuisce. **Mean Time to Failure.** Indicatura economica se produce mi fa fare soldi

**Safety:** prende in considerazione effetti negativi su persone o cose. Capacità di un sistema di non causare danni a persone o ambiente. Vincolata ai guasti, perché un guasto probabilmente mi va ad intaccare la safety. Le azioni di safety sono orientate a evitare gli effetti dannosi dei fault. Un aumento della safety può comportare ad una diminuzione della produzione, ad esempio che i macchinari che rilevano un uomo nelle vicinanze e rallenta le proprie attività. Safety e Security diverse, la security è relativo alla privacy e sicurezza dell'informazione.

**Availability(disponibilità):** probabilità che un sistema o dispositivo operi in maniera soddisfacente ed efficiente in un qualunque istante di tempo. Si può calcolare in maniera oggettiva (formula nella slide). MTTF grandi si possono ottenere gestendo la tolleranza ai guasti, piccoli MTTR si possono ottenere con una veloce e rapida diagnosi.

### 2.3.1 Schema a V

Iter, si parte dai requisiti che il nostro sistema di diagnosi sia in grado di fare, affidabilità, guasti riparati. Poi si arriva alle specifiche ovvero come i requisiti vengono messi in pratica. Analizza segnali processo e dati, fa il design dei metodi e fa lo sviluppo software in the loop, tecnica comune attraverso l'utilizzo di una sandbox. Una volta finita questa fase inizia la fase di implementazione, fino adesso design. Poi integrazione, si fa il testing e il tuning, non lo provo più su una sandbox ma lo provo direttamente sull'hardware che verrà installato nell'impianto, se questo funziona poi risalgo la fase di integrazione dello schema e si va sui livelli di certificazione. Se qualcosa non va a buon fine si ritorna indietro.

### 3 Affidabilità, Disponibilità e Manutenibilità di un Sistema

L'**Affidabilità**: capacità di realizzare una funzione richiesta sotto specifiche condizioni rispettando un obiettivo all'interno di un dato periodo di tempo. Ovvero realizzare una funzione richiesta, di solito nei datasheet viene indicata con il MTTF. L'affidabilità con questo indice può essere rappresentata ma bisogna capire come si ottiene. Dipende dai Fault e Failure che ne esistono in diverse misure.

SLIDE GUASTI. I guasti possono essere o fault o failure di natura diversa a seconda della natura, **guasti HW**, possono essere sia di tipo veloce o lento, **guasti SW**. A noi interessano quelli elettrici e meccanici, meccanici o molto lenti dovuti allo stress al consumo o all'erosione, oppure anche veloci per un difetto di progettazione come nei materiali metallici la 'cricca', se il materiale viene sottoposto sotto pressione si ha una crepa (veloce). Elettrici sono più casuale, piccole imperfezioni che possono a causa delle condizioni al contorno andare a friggere il dispositivo. **Fault casuale**: fare un'assunzione forte sulla probabilità che un componente si rompa. TABELLA DEI GUASTI.

L'affidabilità di un sistema si modella grazie all'**esperienza**. Nota la funzione di probabilità possiamo ricavare tutte le metriche che vogliamo. Più il prodotto è sul mercato più è affidabile data l'esperienza, si mettono sotto stress fino alla completa rottura, e grazie a questi dati viene fatto un modello statistico. **Funzione di densità di probabilità**, funzione che mi associa al tempo di vita la probabilità che il componente sia risultato funzionante fino al tempo  $t$ . Da questo posso ricavare tutte le altre metriche.

Per creare la funzione di densità, si prendono i dati tabellati dei test sperimentali, ad esempio il componente 1 mi è durato tot ore. Poi si vanno a suddividere i dati in Bin, ovvero in intervalli, con uno spessore e frequenza che dipende dal dataset e si valuta la numerosità. Una volta costruito l'istogramma e approssimando l'istogramma con la funzione continua ottendo la funzione ricercata.

Esempio della tabella, per ogni colonna abbiamo un componente, prendo ogni elemento e lo vado a posizionare con dei bin come vedo nell'istogramma. Mi dice il range di tempo con maggiore probabilità di vita, nell'esempio è circa 50, bisogna avere un numero di elemento tale che l'istogramma diventi molto fitto. A livello pratico se calcolo l'integrale della funzione ovvero tra un tempo e l'altro ottengo la probabilità che  $T$  sia compreso tra i due estremi,  $T$  è il tempo di vita del componente. Per definire l'affidabilità devo andare a definire questa funzione.

#### 3.1 Teoria dell'Affidabilità

Probabilità abbiamo detto che è l'integrale. La probabilità invece che il tempo di vita sia minore uguale del tempo  $T$  è l'integrale da 0 a  $T$ , ovvero la probabilità che il tempo abbia cessato di funzionare entro il tempo  $T$ .

L'**Affidabilità** è la probabilità che una componente funzioni dopo un Tempo quindi è l'integrale tra  $t$  e Infinito. Quindi l'affidabilità è uguale a  $1 - l'$ inaffidabilità.

**Mean Time To Failure** è uguale al valor medio.

Un indicatore che si utilizza molto è il **failure rate**, probabilità che un componente che era in vita fino al tempo  $t$  subisca una rottura nell'intervallo  $\Delta t$  successivo. (Formula slide, si ricava dalla derivata di  $R(t)$ ). L'informazione utile dal punto di vista pratico ha senso se aumentiamo il  $\Delta t$ . Il problema ora dopo le formule è il fatto che non conosciamo la distribuzione, e per andare a stimarla devo andare a portare sotto stress molti componenti e poi fare una stima di quella funzione, quindi c'è un problema tra la teoria e la pratica. Trovare la  **$f(t)$** .

La  $\lambda$  è rappresentata in 3 periodi principale (slide), nella parte iniziale ho un livello alto a causa del fatto che la componente è uscita dalla casa di produzione quindi soggetta ad errori di produzione, invece nella parte finale l'usura ri-aumenta la probabilità. Nei sistemi automatici

questo è il paradigma che bisogna tenere in mente. Nel periodo di vita utile la frequenza con cui avvengono i guasti è costante ovvero avvengono casualmente.

## 3.2 Distribuzioni

**Esponenziale, Weibull.** Nella prima la  $f$  è un'esponenziale, l'affidabilità (senza calcoli) è una semplice  $e$ , ed è decrescente. Il failure rate costante è quello di una distribuzione esponenziale. Ad esempio nelle parti iniziali e finali delle 3 non vale l'esponenziale ma vale la Weibull. Anche per questa l'affidabilità è decrescente, ma il failure rate non è costante ma varia.

### Stima Euristica

Trovare una stima che ci dia un valore, l'affidabilità ragionevolmente la possiamo esprimere come la probabilità che un componente mi funzioni fino ad un certo tempo, allora la posso esprimere come  $n/N$ .

Così facendo posso anche esprimere l'inaffidabilità.

Il failure rate invece lo definisco proprio come prima.

Per ora però tutte le grandezze dipendono dal tempo, quindi si contrae in un indice.

### 3.2.1 Mean Time To Failure

Somma dei tempi operativi dei vari elementi diviso il numero degli elementi presi in considerazione ed è vicino al valore medio se il numero di componenti è molto alto. In caso di distribuzione esponenziale ovvero  $\lambda$  costante il MTTF è  $1/\lambda$ . Il problema il MTTF come indice ha senso solo per la distribuzione di natura esponenziale ovvero se ci troviamo nella sezione di **vita utile**. Tempo medio alla rottura di un componente nel caso in cui si assuma costante il **failure rate**.

A seconda del failure rate possiamo fare una manutenzione basata sul tempo, Slide dei failure rate 6 grafici, che sono i principali grafici di funzionamento. Ha senso pianificare la manutenzione per i primi 3 grafici a sinistra, ovvero la pianifico prima che cominci a risalire il failure rate basandomi sul tempo di vita. Invece per i grafici a destra non si può fare una manutenzione su base tempo, ma bisogna fare una manutenzione in base alla **condizione**. **Connessione in serie**, l'affidabilità può essere fatta da più componenti messe in serie o parallelo ho delle formule che mi permettono di calcolare, in serie tutte devono essere affidabili poichè sono una di seguito all'altra, quindi totale prodotto delle singole componenti,  $\lambda$  totale somma dei failure rate. **Connessione in parallelo**, quando le singole unità non sono affidabili quindi l'inaffidabilità è la produttoria poichè c'è una certa ridondanza.

## 3.3 Manutenzione

Insieme delle azioni necessaria a mantenere o garantire il funzionamento del sistema nelle sue condizioni operative nominali. Tre macro tipologie, Correttiva ovvero operazioni di piccola entità, Preventiva, non aspetto che qualcosa non funzioni ispezione e manutenzione in intervalli prefissati, Proattiva, preventiva in cui gli intervalli non vengono fatti in base a statistiche ma vengono fatti in base ad un algoritmo del sistema.

### 3.3.1 Correttiva

Sulle ascisse tempo, Ordinate stato di salute della macchina, lo stato di salute si deteriora fino alla rottura, se aspetto che il componente si rompa vado a fare la Manutenzione Correttiva UNI EN 13306, in seguito alla rilevazione di un'avaria.



### **3.3.2 Manutenzione Preventiva**

Manutenzione con intervalli predeterminati ma prima di arrivare il guasto intervengo e lo riporto in salute, come il tagliando della macchina. Posso chiedermi quando posso intervenire ad intervalli più lunghi. Livello superiore

### **3.3.3 Manutenzione su Condizione**

Il sistema deve dirmi che sta ancora lavorando entro certe soglie, se lavora nelle soglie non intervengo viceversa invece se il sistema mi indica che non sta rispettando determinati canoni allora intervengo.

### **3.3.4 Manutenzione Predittiva**

Qui invece mi dice una proiezione nel futuro di quando potrà avvenire il failure, quindi posso intervenire in base alla stima che viene fatta al momento di un possibile guasto. Attraverso l'uso di un algoritmo.

In generale nella manutenzione preventiva si divide in Manutenzione predeterminata e Manutenzione sotto condizione che significa fare diagnosi. Diagnosi verifica che il sistema non superi certi limiti di funzionamento. Nel grafico della predittiva è riduttivo ho dei modelli che qualcosa si sta deterioramento, è difficile indicare lo stato di salute della macchina

### **3.3.5 Mean Time To Repair**

Rappresenta il tempo medio necessario affinché un sistema soggetto a guasto venga riparato.

Utile per definire la disponibilità di un sistema con tempo funzionamento\_/tempo totale.

Slide Ciclo di vita di un processo tecnologico non vedere.

## 4 Sicurezza e Integrità di Sistema

L'affidabilità manutenibilità riguardava la produzione, e questo tipo di valutazione viene fatta con indici quantitativi. L'altro aspetto in cui la diagnosi e la prognosi impattano è la **Sicurezza** di un sistema, non causare danni a cose o persone all'interno dell'ambiente in cui il sistema va ad operare. Non causare danni, concetto qualitativo, cosa è un danno o meno. **Dependability** giustifica fare affidamento sul sistema, copre sia l'affidabilità, ma anche sicurezza ed è importante nei sistemi critici. **Integrità**, capacità del sistema di individuare un fault durante il suo funzionamento ed allertare l'operatore umano.

Quando si parla di integrità di sistema si fa riferimento a delle tecniche elencate nelle slide.

**Event Tree Analysis:** analisi ad albero, evento primario che è indesiderato guasto di un componente, e continua su tutti gli eventi ad esso collegati per individuare le conseguenze ad esso collegate. Il grafo è grande perché devono essere considerate tutte le cose a cui è collegato, contiene solamente stati binari ovvero il componente si è rotto il componente collegato si è rotto sì o no. Investigare per capire le conseguenze degli eventi, il suo scopo è quello di mitigare gli effetti del guasto primario. Può essere vista anche come un'analisi a catena dei guasti

**Fault Tree Analysis:** failure del sistema completo e determina le cause che lo hanno generato, scala sui sotto componenti al fine di cercare cosa ha provocato la failure del sistema. Ci sono porte logiche con and e or e poichè il suo scopo è quello di investigare i guasti che portano la rottura e se la probabilità di rottura è molto alta allora mitigo. Qui previene in fase di progettazione mentre prima era per mitigare i fault. VEDERE APPUNTI

**Failure Mode And Effects Analysis:** produttore di un componente o un produttore di componenti, una lista di tutta la componenti utilizzate, tutte le tipologie operative, di tutti i guasti dei prodotti, e in base a tutti i dati ricavate le cause, da ogni guasto descrivere gli effetti sul sistemi e per ogni guasto descrivere le contromisure considerando un guasto alla volta. Utilizzata in fase di progettazione e prototipazione e si usa in concomitanza con la FTA, faccio la FMEA per tutta la componentistica poi faccio la FTA e riprogetto i nodi legati a quel componente e miglio la sicurezza del sistema.

**Failure Mode, Effects and Critical Analysis:** estensione della FMEA che considerare l'importanza di ogni guasto e considera la probabilità del guasto e l'effetto del guasto sul sistema andando a calcolare il **rischio**, velocità di rilevamento, quindi si basa su questi indici ed è più approfondita rispetto a prima. Tabella con un certo numero di colonne con tre indicatori quantitativi e le contro azioni ed è fatta per ogni componente del sistema.

Procedure per andare a gestire i guasti, adesso dobbiamo introdurre il concetto di danno **Hazard:** condizione con potenzialità di causare o contribuire a causare un danno, situazione di pericolo. **Hazard Analysis** ci permette di requisire informazioni informazioni che possono portare il sistema a danno o a fare in modo che ci siano guasti pregiudicando la sicurezza del sistema. Dalla FMEA si vanno a prendere tutte le info con un alto livello di criticità e si vanno ad identificare quelle con un alto rischio, e una volta individuare su quelle e solo su quelle si vanno a fare un FTA, eventualmente riprogettare il sistema, viene fatto più e più volte.

### 4.0.1 Classificazione del rischio

Allo scopo di fare questa classificazione **Rischio**, probabilità per la gravità di un hazard, ovvero probabilità per impatto. Si introduce una classificazione in cui la probabilità del rischio viene classificata con 6 livelli, la gravità del rischio invece con 4 livelli, e la valutazione del rischio è una combinazione tra queste due, e queste tre le riassumiamo in altrettante tabelle. 4 tassi di rischio **Intollerabile**, **Trascurabile**, occhio a quelle intermedie, Classe 2, Classe 3 (SLIDE).

Schema come garantire se il sistema mi avvisi che c'è un problema. Partiamo da FMEA c'è questo elenco chilometrico riguardante tutti i possibili guasti cause e probabilità di accadimento,

a questi guasti segue un'hazard analysis, selezione al fine di estrapolare soltanto quei guasti che sono pericolosi, poi si lavora in parallelo, FTA una sui guasti che accadono di più, l'altra solo sui guasti di safety per la sicurezza, si scende si riprogettano quei componenti che in base a sicurezza e affidabilità non le garantiscono, quando raggiunto posso migliorare ancora la tolleranza ai guasti con la Fault Tolerance desing, dopodiché dopo che abbiamo eliminato ciò che era necessario in fase di progettazione i guasti in possono ancora accadere, che possono andare ad influire su sicurezza e affidabilità, dopo ci sono guasti che non possono essere previsti invece altri in cui posso effettuare **supervisione e sicurezza**.

Normativa(non viene chiesta all'esame), come tutta la normativa ce ne sono 3 e ognuna copre una parte con un'overlap sulle altre:

- **Analisi del rischio:** la capacità di una macchina di eseguire la sua funzione prevista durante il suo ciclo di vita ove sia adeguatamente ridotto al rischio. Fornisce un paradigma di lavoro che abbiamo quasi già visto. La valutazione del rischio si vanno a vedere i limiti del macchinario, si fa la fase di hazard, poi si stima il rischio e alla fine si dà la classe di rischio. Nel caso **riduzione del rischio**
- **ISO 13849:** affidabilità del sistema di controllo relativo al sistema di sicurezza, parte del sistema di supervisione che va ad innescare quelle azioni di riconfigurazioni, nello schema generale la parte in giallo. **Performance Level**, livelli di performance catalogati in alfabeto in risposta a guasti pericolosi che si basa su un determinato standard denominato PFHd.
- **IEC 62061:** si estende sulle macchine elettriche pneumatiche e idrauliche, qui non c'è il performance index ma un altro indice creato per il caso. SIL, livello discreto uno di tre possibili.

## 5 Modellazione di Processi e Segnali

APPUNTI SUL QUADERNO per iniziare. Per vedere le tecniche di modellazione per i modelli di processo abbiamo bisogno della teoria di come si modella un processo, e per l'analisi del segnale servono i concetti alla base di teoria dei segnali.

Siamo partiti dalla modellazione dei processi e siamo andati a vedere lo schema, nello schema il **Processo** è attuato da una serie di attuatori che forniscono l'ingresso al sistema, e una serie di sensori che legge i valori del processo. I guasti possono avvenire negli attuatori, processo, sensori e agiscono insieme ai rumori che è sempre presente nella pratica. Quindi prendiamo gli ingressi, prendiamo le uscite e le andiamo ad utilizzare nel simulatore del processo che provengono dal modello matematico del processo. Una volta utilizzate nel simulatore andremo ad utilizzare l'output per generare un segnale con un'informazione diagnostica. Variazione di un parametro, del residuo o dello stato. Individuazione del cambiamento per poi generare il sintomo. Negli appunti abbiamo visto la rappresentazione sia a tempo continuo sia a tempo discreto e abbiamo fornito le equazioni di partenza sia nel tempo sia la loro rappresentazione ingresso uscita con le funzioni di trasferimento con le trasformate di Laplace e Z. Alla fine degli appunti poi abbiamo continuato con un caso specifico si equazione differenziale di secondo grado e abbiamo ricavato una funzione di trasferimento e rappresentazione a spazio di stato. (Sono 3 modi diversi per rappresentare il nostro sistema, funzione di trasferimento, equazione differenziale, spazio di stato).

**Guasti:** li abbiamo classificati o da un punto di vista temporale, incipient ovvero rampa, e guasti di tipo abrupt che possono essere rappresentati come gradino, le multifunction invece sono dei guasti intermittenti. Gli Abrupt sono guasti improvvisi e mediamente più facili da rilevare, quelli incipient sono difficili solitamente degradazione. I Guasti intermittenti sono gli abrupt che vanno avanti e indietro. Per fare in modo di rilevare gli intermittenti bisogna fare in modo di andare a modificare i valori del sintomo, provoca problemi su falsi allarmi. Classificazione in base al loro comportamento temporale, ma anche come compaiono del sistema, **Additivi**, per i quali in uscita la variabile è pari a quella senza guasto (nominale) più il guasto, in questi è immediato vedere il cambiamento è indipendente da ogni altro segnale che non sia il guasto, **Moltiplicativi** mi va a cambiare qualcosa che è dentro al sistema, quindi fa la moltiplicazione di un parametro mi va a cambiare quel parametro, l'uscita mi va ad essere influenzato dall'ingresso e dal parametro, quindi se l'ingresso è zero allora non posso rilevare il guasto, devo tenere in considerazione l'ingresso in questo caso.

### 5.1 Guasto sui sensori

Partiamo da un sensore, in un sensore in giallo, il valore reale  $y_0(t)$  viene elaborato e restituisce un segnale elettrico, il risultato può essere disturbato dalle variabili esterne o interne, quelle esterne sono simili a quelle del valore reale, ad esempio pressione sto misurando ma vicino c'è un altro dispositivo che riscalda e mi va ad interferire la misurazione, quelli interni invece sono dovuti all'invecchiamento e nascono dal fatto che il componente si usura. Modellare staticamente o dinamicamente il sensore, statica la relazione tra uscita e ingresso è istantanea senza memoria, viceversa per quella con memoria. I sensori solitamente sono modellati bene. Nella modellazione statica ho i coefficienti che mi legano l'uscita ideale quella reale, in quella dinamica invece dove il numeratore è una costante e sotto polinomio quindi equazione differenziale di grado 1. In quella statica il disturbo può essere visto come un guasto additivo perché si somma all'ingresso, il disturbo esterno  $z_2$  invece mi va a moltiplicare e va a cambiare i parametri quindi è, moltiplicativo. Calibrazione additivi, Usura moltiplicativo. Per la sensoristica sono i guasti di tipo additivo. Un modello di sensore dinamico con una funzione di trasferimento ha che un guasto che potrà agire sui parametri quindi modificando il guadagno riducendo il valore, oppure

può influire sul tempo che il sensore ci mette per andare a regime.

## 5.2 Guasto sugli attuatori

Prendiamo una servovalvola viene amplificata, l'uscita dell'amplificatore è un'uscita che stimola il magnete, l'elettromagnete mi va a spostare un otturatore, l'otturatore mi va ad aumentare l'area di sezione della valvola, se aumento o diminuisco la sezione aumento o meno la portata. Con una approssimazione molto grande m' può essere modellata come una tensione di comando, se il guasto di verifica su  $c_0$  allora è additivo mentre gli altri due sono di tipo moltiplicativo.

## 5.3 Modelli per processi

I modelli possono essere di due tipi, **Modelli Teorici** con leggi della fisica e della matematica, equazioni di bilanciamento di massa ed energia, equazioni della dinamica, equazioni di bilancio energetico, tutte equazioni di carattere fisico e provengono dal modello del processo. **Modello sperimentale**, può essere costruito partendo dalle misure degli ingressi e delle uscite **identificazione**, tramite modelli parametrici.

### 5.3.1 Sfumature modelli

I modelli teorici danno origine a quelli whitebox, ovvero conosciamo le leggi della fisica ma non conosciamo bene i parametri, i modelli black box uso gli ingressi e uscite per generare le leggi matematiche, ma non ho conoscenza cosa quella matematica mi da. Nel mezzo ci sono le classi di modellazione, grey model light si prendono le leggi della fisica e parametri sconosciute e grazie alla stima dei parametri tramite equazioni differenziale modus operandi efficace, oppure posso partire dalle regole della fisica note ma utilizzo segnali misurabili non ho un'equazione dark-grey.

## 5.4 Modello di processo statico

L'uscita è una funzione degli ingressi e di alcuni parametri, nell'esempio relazione di tipo polinomiale, un fault additivo mi va a modificare beta zero, mentre un fault moltiplicativo va a modificare gli altri beta.

## 5.5 Modello di Processo dinamico

Partendo dalla relazione differenziale si va a ricostruire la funzione di trasferimento esempio sul quaderno, nella parte in basso c'è una rappresentazione con  $f_i$ , ma questa raccolta di termini servirà per la parte di identificazione. Un guasto può essere sia moltiplicato che additivo, poiché abbiamo memoria può essere sempre moltiplicativo anche se va ad influire su un parametro non direttamente collegato all'ingresso. Molto più soggetti ad errori moltiplicativi.

## 5.6 Modello di un processo lineare stazionario

Rappresentazione più generale,  $b$  piccolo e  $c$  piccolo perché siamo in un sistema SISO, ma vale anche MIMO, per guasti additive si introducono delle somme, contributo che si somma sia su  $x$  punto che su  $y$ , guasto in  $x$  sullo stato. Nel caso di guasti moltiplicativi la modellazione è fatta modificando le matrici di transizione  $A, B, C$  in queste matrici avvengono le variazioni.

## 5.7 Analisi sui segnali

Quando il modello non è rilevabile allora vado a vedere il segnali, segnali di natura **periodica**, acquisizione di macchinari con comportamento oscillatorio o ciclico, macchine rotanti, altri invece sono **segnali di natura aleatoria**, flussi di turbolenza etc. Bisogna distinguere in che dominio si sta lavorando, se il segnale nel tempo mostra un segnale periodico di vanno ad analizzare ampiezza frequenza e fase, se invece **segnale stocastico** l'altro si valutano le proprietà statistiche come media e varianza.

**Segnale periodico:** ad ogni periodo  $T$  si ripete ugualmente, ed un'oscillazione, ampiezza massimo per il seno di una  $\omega_0$ ,  $\omega_0$  pulsazione, più uno sfasamento. Le tre caratteristiche saranno i tre indicatori da calcolare per capire se ci sarà guasto. La forma più semplice di un'oscillazione completa è la sommatoria di tante oscillazioni smorzate (Fourier). Se c'è un guasto il guasto entra in una variabile che è periodica e quindi è come se fosse un'informazione modulata, se il segnale portante è alterato da una seconda oscillazione ovvero il fault ovvero segnale modulante con un'ampiezza diversa e una pulsazione diversa. Un caso di un guasto oscillante e mi va ad impattare sull'ampiezza questo guasto lo potremmo vedere analizzando le frequenze del segnale risultante. Se invece il guasto va sulla frequenza vado a modificare  $\omega_0$  che viene moltiplicato per un nuovo segnale moltiplico per il segnale modulante il mio segnale iniziale. Nella fase invece vado a sommare un contributo di fase causato dal guasto.

**Beating:** segnale che si crea sommando due oscillazioni di frequenza angolare ridotta e con la stessa ampiezza. Due pulsazioni identica con una piccola differenza di frequenza tra di loro si ottiene questo segnale nominato battito. Un guasto è andato a sommare a quel segnale con una frequenza poco più grande o poco più piccola.

Se il sistema che stiamo analizzando è lineare e l'ingresso è sinusoidale, l'uscita è qualcosa di oscillante con la stessa frequenza, se fosse non lineare qui si generano nuove frequenze secondo le combinazioni nelle slide.

Se i segnali sono di natura aleatorie si vanno a prendere in considerazione sono altre caratteristiche, segnali **stazionari** che non dipendono dalla probabilità, ed **ergodici** media statistica coincide con la media temporale per periodi molto lunghi. Valor Medio, Varianza. Se invece di considerare un singolo segnale ne consideriamo di più quello che viene utilizzato come segnale di riferimento è la cross-correlazione che esprime la correlazione tra due segnali. Tra i segnali stocastici c'è il **rumore**, densità costante per tutte le frequenze (no rappresentazione matematica), il rumore in un segnale significa che il segnale utile è sporcato da qualcosa con densità di potenza costante che mi toglie info e più aumento la frequenza più mi porto sporco dietro.

Riprendendo il discorso sui segnali stocastici, quando un segnale non è periodico ma è **stazionario**, ovvero nel tempo non mi sembra avere un comportamento apprezzabile con tanto rumore sopra al segnale, ovvero un segnale aleatorio, il rumore copre il valore utile di segnale. Si va a valutare un processo aleatorio in una finestra temporale, e vengono calcolate valore medio varianza, autocorrelazione e autocovarianza. **Segnali stazionari:** non cambiano nel tempo, **Ergodici** slide. Ogni qual volta facciamo un troncamento si introduce un **bias**, un errore nella caratteristica che andiamo a valutare che dipende dal campione che siamo andati a valutare nel processo aleatorio.

## 6 Rilevamento a soglia

Limit Checking o Tresholding in inglese. Alla base di tutte le altre tecniche, verrà utilizzata in modo più particolare per gli altri metodi di rilevamento. Facendo riferimento allo schema con tutte le tecniche siamo nella parte più a sinistra, trend checking e limit checking. Partiamo dal caso più semplice di un segnale che varia nel tempo con un soglia, il modo più semplice consiste nel misurare la variabile che più mi interessa, vedere come varia nel tempo, e confrontarlo con un valore di soglia minima e massima che per me risulta essere corretto. Fino a che il mio segnale è sotto alla soglia ho lo 0, quando viene superato diventa 1 e rimane 1 finché non torna sotto soglia, stessa cosa se si supera la soglia dal lato opposto. Si fa un confronto col valore istantaneo e quello delle soglie.

Le soglie bisogna fissarle, sono create sulla base dell'esperienza e sono un frutto di un compromesso, se la settiamo troppo bassa si generano degli allarmi quando in realtà non c'è, **falso allarme**. Se invece la soglia la prendo troppo alta, non rilevo il guasto, ho un **mancato allarme**. Il problema non si innesca nel segnale, ma nel segnale non è pulito ma è un segnale rumoroso, il problema sta nel fatto che il segnale può essere affetto da *rumore* ci può andare a generare un falso allarme o un mancato allarme, devo mettere la soglia in una via di mezzo. Si genera anche una seconda cosa, ovvero quando ci accorgiamo del guasto dopo un certo tempo, c'è un **tempo di rilevamento del guasto**, ovvero il tempo da quando si verifica il guasto e quando viene rilevato. Più abbasso la soglia più il tempo di rilevamento del guasto diventa piccolo, però rischio di avere falsi allarmi, però se la alzo il tempo di rilevamento sale. Devo trovare un **trade-off** e questo me lo dà l'esperienza.

Se invece del valore istantaneo volessi utilizzare un segnale più pronto, cosa posso fare, per avere più prontezza, di utilizza la *derivata*, e invece di considerare il valore istantaneo vado a considerare come il segnale varia nel tempo, quindi invece che sulla  $y$  la vado a fare sulla **derivata della  $y$** , e la valutiamo con le soglie minime e massime. Del segnale reale tuttavia quando faccio la derivata se è rumoroso non mi dà informazione utile, perché il rumore cambia in maniera repentina casualmente. Va bene usare la derivata ma per i segnali poco rumorosi, nel caso in cui voglio utilizzare entrambi i metodi utilizzo la **Combinazione valore istantaneo e derivata**. La troncatura nel grafico  $y_{max}$  e  $y_{min}$  rappresenta il fatto che il valore istantaneo è alto ma la derivata è negativa, e viceversa, evito delle zone in cui nel giro di pochi campioni uscirebbero comunque.

### 6.1 Soglie Additive

La soglia può essere scelta come non costante ma si adatta al mio **residuo**, ovvero al mio segnale diagnostico, supponiamo nel grafico che il nero sia il mio segnale, blu è la soglia, vediamo che con la soglia blu in un punto potrei pensare di avere un guasto, c'è un mancato allarme, se invece utilizzo quella rossa, l'indipendenza dal guasto tende a smussare le variazioni naturali del segnale, il rilevamento del guasto avviene in un altro punto. Lo scopo è di minimizzare falsi allarmi, è molto difficile da generare, si prende il segnale diagnostico in ingresso, lo si moltiplica per un certo coefficiente per  $u$ , si va a sommare con un altro valore costante  $C$ , un valore di soglia valore minimo, dopo devo generare una soglia che dipenda dall'ingresso  $C2$  per  $u$ , poi si aggiunge una terza componente filtrato a partire da  $U$  e ha il compito di considerare il rumore, poi passa attraverso il filtro passa basso. Il filtro è un circuito selettivo in frequenza, blocchetto che fa passare solo le componenti del segnale a bassa frequenza. Viene messo qui perché voglio che la soglia sia smussata e non rumorosa come il segnale. La difficoltà sta nella taratura di tutti i parametri nello schema.

## 6.2 Rilevamento della soglia Off-Line e On-Line

Tra le due la diagnosi quella fuori linea viene fatta solamente dopo che viene visto tutto il segnale e scaricato, in linea invece il macchinario sta misurando il segnale fa la diagnosi. Fuori linea sarà più facile perché abbiamo più informazioni e una panoramica totale del segnale, mentre in linea devo fare una valutazione in tempo reale senza sapere cosa succederà tra poco. La diagnosi fuori linea può servire ad esempio in un processo chimico o termico dove il datalog viene fatto dopo diverse ore, o quelle temporali a distanza di giorni. L'utilizzo dei due dipende in quanto tempo devo fare diagnosi.

## 6.3 Soglie binarie

Se il segnale è pulito l'utilizzo della soglia è buono, ma nel mondo reale ed elettrico tendono ad essere molto rumorosi, e quindi bisogna decidere dove mettere la soglia. Se coperti da rumore non possono essere utilizzate con soglie normali, ma con **Soglie Binarie**. Un guasto su una variabile aleatoria mi può fare tre / quattro cose, mi cambia completamente la distribuzione di probabilità, oppure mi cambia il valor medio (molto probabile), oppure mi può variare la varianza quanto variano i valori intorno a quello medio, l'ultimo quando cambiano entrambi. Se questo accade posso pensare che c'è un guasto nel mio sistema. La forma dei grafici è data dalla distribuzione, la larghezza della campana è la varianza, in mezzo è il valor medio.

Bisogna andare ad utilizzare il **test ad ipotesi**, per capire se sta variando il centro della campana, o se mi si sta allargando o variando. Vuol dire che il segnale mi si sta alzando o abbassando, oppure se mi si sta diventando più forte o più debole. Un guasto può andare a modificare un parametro, creo dei test che verificano un'ipotesi  $H_0$  non c'è guasto, l'ipotesi alternativa è che c'è un guasto.  $H_0$  è rifiutata quando i campioni della variabile misurata escono dalla regione di valori accettati. (Grafico della gaussiana, con esempio del test). **Ipotesi statistica**, affermazione che specifica parzialmente o completamente la distribuzione della probabilità di una variabile casuale. L'ipotesi da verificare è l'**ipotesi nulla**. Vedere il procedimento per eseguire il test d'ipotesi. Se il test è positivo viene accettata l'ipotesi  $H_1$ . Il test binario va a valutare le proprietà statistiche del segnale che sto valutando.

A prescindere dall'esito del test possono verificarsi 4 casi, i due migliori c'è guasto me ne accorgo e non c'è guasto e me ne accorgo ovvero gli esiti sulla diagonale della tabella, gli altri due sono errori,  $H_0$  se viene accettata è un *falso allarme*, parametro che si utilizza comunemente, se un allarme genera delle contromisure le contromisure hanno un costo sia economico che di sistema, il guasto 2 è la potenza del test, meno importante perché se non me ne accorgo adesso però me ne accorgerò tra poco, quindi meno importante.

### 6.3.1 Z-Test

Lo Z-Test mi va a calcolare un rapporto che è la media del campione meno la media della popolazione diviso l'errore standard normalizzato su radice di  $N$ , dove  $N$  è il numero di campioni che sto analizzando. Se il risultato del test cade all'interno di un certo range l'accettiamo, se cade fuori la scartiamo, se andiamo a fare la funzione di probabilità della variabile otterremo la campana, più il test di avvicina allo zero più è simile alla media, quindi ci dice quanto devo essere lontano dal valor medio da poter dire che fa parte di un'altra gaussiana.

L'area verde viene determinato dal **livello di significatività** del test, accetto o rifiuto  $H_0$  con un livello di significatività della percentuale 5% oppure 10. Confrontando lo Z-Test con un valore tabulato dico che c'è o meno un test.



### 6.3.2 T-Test

Quando non conosciamo la varianza, abbiamo sigma cappello, deviazione standard stimata pensando che sia la stessa del campione, ovvero ti do i valori e la varianza te la calcoli in base al campione. Il T-Test si usa quando il valore del campione è ridotto, meno di 30, oppure quando la varianza non è nota. Per trovare il valore di riferimento sia per lo Z sia per il T devo utilizzare una tabella, sulla colonna c'è un numero df che indica il grado di libertà del campione, le altre invece sono caratterizzate da una t con un pedice che indica il livello di significatività.

Il test valuta solo ed esclusivamente la variazione del valor medio, se il livello di significatività la soglia del livello di significatività sale o scende? Al diminuire del livello di significatività ho più difficoltà a dire che  $H_0$  è rifiutata. Ho più difficoltà a dire che ho un guasto. Più è basso il livello di significatività più  $H_0$  è accettata. Nella pratica di solito si calcola il **p-value**.

### 6.3.3 Chi-Squared Test

Valuta la varianza, rapporto tra la varianza stimata sulla base del campione e la varianza della popolazione. Se prendete delle variabili casuali indipendenti abbiamo una tavola di distribuzione come in figura. Tra le varianti c'è un Chi-Squared Goodness of Fit Test, non valuta se è variata la varianza ma un'altra cosa, ma mi dice se è cambiata la distribuzione di probabilità.

## 6.4 Run-Sum Test

Si fa il confronto tra il mio segnale e il valor medio della popolazione, istante per istante, e le differenze vengono sommate e vedo quante volte è maggiore del riferimento, se questa somma supera una certa soglia triggero l'allarme, oppure conto quante volte il campione allo stato attuale è maggiore a quello precedente. L'alternativa è quello di assegnare un punteggio, il punteggio.

### 6.4.1 Test di credibilità

Sono dei test del tipo If Then Else. Vedere la slide.

## 7 Rilevamento guasti mediane analisi dei segnali

### 7.1 Segnale-Based Fault Detection

Molti segnali mostrano oscillazioni, se i cambiamenti dei segnali sono legati ad un guasto si può andare direttamente ad analizzare il mio segnale, sia misurazione di natura meccanica ad esempio posizione, velocità accelerazione, fuori dai parametri meccanici invece segnali di tipo elettrico come correnti o tensioni.

A prescindere dal segnale quel segnale avrà una natura periodica e quello che si fa è acquisire un po' di segnale, utilizzo il segnale come baseline come confronto con quelle off-line, per poi confrontarle con quelle online. Le tipologie di modello, **parametrici**, identificazioni in cui il modello in frequenza ha una struttura definite, **non parametrici**, utilizzo degli **spettri di frequenza**.

Come opera logicamente il rilevamento con i segnali (schema), siamo sempre nel nostro processo, attuatori, analizzo il mio segnale, e devo sapere se è un segnale periodico o stocastico o non stazionario, genero le feature, e lo vado a confrontare con l'omologa feature del mio comportamento nominale calcolato prima.

Dall'ampiezza, frequenza e fase è possibile determinare se nel sistema c'è un guasto.

#### 7.1.1 Filtraggio a banda passante

Appunti sul quaderno. Il rilevatore amplifica il mio segnale e viene filtrato in dei filtri che sono tutti centrati ad una frequenza diversa, poi tutti i valori vengono presi in considerazione e viene calcolato il **valore quadratico** medio di tutti i segnali. Se c'è un guasto su una certa frequenza, al valore quadratico medio cosa succede? In tutti i segnali in cui il range di frequenze non include le frequenze del guasto il valore quadratico medio è invariato poiché indipendente da quella frequenza, quindi cambia solamente il valore quadratico medio della frequenza interessata. L'ideale è fare un filtro per ogni singola frequenza, prendo sia il guasto che la frequenza dove si trova, ma lo strumento deve saper calcolare lo spettro del segnale e bisogna utilizzare il dominio di Fourier.

Poi è stato necessario introdurre un'analisi più fine con la trasformata di Fourier, ci sono alcuni passaggi per i segnali campionati. Ci sono delle approssimazioni introducono dei problemi di natura pratica. La trasformata di Fourier è il limite delle slide, è definita in maniera identica a quella di Laplace. La trasformata è detta spettro del segnale con un modulo e una fase. Se prendiamo un segnale limitato nel tempo, ovvero un segnale che ha una variazione brusca e andiamo a fare la trasformata di  $F$ , è illimitata in frequenza, ovvero lo spettro è illimitato. Dopo l'energia di un segnale, ovvero l'integrale del segnale al quadrato, può essere scritta in funzione della sua trasformata di Fourier. Appunti quaderno. L'**Errore di Leakage**, poiché a finestrare il segnale originale con  $N$  campioni, la  $y$  troncata in frequenza è la convoluzione di due segnali. Abbiamo uno spettro diverso a seconda del numero di campioni, più diminuisce il numero dei campioni più il picco si allarga e quindi abbiamo una distorsione, dispersione della frequenza su quelle vicine, si possono utilizzare le **troncature a finestre morbide** per migliorare.

Se allargo la finestra è chiaro che la formula che vado ad implementare mi va ad appesantire la computazione. Con finestre piccole può capitare di non prendere alcune distorsioni dei segnali e di conseguenza i guasti.

Il segnale di  $Y$  di  $t$  sia stazionario, se prendo una finestra del segnale, alla fine la  $Y$  che calcolo è sempre la stessa, abbiamo un segnale che le caratteristiche in frequenza rimangono costanti nel tempo, se il segnale **non è stazionario**, oltre che ad introdurre una nuova frequenza ne introduce una che cambia nel tempo, se faccio la trasformata di Fourier genererò uno spettro del segnale che è una media delle frequenze di quella finestra, non capisco se un guasto sta

rovinando la frequenza, per evitare questo si possono utilizzare due metodi, metodi nel dominio del tempo-frequenza, **STFT**, **trasformata wavelet**.

**STFT**: trasformata di Fourier della  $y$  di  $t$ , cambia che c'è una  $f$  di  $t$  meno  $\tau$ , una funzione che viene valutata con una finestra con  $\tau$ , la mia trasformata non dipende solo da  $\omega$  ma anche dal tempo e dal ritardo, e mi cattura le frequenze che variano nel tempo. Mi costruisce lo **spettrogramma**, ascisse tempo, ordinate frequenza, e il colore è il risultato della trasformata di Fourier in ampiezza. Se ho come nell'esempio 4 sinusoidi che variano nel tempo con frequenze diverse, vado a fare uno spettrogramma variando la mia finestra e man mano che la finestra va ad incorporare tutto il segnale, più riesco a distinguere il mio segnale tempo frequenza, vorremmo ottenere uno spettrogramma che in corrispondenza della frequenza ha un valore unitario nel momento in cui il segnale ha quel valore in quella frequenza. Se c'è un guasto faccio lo spettrogramma, e confronto i vari spettrogrammi, per  $t$  che tendo a zero ho la Fourier classica.

**Trasformata di Wavelet**: introduciamo un grado di libertà in più, andiamo ad utilizzare una funzione denominata **di base**, e sono caratterizzate sia da una traslazione del tempo sia da una dilatazione  $a$ . E si applica la stessa formula di prima con un grado di libertà maggiore. Le wavelet che possono essere utilizzate sono quelle negli esempi. L'uscita di una trasformata Wavelet è, dato un segnale con un impulso supponiamo un guasto e utilizzo una Haar l'effetto è un diagramma che ha sull'asse delle ordinate i valori di scala, sulle ascisse il tempo  $\tau$ , scompare il concetto della frequenza, e sull'asse colore ha i coefficienti associati alla trasformata, dove c'è il rosso ho il mio segnale wavelet è più simile possibile al segnale che sto analizzando.

Se il segnale è periodico, possiamo fare la Trasformata, se non è periodico abbiamo fatto la supposizione che tutta la potenza è localizzata, quando la trasformata non mi dà una buona informazione, posso studiare al suo posto la **autocorrelazione**, la potenza associata allo spettro non è altro che la trasformata dell'autocorrelazione. Prendo una finestra calcolo l'autocorrelazione, e ne faccio la trasformata di Fourier, è un altro modo per generare la feature. Mi genera la **Densità di potenza spettrale**.

## 8 Rilevamento Guasti Mediante Tecniche Di Identificazione

Si basano sulla presenza di informazioni collegate al modello. I modelli in cui assumo nota la struttura e vado a stimare in base ai segnali misurabili sono i **grey-box**, sono i più diffusi. Posso andare ad assumere no conoscenza del modello però cerco un modello esterno tramite le valutazioni di ingresso e uscita che mi simula il sistema **black-box**. Noi ci mettiamo nel caso iniziale nel grey-box e black-box mentre nel caso white-box equazione di parità e tecniche basate sull'osservazione. VEDERE APPUNTI IDENTIFICAZIONE.

Quello fatto fino adesso, processi lineari di cui assumiamo la forma e siamo andati a fare i minimi quadrati. Il modello nella slide modello errore di equazione.

Un altro metodo, schema, succedeva quello di prima sopra processo in rosso, sotto non ho l'approccio a errore di equazione, ma sto calcolando l'uscita del mio modello, faccio trasformare l'ingresso con la funzione di trasferimento e faccio la differenza con l'uscita misurata. I parametri mi compaiono sia al numeratore sia al denominatore, quindi l'equazione non è più lineare nei parametri, è qualcosa del tipo errore dato da un prodotto e un quoziente di parametri,  $xa/xb$ , è non lineare nei parametri e non può essere risolto in forma chiusa come prima. L'errore di equazione si può calcolare offline, questo invece viene risolto con un algoritmo iterativo, è preferito perché permette di avere stime migliori però i tempi viceversa aumentano. **Tecnica dei minimi quadrati sull'errore in uscita**

Un'altra opzione è quella riguardante l'utilizzo della forma **ricorsiva** dei minimi quadrati. La forma ricorsiva permette di stimare i parametri andando a ridurre l'impatto computazionale di ogni singolo passo perché permette di tenere traccia di ogni passo fino al precedente. La stima

che faccio all'istante successivo, è la stima al passo precedente, più la differenza tra l'uscita che misuro adesso e la predizione che ottengo dall'utilizzo dei parametri stimati fino al passo precedente. Lo vado a pesare per un fattore di correzione. Il fattore di correzione va scelto con una certa logica, se il processo cambia velocemente posso prenderlo più grande ma se c'è rumore devo trovare un trade off. Le formule del fattore di correzione no. L'algoritmo si inizializza il vettore dei parametri a 0, si sceglie la matrice  $P$  che determina il fattore di correzione, fisicamente è la matrice di covarianza dell'errore sui parametri, se ha coefficienti piccoli l'errore di stima è piccolo e viceversa,  $P$  e  $\gamma$  sono direttamente proporzionali, prendo una matrice di identità. Prendo l'uscita del sensore vado a calcolare la matrice dei dati si prende  $\gamma$ , poi stimo i parametri al passo successivo. La matrice si autocalibrerà.

Si può anche cambiare la struttura, **ELS**, variante minimi quadrati estesi, prendere invece che un modello ARX un modello ARMAX, cambia che mentre prima avevamo solo i coefficienti di  $A$  e  $B$ , adesso abbiamo anche i coefficienti  $D$ . Quindi avremo le stime degli errori calcolate con quelle ottenute fino al passo precedente.

Avendo un dataset lo importi nel calcolatore, utilizziamo un algoritmo dei minimi quadrati, bisogna scegliere l'algoritmo, quindi bisogna dire se fare errore di uscita, equazione oppure se in maniera ricorsiva o non ricorsiva, lanciando l'algoritmo ottengo la stima.

**Il limit checking verrà fatto sui parametri per verificare se c'è un gusto o meno.** Queste tecniche sono efficaci sulla stima della degradazione di un componente.

## 8.1 Processi Non Stazionari

Nel mondo non lineare si aprono molte possibilità, la complessità per generare modelli risulta essere molto alta. Quando il sistema è non lineare abbiamo un grande problema, l'approssimazione lineare non funziona, due possibilità: non lineare e varia lentamente, che posso continuare un po' utilizzare tecniche lineari oppure cambia bruscamente e non riesco ad approssimare correttamente.

**Cambiamenti con molta lentezza:** per grandi tratti approssimabile con sistemi lineari, aggiungo un fattore di memoria, quindi l'errore che vado a minimizzare adesso sarà un quadrato dell'errore pesato, il peso lo scelgo in funzione di quanto il mio sistema sta variando velocemente. Il peso lo scrivo come un valore compreso tra 0 e 1 elevato all'istante di campionamento in cui mi trovo, il peso diventa tanto più piccolo quanto quel campione diventa distante, se il peso è piccolo significa che voglio dimenticare i valori passati.

**Cambiamenti veloci:** quello che si fa è o andare sui modelli a struttura parametrica non lineari, oppure vado a fare un'identificazione su reti neurali.

- Primo metodo: sulle non lineari se il sistema è non lineare ma statico, ovvero che gli ingressi e le uscite sono legate da una relazione non lineare ma non abbiamo memoria, quindi abbiamo una relazione polinomiale posso andare a riscrivere il problema nella stessa maniera dei minimi quadrati. **Problema di regressione.** Dati molti punti andare a creare una legge che determina l'andamento dei punti. Vettore degli ingressi all'istante  $K$  con la loro potenza, e il vettore dei parametri con tutti i parametri possiamo utilizzare a utilizzare il problema come lineare dei parametri e determinare i parametri con la pseudoinversa. La limitazione è il fatto che abbiamo preso solo il caso statico.
- Se il sistema è non lineare e dinamico, bisogna utilizzare modelli parametrici non lineari, caratterizzati da polinomi ingressi con le loro relative potenze. (Bastano questi appunti), Trovare un modello che soddisfa le strutture nella slide di Hammerstein è difficile ed è un sotto-caso. Allora si adottano tecniche di intelligenza artificiale, come le **reti neurali**. Tecniche tra model free e model based, utilizziamo i dati per creare un modello

per il confronto e il modello viene creato dai dati. Invece che cercare una struttura gerarchica, invece determino dagli elementi funzionali il modello gerarchico. La natura di ogni connessione determina l'esito complessivo della rete che dati p ingressi restituisce m uscite, se opportunamente addestrata assomiglia molto al sistema reale. La natura della rete neurale artificiale nasce come approssimatore universale di una generica funzione non lineare, perché i sistemi non lineari sono difficili da modellare. Dai dati impara con l'addestramento, la rete artificiale è un identificatore. La rete in fase di addestramento andrà a settare pesi e connessioni così nel dataset di riferimento le mie uscite siano simili a quelle del dataset di riferimento. Una volta addestrata la rete ho la mia black box. **Cose positive:** non lineare, interconnessione dei neuroni e la funzione è sigmoide. Mi permette di mappare più ingressi a più uscite naturalmente. Adattiva perché se il mio sistema cambia posso riaddestrare il cambiamento. Tollerante ai guasti. **Cose negative:** limite di tutti i sistemi, apprende dai dati non può sfruttare le relazioni funzionali di modello fatte dagli ingegneri, se qualcosa è molto diverso dai dati di addestramento c'è un problema. Modello del neurone, quello che si trova nel blocco nero, operatore di ingresso che è una funzione che va ad associare gli ingressi ai pesi, o somma dei prodotti oppure la norma, quindi o il prodotto scalare oppure quanto i due vettori sono distanti tra loro, presi gli ingressi e noti i pesi mi va a generare un livello di attivazione del neurone x, mi va ad essere combinata con la funzione di attività e genera l'uscita del neurone e poi c'è una funzione di attivazione che determina la funzione del neurone. I neuroni sono connessi tra di loro e sono livellati a più strati. **MLP:** lo strato di ingresso è caratterizzato dal prodotto scalare mentre quello di uscita dalla sigmoide. Più layer messi in fila. **RBF:** caratterizzata da un operatore di ingresso che calcola la distanza euclidea dei centri delle funzioni a base radiale e gli ingressi, la funzione è una campana in cui il valore della f dipende dalla distanza dell'argomento dal centro. Le funzioni di attivazione sono a base radiale. Solitamente ha solo due strati. Vantaggi e svantaggi slide.

I modelli che abbiamo visto ARX e ARMAX sono a tempo discreto, nella realtà gli stessi algoritmi possono essere utilizzati a tempo continuo. Se io ho il mio modello espresso in funzione della variabile continua posso applicare quella tecnica. Nel vettore continuo il vettore dei dati avremo i valori e le loro derivate, se il sistema è rumoroso però fare la derivata è infattibile, quindi le derivate devono essere **misurate**, ovvero abbiamo molti sensori che misurano diverse caratteristiche, se le grandezze sono misurate da sensori va bene sennò si passa al tempo discreto.

## 9 Rilevamento guasti mediante equazioni di parità

Ho noti sia la struttura sia i parametri. APPUNTI(Equazioni di parità) Del modello conosciamo la struttura, e della struttura conosciamo i parametri, una volta che abbiamo il modello sulla base di esso generiamo dei residui dove all'interno abbiamo informazioni diagnostiche. Possiamo generarli con l'approccio ad errore di uscita, o a errore di equazione.

**Errore di uscita:**  $G_p(s)$  non lo abbiamo in verità mentre  $G_m(s)$  creazione del residuo come la differenza dell'uscita misurata con quella del modello, la differenza è il residuo operativo e viene detta forma computazionale. Nelle slide formulata in  $s$ , ma nella pratica si formula in  $t$  con l'antitrasformata. Facciamo un check del residuo con i valori di funzionamento, se supera allora guasto ma può darsi che la causa sia o un disturbo o un errore di modello, per verificare se effettivamente sia un guasto vado a vedere la **forma interna**. Il residuo dipende dalle variabili e i fault di uscita compare insieme al rumore e che il guasto in ingresso è pre-moltiplicato con l'ingresso, comportamento tendenzialmente passa basso, ovvero se c'è rumore all'ingresso  $G_p(s)$  tende a smorzarlo. Questa tipologia tende a essere benevola nel caso in cui ci sia rumore, ma con il filtraggio è un **ritardo**.

**Errore di equazione:** la parte superiore è uguale, il residuo però è realizzato confrontando per il denominatore della funzione di trasferimento  $A_m(s)$  e l'ingresso moltiplicato. A e B sono polinomi e facendo la trasformata, si calcola come prima e la forma interna ci suggerisce che il residuo è sensibile al rumore, sia al rumore di uscita che ingresso sono pre-moltiplicati da un polinomio in  $s$ . Mi va ad amplificare l'effetto del rumore, si applica quando il segnale è smooth e l'effetto del rumore è basso, avendo un comportamento predittivo tende a visualizzare prima un guasto del sistema. Posso calcolare la forma interna per calcolare il residuo? Non so il noise e i guasti quindi non mi servirebbe per conoscere i guasti. La forma computazionale mi serve per scrivere l'algoritmo per calcolare il residuo.

Abbiamo fatto la casistica del sistema di primo ordine, negli appunti, graficamente si va a vedere qual è l'effetto netto di un guasto sul residuo, il residuo calcolato come errore di uscita ha un andamento più smussato, mentre basato su  $r$  ha un valore più istantaneo.

### 9.1 Proprietà dei residui

Oltre al rilevamento vediamo se possiamo fare qualcosa di più, se con i residui basati su equazioni di parità posso isolare i guasti, e capire quando un residuo tende a dirsi robusto. **Robustezza:** vuol dire che il mio residuo sfortunatamente non dipende solo dal guasto ma da altre cose, il rilevatore mi va lo stesso sopra la soglia anche quando non c'è guasto a causa di disturbi o noise. Per creare un residuo robusto al livello controllistico, ho due strade, **robustezza attiva**, moltiplico il residuo per una grandezza tale per cui quella grandezza per la  $\delta G_m$  tende a sparire, richiede che siano presenti più ingressi e più uscite. Vado a modificare il residuo affinché riga colonna sia sempre 0, però dipende dalla struttura geometrica del problema. **Robustezza passiva**, invece che robusto dai disturbi, qui vado a fare una sogliatura che non dipenda dai disturbi, come le soglie adattative, che introducevano dei parametri che si sommarono e moltiplicavano al residuo stesso, al rumore e all'offset del residuo stesso.

### 9.2 Firma del guasto

Se il mio sistema ha più ingressi e uscite posso anche fare in modo che il residuo sia più sensibile a determinati ingressi o uscite, **residuo strutturato**, un fault interessa solo alcuni e non tutti i residui. Ovvero se ho più ingressi e uscite riesco a scindere i guasti sulle diverse uscite escludendo il guasto su alcune. Per disaccoppiare i residui si utilizzano le **firme del guasto**, ovvero 0 se il residuo è sensibile al guasto, 1 se invece è insensibile, la firma del guasto sono l'elenco degli

elementi sensibili al guasto. i **residui direzionali** invece sono residui sensibili ad un solo guasto, ovvero nel residuo ho tutti 0 tranne per uno che avrà valore 1. Per generare i residui strutturati bisogna fare come per quello robusto, cioè creare più residui in maniera tale che ci siano disaccoppiamenti tra residuo e guasto. Il residuo di partenza non è una sola riga, sono più residui perché ho più input e output, quindi il mio residuo è un vettore, del vettore se lo scrivo come errore di equazione lo posso scomporre con A e B che diventano matrici di polinomi, il mio residuo i-esimo sarà dato dalle componenti i-esime. Se vogliamo un residuo per isolare il guasto, vado a premoltiplicare tutto per W deve essere tale per cui la  $W(s)A(s) = 0$ , me lo disaccoppia dall'i-esimo y, o che la W B sia uguale a 0. Il pezzettino che contiene y o u sia zero, funziona a seconda della modalità con cui il modello è scritto e dipende dalla sua struttura. Andrò a generare un residuo che salirà sopra soglia solo se il guasto su un canale dove io non avrò l'indipendenza. Teoricamente i possono creare il numero di righe dipende dal numero di righe di W, quindi è un parametri libero del progettista. Se si va a strutturare un residuo i primo problema è decidere la dimensione di W. Soglia di tipo binario tale per cui se il modulo del residuo è sotto soglia settiamo a 0 e sopra soglia andiamo a settarlo a d1. Creo una tabella in cui dico quali residui sono sensibili a quali guasti, la firma del guasto è leggere in quale colonna siamo e leggere l'etichetta di quella colonna. **Isolamento forte**, slide, se scambio uno 0 con 1 non vado a finire in un'altra tipologia di guasto, **Isolamento debole**, viceversa. Possiamo anche determinare una **soglia con segno**, invece che binaria è ternaria. ESERCIZIO APPUNTI SULLA GENERAZIONE IN UN RESIDUO STRUTTURATO.

## 10 Rilevamento gusti mediante osservatori

Osservatore cosa è? Cosa fa? L'osservatore non è matematizzazione astratta, strumento matematico che mi permette di risolvere un problema pratico, osservare vuol dire essere in grado di ricostruire quello che il sensore non mi restituisce direttamente. Ad esempio se voglio misurare la velocità di una macchina un sensore devo metterlo, come un sensore di temperatura, il problema, se il mio modello ha una certa struttura posso andare a stimare degli stati, delle condizioni anche senza misurarle direttamente? Ovvero se posso misurare la velocità dell'auto posso stimare la posizione dell'auto? APPUNTI OSSERVATORI.

Variante dell'osservatore, **Isolamento mediante Banchi** permette di strutturare gli osservatore per fare isolamento dei guasti, se abbiamo un sistema con un certo numero di ingressi e un certo numero di uscite si può sintetizzare un osservatore che sia sensibile a tutti gli ingressi ma restituisca in uscita una sola uscita. Non vogliamo osservare più tutto il sistema, quindi se ho  $q$  ingressi provo a sintetizzare  $q$  osservatori, uno per ogni uscita. L'osservatore  $q$  se c'è un guasto sull'uscita 1 non se ne accorge, in questo modo possiamo creare la tabella di firma per i guasti. Si può fare questo discorso sia per gli ingressi e sia per le uscite. Se nell'osservatore  $i$ -esimo c'è un guasto ma sto utilizzando un altro osservatore il guasto non lo vedo. Nella pratica difficilmente funzionano, perché il sistema ridotto deve essere osservabile, togliendo tutto e lasciando solo un ingresso o un'uscita è difficile che rimanga osservabile, quindi si trova un compromesso con un sottoinsieme.

Abbiamo considerato un sistema lineare invariante, ma cosa succede se il sistema è affetto da una componente di rumore, componente stocastica molto elevata? Posso andare a risolvere con un altro particolare osservatore, ovvero il **Filtro di Kalman**, è un osservatore che è servito a risolvere come ottenere la stima di un sistema che fosse ottima, ovvero che avesse la minima varianza possibile, ovvero dato un segnale molto rumoroso e vogliamo ottenere una stima per togliere quel rumore. Se il filtro mi restituisce uno stato come quello in condizioni deterministiche il filtro di Kalman è il migliore che mi dà una stima affetta da rumore. (NO EQUAZIONI) Predizione: utilizzo il modello del mio sistema per predire  $k+1$  lo stato che conosco fino all'istante  $k$ , e vado a aggiornare una matrice  $P$  che è la matrice di covarianza dell'errore di stima, ovvero mi dice quanto il mio errore di stima tenda ad essere incerto. Equazione di correzione: quando arrivo all'istante successivo e vado a correggere la stima fatta prima, ovvero stima fatta prima + un guadagno dato dalla differenza data da quello che misuro ora e quello che ho predetto, ovvero aggiungo una correzione. Man mano che mi avvicino ad una condizione ottima diminuirà il guadagno. Dopo tanti passi il filtro assume una forma semplificata e assomiglia all'equazione dell'osservatore.

Un osservatore robusto che mi va a disaccoppiare la stima dell'osservatore dall'ingresso che non mi interessa, **UIO**, creo la matrice  $H$  per rendermi stabile l'osservatore e trasformo lo stato di partenza in un nuovo stato in modo tale da disaccoppiare lo stato nuovo da alcuni ingressi del sistema. Dato un sistema come le equazioni dove ho  $Ed(t)$ ,  $d$  non lo conosco ma so che il disturbo entra in un segnale, allora posso creare un osservatore il cui stato è  $z$ , che si ottiene da  $x$  con una trasformazione e ottengo le matrici nuove per ottenere disaccoppiamento.



## 11 Rilevamento guasti mediante Principal Component Analysis

Prototipi per analisi basata sui dati, riduzione della dimensionalità, oltre per ridurre la dimensionalità di un dataset anche per rilevamento guasti. Fase antecedente di pre processing perché l'obiettivo è quello di diminuire la dimensionalità per diminuire il dataset, e quindi di feature da prendere in considerazione.

Sistema con tante uscite, come ad esempio un sistema industriale, con tanti sensori che misurano cose diverse, e sensori che indirettamente misurano la stessa cosa, ad esempio fare una misura di temperatura e volume non è direttamente legata, ma sono **correlate**, quindi posso individuare un set di variabili e sfruttare la correlazione tra di esse. Nasce per gestire problemi di economia. PCA Lineare statica, utilizza come criterio di selezione delle variabili quella che è la **varianza**, se ho due variabili correlate cerco una terza variabile legata tra le due che mi va a massimizzare la varianza, così ottengo grandi escursioni. Vado sull'impianto con 5000 sensori ad esempio, faccio la pca lo riduco ad un problema con 8 indicatori. NON TAGLIARE PERO' TROPPO.

Esempio con grafici: dataset con due misure  $x_1$  e  $x_2$ , un punto è una coppia di misure, tramite la pca voglio cercare di trasformare il mio spazio in cui esprimere i miei punti tali per cui il numero di variabili è più basso. Nuovo sistema di riferimento  $t_1$  e  $t_2$ , tra le due componenti quella che descrive meglio i pallini è la prima, perché la variabilità del dataset rispetto a  $t_1$  è più alta. Trasformazione di coordinate che mi permetta di descrivere il dataset con delle nuove variabili e scegliere quelle in cui c'è la massima variabilità. Avendo la tabella, vogliamo capire se in questo caso con 5 variabili possiamo applicare la pca con un numero inferiore di variabili, **Varianza, Correlazione, Covarianza**, nel nostro caso useremo la varianza. Partendo dalla tabella come dataset, andiamo a calcolare la correlazione lineare, otteniamo una sotto tabella con le diverse variabili, sulla diagonale tutti 1. Nella parte inferiore ci sono trattini perché la correlazione è commutativa. Le variabili correlate meglio sono  $X_1$  e  $X_2$ ,  $X_3$  e il restante formano un altro cluster. Posso creare questi due cluster che mi vanno a ridurre il numero di informazioni. Prima di utilizzare la PCA fare la normalizzazione del dataset. APPUNTI QUADERNO.

Algoritmo: standardizzare dati, calcolare la matrice di correlazione  $A$ , ne calcoliamo gli autovalori  $\lambda$ , selezioniamo quelli più grandi, determiniamo la matrice di trasformazione, nuova matrice, e si ritorna alle coordinate di partenza.

Scelta parametri:

- **Criterio di Kaise:** tutti gli autovalori maggiori di 1. Prendo tutte le variabili nuove che hanno più informazioni di quelle vecchie
- **Test Cattel scree:** grafico cartesiano ascisse  $n$  componenti, sulle ordinate autovalore, traccio il grafico e individuo i segmenti che mi collegano tutti gli autovalori, prendo quello a pendenza massima e prendo quello a monte. Ultimo autovalore prima di un grosso calo di informazione su quella variabile.
- **Percentuale cumulativa:** percentuale cumulativa, percentuale cumulativa di varianza superiore al 60%.

Nella nuova matrice dei dati dell'algoritmo calcoliamo la matrice vecchia con quella di trasformazione, il significato fisico della nuova matrice di dati non esiste. La matrice  $T$  fisicamente non ha un senso. Possiamo usare la PCA possiamo rilevare il guasto ma non possiamo rimappare il guasto facendo isolamento. Può essere utilizzata per ritornare una volta tolte le variabili torniamo alle variabili di partenza con la trasformazione inversa, così ritorna ad avere un significato fisico. Ottengo nel passaggio, se faccio la PCA vado a selezionare un numero ridotto di variabili

principale le vado a trasformare e il dataset è epurato da rumori e disturbi. Oltre alla riduzione dimensionale può essere utilizzata per eliminare disturbi. Fino adesso PCA statica perché il dataset è fisso. Posso utilizzarlo per fare filtraggio sfruttando l'informazione della varianza sulle variabili vado a ridurre l'influenza del rumore sulle variabili. Un altro utilizzo è andare per fare isolamento per il controllo dei guasti.

**PCA Dinamica:** introdurre la dinamica andando a considerare colonne che sono dinamicamente una legata alle altre e quindi che hanno memoria, quindi la colonna 1 contiene info per la colonna 2.

### 11.1 Utilizzare la PCA per rilevamento guasti

Posso utilizzare la PCA in modalità offline, ovvero acquisisco tutti i dati e li butto nell'algoritmo e ottengo il risultato, ma anche online in cui i dati vengono presi in finestre temporali.

**1° modo:** Abbiamo il nostro processo, abbiamo la nostra matrice dei nostri dati originali, da questa acquisizione calcoliamo la matrice  $X$ , e utilizzando la PCA calcolo la  $T$ , quindi la matrice della variabili trasformate, individuo una finestra temporale fissa e in questa calcolo valor medio e varianza, che vengono influenzate da un fault. Una volta calcolati li confronto con quelle che vado a calcolare run time ovvero con una finestra che va nel tempo. Il confronto lo faccio con un test ad ipotesi. Se capisco che c'è un guasto però non riesco a risalire alla fonte del guasto.

**2° modo:** Nello schema di prima andiamo ad aggiungere la trasformazione inversa per risalire alla fisica. Poi ci calcoliamo valor medio e varianza e a run time facciamo lo stesso discorso con un test ad ipotesi. Qui è diretta perché c'è un legame con le variabili iniziali del processo. Si perde il vantaggio di utilizzare poche variabili, ma si guadagna l'isolamento.

**3° modo:** Invece di andare a fare la mia analisi pre e post guasto, vado a creare un residuo tra il dataset originale e quello trasformato, valor medio e varianza lo uso a calcolare su questo residuo, teoricamente è vicino allo zero ma se si discostano avrò un certo off set.

## 12 Elementi di diagnosi dei guasti

Tecniche di diagnosi per i massimi dettagli possibili, in cui vogliamo la dimensione la posizione e l'istante di determinazione. Vogliamo capire se si è verificato il guasto e capire di che guasto si tratta. Si associa la classe di guasto in base alle misure che abbiamo ottenuto, quindi determinare quale **classe di guasto** si sta determinando. Si parte dai sintomi che si hanno con i metodi di rilevamento guasti, ad esempio con le firme del guasto per risalire al tipo. Terminologia nelle slide.

Suddivisione per fare una distinzione tra misure, feature, decisioni e guasti.

- **Spazio delle misure:** è lo spazio costituito da tutte le misure sensoriali, e non richiedono una conoscenza a priori.
- **Spazio delle feature:** a partire da  $X$  vado a far una trasformazione nello spazio delle feature, in uno spazio diverso dove l' $i$ -esimo feature ottenuta
- **Spazio delle decisioni:** spazio in cui le feature trasformato in modo da soddisfare una funzione obiettivo, in pratica un check della feature con una soglia, quindi generare degli 0 o 1 per vedere se comparabile con la feature
- **Spazio delle classi:** voglio costituire uno spazio di interi dove  $n$  è il numero del guasto che indica quale classe di guasto appartiene il set di misure date in ingresso al set diagnostico.

Esempio nelle slide di questi spazi. Il processo dalle misure risalgo alla classe di guasto è complicato o semplice, e perché? Due guasti possono avere lo stesso sintomo, quindi c'è bisogno di più informazione per invertire la relazione che dal sintomo mi permette di risalire il guasto, quindi è difficile come processo. Con la diagnosi voglio osservare i sintomi e grazie a loro risalire alla diagnosi, quindi si inverte la relazione di causa effetto.

Se non è disponibile informazioni causa effetto **metodi di classificazione**, se sono note **inferenza**.

### 12.1 Sistemi diagnostici

Caratteristiche:

**Veloce individuazione:** Un sistema diagnostico dovrebbe essere in grado di rispondere velocemente nel momento in cui accadono guasti. Più faccio veloce e più piccola è la finestra temporale più è alto il rischio di sbagliare e quindi provocare un falso allarme. Quindi veloce c'è un trade off tra falsi allarmi e tempo di rilevamento.

**Robustezza:** deve essere robusto ai rumori e alle incertezze, in modo attivo disaccoppiamo il residuo. Se metto una soglia molto alta creo una robustezza intrinseca ma aumento il tempo necessario per rilevare il guasto.

**Adattabilità:** i processi cambiano ed evolvono quindi le condizioni operative si modificano a causa ad esempio condizioni climatiche e ambientali, quindi bisogna offrire diagnosi corrette nonostante questi cambiamenti. La temperatura in variabile potrebbe andare a modificare in maniera sostanziale le predizioni che vengono effettuate.

**Requisiti di modellazione:** model based, bisogna disporre di un modello e più è semplice più è veloce e facile da implementare, viceversa se difficile. Ad esempio noi abbiamo visto i lineari tempo invarianti che sono facili da modellare.

**Occupazione di memoria e complessità di calcolo:** posso cercare di diminuire la memoria utilizzando delle tecniche opportune. Però posso introdurre complessità di calcolo quindi c'è un trade off tra queste due in funzione della tecnologia che andiamo ad adottare. Nel nostro caso quasi sempre pc like quindi qualunque scheda ad alto livello riesce a gestire.

**Guasti multipli:** quando abbiamo un'equazione di parità con tutti 1, nella realtà i guasti si possono verificare più guasti contemporaneamente, ma nella pratica è difficile da fare, se più guasti sono collegati a guasti multipli, di solito mi accontento di verificare solamente una classe di guasto.

**Identificabilità di nuovi fault:** di solito un mio sistema deve essere in grado se il fault è relativo ad un problema noto oppure no, ovvero se il mio sistema riesce a dirmi cosa è andato storto oppure no. Se prima passiamo dalle variabili poi feature poi sintomi riesco a farlo. Mentre se salto qualcuno di questi passaggi posso cadere di associare una classe di guasto non corretta, oppure di non accorgermi di un guasto non noto. La capacità di rilevare nuovi fault è importante ed è più rispettata per tecniche model based. Ad un classificatore viene data una conoscenza limitata quindi è difficile che stabilisca un nuovo guasto che non conosce.

**Stima dell'errore di classificazione:** associare la scelta ad un indice di confidenza, se la scelta deve essere fatta in maniera automatica ok, mentre all'operatore umano è utile dare un range di confidenza.

**Chiarezza nella spiegazione:** quando c'è l'essere umano fornire anche un'idea dell'idea della motivazione della scelta del guasto. Il sistema diagnostico valutazione del guasto con una spiegazione logica del perché è stato scelto quel tipo preciso di guasto.

## 12.2 Tecniche di Machine Learning

Il problema è di machine learning, due possibilità o un apprendimento supervisionato o non, il primo è se abbiamo un dataset di riferimento che a fronte delle misure e sintomi ha un'etichetta che associa a quell'etichetta la tipologia di guasto corretta. Ho necessità di disporre dell'informazione di guasto nel caso supervisionato. Nel caso in cui l'etichetta non esiste bisogna che noi su un metodo basato sui dati bisogna classificare il tipo di guasto, associare dei dati simili a dei cluster. O si dispone di un dataset fatto ad hoc, oppure c'è una limitazione. La disponibilità di sensoristica a basso costo è diffusa, è qualcosa che si è affermata solamente negli ultimi anni, quindi il trend dei prossimi anni sarà quella di disporre di una quantità di dati sempre più grande. Per questo studiamo il caso dei dati etichettati. Avremo diversi cluster di dati ed ogni cluster avrà un proprio colore, e quando viene un nuovo colore associargli il colore corretto per ogni classe di guasto.

I classificatori nella realtà sono tantissimi, ne trattiamo 4, Bayes, decisionali, geometrico e a reti neurali. In qualunque software di alto livello sono già implementati.

### 12.2.1 La classificazione

Abbiamo il vettore dei fault indicato con  $F_j$ , un grande vettore dove gli elementi rappresentano 1 o 0 a seconda dei guasti che si stanno verificando, e avremo  $s_i$  che sarà il vettore dei sintomi con 1 o 0 se si verifica un certo sintomo. Quello che restituisce il classificatore sarà un vettore con la riga  $i$ esima che avrà un valore tanto più alto quanto è più alta la probabilità di avere un guasto  $i$ esimo. Abbiamo quindi ad esempio 2 sintomi, quindi 2 feature, quindi nello spazio dei sintomi avremo due cluster che vogliamo mappare nello spazio dei guasti.

### 12.2.2 Classificatore geometrico

Calcola una distanza, richiedono dei dati labellati, funzionerà con un training e un testing, nel training si addestra, nel testing viene utilizzato per riconoscere online in base al sintomo quale guasto etichettare. Nello schema, pallini associati al guasto di tipo 1, mentre le croci al guasto 2, il classificatore basato sulle distanze se all'istante attuale abbiamo un sintomo con l'asterisco, il classificatore si va a calcolare la distanza tra quello e tra tutti i pallini e le crocette, e tra tutte

le distanze disponibili va a vedere quale è la distanza è minima, allora poi effettua l'associazione con la distanza minima per la classe di guasto. **Nearest Neighbor**.

Quale distanza si può utilizzare? O la distanza euclidea, coseno, geodetica, ci sono molte metriche e dipende dal tipo di problema che stiamo utilizzando. Questo è proprio il più vicino, se andate a fare la decisione solo sul nearest è saggio? Si può fare anche il k-nearest, perché il nearest solamente si basa solo su quello più vicino e i dataset di training provengono da misure sensoriali ma ci possono essere dei falsi allarmi causati da rumore, quindi alcuni pallini e crocette potrebbero essere degli outlier. Utilizzo quindi gli n più vicini in un numero dispari. **K nearest neighbor**. La fregatura però in generale è che ad ogni istante devo fare la verifica su tutti i possibili campioni, quindi potrebbe essere un po' oneroso.

### 12.2.3 Classificatore Bayesiano

$p(s)$ , funzione di probabilità del sintomo Gaussiana, con centro noto e co varianza nota.

Mi dice il minimo di una decisione sbagliata, se in fase di test voglio ottenere la decisione sbagliata al minimo, il massimo della probabilità del guasto condizionata ai sintomi. Voglio cercare tra tutti i guasti possibili quello tale per cui la probabilità sia massima per i sintomi che sto vedendo. Per questo utilizzo **Bayes**. Formula nelle slides. Per calcolare il massimo, denominatore, il denominatore non dipende da j quindi è un fattore di normalizzazione, quindi posso toglierlo. Poi devo calcolare gli elementi al numeratore.  $p(s|F_j)$ , ovvero la probabilità che dato un guasto si verificano quei sintomi, e l'informazione ce l'ho nel dataset di training, mi capovolge la causa effetto. Da un problema di testing siamo arrivati ad un problema di training.

### 12.2.4 Alberi decisionali

Ogni elemento dipartito sulla base di decisioni che sono create in funzione del dataset di addestramento. Albero binario, crearlo partendo dallo spazio geometrico dei sintomi, quando un sintomo compare in una certa area possiamo associare una classe. Scelgo l'attributo che mi dà maggiore informazione, quello che massimizza le entropie del dataset, ogni volta che scendo nell'albero i dataset che ho sotto sono meno variabili quindi con meno entropia.

### 12.2.5 Reti Neurali

Una rete neurale risulta non per fare identificazione, ma per riconoscere quelli che sono i sintomi che vengono posti in ingresso in addestramento. Dataset di sintomi dove in ingresso viene dato il dataset con le etichette del guasto.

## 12.3 Metrica di un sistema di diagnosi dei guasti

Le metriche, i modi con cui valido se il mio sistema di diagnosi funziona bene oppure male, si basano sulla capacità del classificatore di distinguere tra di loro più classi di guasto, **matrice di confusione**, mostra il grado di correlazione tra i diversi parametri. In diagonale ci sono gli elementi correttamente classificati mentre dalle altre parti gli elementi che non sono stati correttamente classificati. Dalla matrice si ricava la **tasso di isolamento del guasto**, percentuale di tutti i guasti di componenti che il classificatore riesce a distinguere in modo non ambiguo.

Se abbiamo informazione sul sistema di può impiegare con gli if then else, se la premessa contiene i sintomi allora la conclusione contiene eventi e fault, che vengono definite come **principi di inferenza**, se un set di sintomi mi porta ad un evento in catena, oppure anche relativi agli eventi.

## 13 Sistemi tolleranti ai guasti

Qualunque macchinario avrà dei problemi, bisogna nalizzare i dati, Fault-Tolerant Desing, oltre a riprogettare il sistema posso andare ad inserire qualcosa che mi permette di funzionare il sistema anche quando il guasto si presenta. Modificare a run-time il comportamento del sistema, problema di design mi da poi dei gradi di libertà da sfruttare.

Come faccio ad avere un robot fault tolerant? L'obiettivo è quello di andare ad aumentare l'affidabilità, o **perfezionando** utilizzando i componenti migliori, andando ad effettuare manutenzione regolare, cercando di fare iuuna diagnosi precoce. Negli altri casi in cui mi devo accontentare della tecnologia e della manutenzione limitata, **tolleranza**, contenere le conseguenze di guasti mantenendo il sistema in una condizione di non failure, ammettendo la degradazione delle specifiche di funzionamento. Se ci si chiede di aumentare l'affidabilità ci vorranno sicuramente più costi, è impossibile non farlo.

**Ridondanza statica:** 3 o più moduli che operano in parallelo, ogni modulo stesso segnale di ingresso e lavorano contemporaneamente, c'è un modulo che analizza i segnali di uscita e valuta quale di quelli che riceve è migliore. Il numero di moduli deve essere dispari per effettuare il **modulo di votazione**. Sensori ali degli arei almeno due sensori di flusso.

**Ridondanza dinamica:** se inserisco una parte relativa di diagnosi, come un modulo di fault detection, modulo e 2 stesso segnale, se l'1 presenta un failure, si fa uno switch. Lasciare il modulo 2 inattivo finchè non arriva il guasto, posso introdurre gli switch sia all'inizio che alla fine.

Ogni qualvolta mi si verifica nel fault tolerant un guasto ho uno stadio di degradazione, mi performa un pochettino peggio, gli stadi sono 4: lista nelle slide.

Fino adesso abbiamo visto la ridondanza hardware, se il mio sistema non ha ridondanza ma conosco qualcosa del sistema posso creare **ridondanza analitica**, infatti le misure provengono da una o più componenti diverse tra loro e da una o più relazioni analitiche come i modelli model based.

**Sensori:** supponiamo di conoscere l'ingresso ma di conoscere  $y_1$  ed  $y_2$ , se conosco il modello di  $G_1$  e  $G''$  allora posso ottenere una stima di  $y_1$  con quello che è l'uscita, per verificare se qualcosa non funziona. I virtual sensor si utilizzano spesso. Non posso isolare perché ho solo due componenti.

## 14 Manutenzione Preventiva

Pianificare una manutenzione, prendere in considerazione questo problema. Fino adesso ci siamo occupati dei metodi per capire che guasto si è verificato, abbiamo visto che con la ridondanza possiamo dare dei gradi di libertà in maniera tale da continuare la performance in maniera però ridotta. Ci sono però dei gusti che non sono evitabili, utilizzare una nuova categoria di diagnosi e prognosi in modo tale che si utilizzino alcune tecniche per segnalare quale pezzo sta per rompersi, stimare tra quanto un generico sottosistema possa rompersi.

Nomenclatura: c'è anche una normativa dove vengono definiti da un punto di vista tecnico, **Guasto**, deviazione non permessa di una proprietà caratteristica del sistema da una condizione accettabile, usuale, tipica. Anche la **Rottura** ha un suo corrispettivo nella normativa e un'accezione diversa invece per casi diversi. **Avaria** anche qui abbiamo una definizione nella normativa. **Manutenzione**, combinazione di tutte le azioni tecniche amministrative e decisionali durante il ciclo di vita di una macchina per riportarla ad eseguire una funzione richiesta.

Lo stato di salute di una macchina viene legato al tempo, la manutenzione quindi tiene in contesto il fatto che più tempo passa più la macchina tende a deteriorarsi. La manutenzione che pensa al degrado e si attiva quando avviene un'avaria è una **manutenzione correttiva**, di base, meno intelligente che si può adoperare in un sistema, modo stupido di ragionare quando ho a disposizione abbondanza di dati. Si cerchi di evitare di arrivare in un momento di rottura e degradare troppo lo stato di salute di una macchina, quindi ogni tot di tempo adottare una manutenzione, **manutenzione preventiva**. Però con le conoscenze assunte fin'ora non è intelligente perché gli intervalli sono predeterminati, non mi scongiura di ritrovarmi in una situazione di guasto perché se capita prima del periodo io non posso gestirla con la manutenzione. Quindi una soluzione è analizzare a run-time i dati della macchina, ovvero se osservo che lo stato di salute si sta degradando velocemente posso intervenire prima, oppure intervenire dopo se osservo che lo stato di salute è ancora dopo, **manutenzione preventiva su condizione**, il monitoraggio delle prestazioni dei parametri, non c'è più un intervallo di tempo ma viene calcolato dinamicamente in base allo stato di salute della macchina, uso l'informazione diagnostica per attivare l'informazione di manutenzione. Lo step finale, ovvero quello che si vorrebbe ottenere, sapere esattamente a partire dai dati l'evoluzione dello stato di salute della macchina e il tempo in cui si prevede la rottura della stessa, è ideale **manutenzione predittiva**, la difficoltà nell'utilizzarlo sta nella definizione nello stadio di degrado, non esiste lo stimatore del guasto che possiamo andare a raffigurare in un grafico in maniera esatta, non abbiamo una stima ottima ma possiamo dare all'incirca lo stato di salute della macchina.

### 14.1 Workflow

Bisogna lavorare sui dati quindi la prima cosa sono le **misure**, sia gli ingressi che le uscite, misure da centinaia di sensori diversi con frequenze di misurazioni diverse, se vogliamo fare predittiva non bisogna misurare solo quando va bene ma anche quando mano a mano il funzionamento peggiora, misure con guasto e senza guasto con stati di degradazione diversi e in differenti condizioni operative. Il dataset deve essere sufficientemente buono. Se non ho le misure con i guasti, ma ho una conoscenza dietro posso fare qualcos'altro, posso fare la simulazione creando un modello del sistema reale, un modello di diagnosi, quindi non solo con ingressi e uscite ma con all'interno anche i guasti e generare delle misure virtuali con cui creare dei dati virtuali da integrare. Quindi avrò un mix sia delle misure sensoriali sia di quelle virtuali, solitamente quella virtuale è quella con guasto mentre quelle sensoriali sono quelle senza guasto.

**Filtraggio**, circuito selettivo in frequenza che permette di filtrare rumore e rimuovere outlier, ovvero valori che sono completamente distanti dal valore medio ottenuti per problemi di errori umani, oppure errori che avvengono in istanti. Se ci sono molti outlier posso utilizzare un

filtraggio per rimuoverli, non va sottovalutato.

**Estrazione delle feature:** parte più complicata, caratteristica che al suo interno ha l'informazione diagnostica, nel nostro caso è tutto quello che nel tempo ha un andamento che cresce o decresce per ricavare la machine health. Estrarre delle feature che derivano dalla conoscenza del modello, oppure che si basano su un'analisi di segnale.

**Addestramento del predittore:** le feature possono andare in ingresso ad un predittore, che potrebbe essere un classificatore diagnostico oppure posso andare a fare prognosi andando a stimare tra quanto si andrà a verificare la rottura, ovvero quanto tempo di vita utile rimane. Prognosticare, ovvero poter predire lo stato di salute è possibile andando a creare un algoritmo che istante per istante mi può dire quando si romperà la macchina.

**Integrazione:** dopo aver fatto l'algoritmo per la manutenzione predittiva e per la diagnosi, dobbiamo metterlo a bordo macchina, possiamo farlo proprio attraverso le schede elettroniche che vanno ad inserire sul cloud l'informazione generata, parte edge, manda sul cloud solo gli aggregati e solamente sul cloud vengono effettuare i test per vedere come funziona.

## 14.2 Prognosi

La diagnosi consiste nello stabilire la presenza o meno del guasto nel sistema partendo dai dati e dalla conoscenza euristica. Prognosi predire il tempo di vita rimanente accuratamente e precisamente di un componente affetto da guasto.

La diagnosi la possiamo vedere come una foto nitida di un guasto, check si o no in base al metodo che abbiamo utilizzato e ci da un'istantanea di un guasto, invece la prognosi fa una foto sfocata in un momento futuro, la foto sarà sfocata. Eliminare il guasto fotografato prima che esso diventi un failure in un momento futuro. In pratica abbiamo che vogliamo trovare un guasto e intervenire prima che il guasto cresca fino alla rottura.

Le sfide, non abbiamo un sensore del guasto, bisogna definire un modo per ricostruire il guasto a partire delle misure sensoriali, più vado avanti nel tempo più la foto diventerà sfocata. Strumenti di tipo statistico per definire gli intervalli di confidenza. Dopo che è stata definita la predizione comunque è necessario aggiornarli nel tempo. Aggiornare continuamente la stima del predittore, e quindi una strategia di auto apprendimento.

### 14.2.1 Come fare prognosi

Prognosi basata su modello, utilizzo il modello per fare prognosi, basata sennò sui dati e lascio la macchina decidere quali sono le prognosi in base ai dati, oppure puramente statistica utilizzando dei calcoli matematici e in base questi capire quando si romperà il sistema.

Quelli basati sul modello sfruttano la conoscenza del modello, differiscono da quelli sui dati perché non possono fare stime e quando sono presenti delle correlazioni possono essere aggiunti. Se io ho un modello come posso utilizzarlo, ho bisogno di un modello di degradazione ovvero modellare come un sistema tenderà a rompersi, se ho il modello ma non uno storico dei dati, rimane fumosa da applicare. La prognosi statistica rimane più semplice perché mi baso su un gruppo di dati storici e creare un pattern esistente e calcolare la distribuzione del tempo di vita in base alle informazioni sullo storico che ho, però stimare con continuità è difficile. Gli approcci basati su dati sono utili ma non può essere preso il dato nudo e crudo e bisogna prendere dei indicatori corretti.

Sulla Prognosi quello che conta è **il dato che ho a disposizione**, sceglieremo l'algoritmo in base al tipo di dato che in ingresso, dati con la massima informazione in ingresso, ovvero storico completo dei dati, fino alla condizione di rottura **Simulazione run to failure**, ho tanti dati in parallelo. Posso avere i **modelli a sopravvivenza**, ovvero ho solo informazione quando c'è il



pallino rosso, minore accuratezza e precisione possibile però si può provare qualcosa anche solo avendo questa informazione.

## 15 Robotica

Siamo oggi in una via di mezzo nella Increase HRC, l'uomo nel passato lavorava in uno spazio separato rispetto a quello che l'uomo doveva fare, vi era una vera e propria separazione fisica. Si cerca di andare verso un concetto più flessibile in cui lo spazio è sempre separato però in maniera meno netta ad esempio attraverso una barriera foto elettrica in cui mentre l'uomo passa davanti la fotocellula il robot rallenta e si cerca di andare avanti per questa strada.

**Poco collaborativi:** fa tutto il robot se bisogna cambiare qualcosa bisogna riprogrammarlo da capo, è scomodo e nel caso bisogna modificarlo bisogna spegnerlo prima. Stadio 2 in cui c'è una protezione virtuale in cui fa tutto l'uomo ma ciò che serve gliel' fornisce l'uomo in cui grazie ad una fotocellula riesce a garantire la sicurezza per la collaborazione uomo robot, leggermente più collaborativa. Lo stadio 3 invece introduce un rallentamento nel momento in cui viene trovato l'uomo vicino al robot.

**Molto collaborativa:** in caso di contatto con l'uomo con sensori tattili o sensori di coppia fa diventare il giunto cedevole e stacca l'alimentazione. Può diventare più collaborativa quando c'è il contatto tra uomo e robot. Quando c'è collaborazione tra robot e robot siamo al 3 stadio.

## 16 Caratteristiche dei sensori

I sensori si possono classificare sulla base del principio fisico impiegato, ottici, a luce amplificata laser, principio termico. Dipende anche da quello che voglio misurare. Oppure anche al settore di destinazione, come per chimica robotica o manifattura. I sensori saranno spesso amplificati, il sensore fornisce poca energia ed è necessario dare una fonte di energia, se non la richiede si dice sensore **passivo**, viceversa **attivo**. Il sensore può essere diversificato in base anche al ruolo all'interno della macchina, come safety o corretto funzionamento degli elementi del processo.

**Misurando:** è quello che viene messo a contatto con il sensore e di cui voglio ottenere la misura, la misura viene trasformata in un'altra forma che però deve essere per me intellegibile. La fregatura della misura è quello che mi viene restituito dal sensore è molto piccolo, quindi è necessario che a valle del sensore sia presente un circuito che mi vada a fare delle **operazioni di condizionamento del segnale** per avere un risultato corretto. Il sensore è un piccolo componente di tutti i dispositivi di misura utilizzati. Partendo dal sensore il condizionamento mi permetterà di filtrare, e andremo a capire come funziona lo schema nelle slide. Il sensore è solo un piccolo elemento di una catena per la manipolazione del segnale, con convertitori elaborazioni condizionamento. La parte di attuazione non la vedremo, in azionamenti elettrici come possono funzionare gli attuatori di natura elettrica.

### 16.1 Sensori

Un sensore è un oggetto che prende in ingresso un segnale e la trasforma in una grandezza di diversa tipologia fisica. Riceve uno stimolo, è di natura un **trasduttore**, sistema che trasforma energia dall'ingresso all'uscita. La nostra grandezza in ingresso **misurando**, l'uscita sarà di tipo elettrico o tensione o corrente, proporzionale allo stimolo. Se invece la trasformazione non avviene in elettrico allora si chiama trasduttore. Solitamente uno strumento di misura è la combinazione di più trasduttori con un sensore e poi un amplificatore. L'accelerometro ad esempio prima passa da forza a spostamento, poi c'è un sensore di spostamento genera una grandezza elettrica di quel spostamento.

I sensori non sono tutti uguali, ad esempio misurare la grandezza dell'oggetto in figura, in cui alcuni sensori sono in contatto, altri rimangono esterni, i sensori 3 e 4 sono sensori a contatto. Ci sono anche sensori che servono ma non misurano direttamente l'oggetto come il sensore 5 della figura, prova a darci un'informazione **complementare**, ad esempio il sensore di temperatura interna di un telefono, perché ad esempio i giroscopi nel telefono dipendono dalla temperatura. Il sensore 4 ha bisogno di un circuito di eccitazione quindi passivo mentre gli altri si connettono direttamente al multiplexer.

Caratteristiche statiche, mi descrivono istantaneamente il sensore, quelle dinamiche nel tempo.

#### 16.1.1 Caratteristiche statiche

**Accuratezza:** Quanto più si avvicina alla misura reale, la misura  $y$  è data da una stima del misurando  $u$  segnato più un'incertezza  $\epsilon$ . Il valore vero della  $u$  io non ce l'ho, quindi posso scendere al livello ad esempio del millimetro, ma è qualcosa che avrà sempre un'incertezza. Ed è dovuta al fatto che non conosco il misurando, quindi ci sarà un difetto. Il metodo tramite il quale si cerca di limitare l'incertezza a partire dal campione di riferimento, ovvero dico che conosco è detto **taratura**, che la fa il fabbricante. Sensore di peso, ho dei sensori di peso certificati e andrò a vedere per ognuno dei pesi certificati quanto è la misura  $y$ . La **calibrazione**, aggiustamento dei parametri del sensore, so che ha una data incertezza il sensore, però vado in laboratorio so che sto lavorando con una certa misura e vado a modificare la misura per rendere il sensore

migliore di quello che mi aspetto. Il segnale  $Y$  è legato al misurando per mezzo di una funzione non lineare **caratteristica statica o curva di taratura**. La curva di taratura mi definisce l'uscita del sensore al variare degli ingressi. Se il sensore lo approssimo come lineare ho una retta.

La **Sensibilità**, invece, valuterà quanto l'uscita del sensore sarà grande a parità dello stimolo misurato. La **Risoluzione** invece è la più piccola variazione della variabile misurata.

### 16.1.2 Caratteristiche Dinamiche

Ci può essere sempre un delay più o meno piccolo, se campioniamo un termometro richiede un suo tempo, ma se lo usiamo in un impianto petrol chimico può essere visto come istantaneo, bisogna valutare un confronto sui tempi di risposta. **Caratteristiche di primo ordine**: frequenza in cui scende di 3dB il guadagno, che corrisponde in ampiezza al 50%, di potenza del 30%, oppure risposta nel tempo per raggiungere il 90%.

Risposta in frequenza di un sensore di secondo ordine che misura qualcosa che varia nel tempo e la variazione nel tempo comporterà una variazione in uscita, **banda piatta**, uscita che è indipendente dalla frequenza ma dipende solo dall'ampiezza, ma ci sono anche in alcuni casi in cui la frequenza influisce sulla misura del misurando, come la risonanza. A frequenze basse invece il condizionamento del segnale non riesco a misurare perché l'elettronica non lo permette, dobbiamo cercare di essere dentro la banda piatta, è l'unica parte che ci interessa.

**Non linearità**: c'è un errore tra la caratteristica statica reale, e quella lineare approssimata, l'errore viene definito **errore di non linearità**, la non linearità come la massima variazione della caratteristica statica rispetto la sua approssimazione lineare. La non linearità può essere dovuta alla caratteristica statica intrinseca oppure dagli elementi come isteresi, saturazione e dead band. Isteresi: fenomeno per cui al variare dello stimolo a seconda che si raggiunga un valore diminuendo l'intensità dello stimolo l'effetto sull'uscita è diverso, il delta è l'isteresi come mostrato in figura, componenti ferromagnetici. Dead band: rappresenta l'intervallo all'interno del quale il mio sensore non restituisce l'uscita anche al variare apprezzabile dell'ingresso. Saturazione: si andrà verso il fondo scala, se portiamo il sensore ad uno stimolo molto più grande verrà portato alla distruzione del sensore, oppure se non si rompe restituisce solamente la misura massima.

**Note sull'accuratezza**: quando andiamo a leggere un sensore va a dare una stima ma nella realtà succede questo, supponiamo di voler misurare uno stimolo  $x$ , temperatura corporea, un valore corrispondente dello stimo in funzione della mia caratteristica statica reale invece invece io misuro su quella approssimata, quindi c'è una differenza tra quella reale e quella approssimata, utilizziamo quella ideale per calcolare lo stimolo. La stima e quella reale sono distanziata di un delta e quel valore è l'inaccuratezza della mia misura.

## 17 Elementi di condizionamento dei segnali

I sensori possono essere caratterizzati da una o più proprietà per capire quanto performano bene o meno, una volta che il sensore è stato installato l'uscita del sensore deve essere trattata, il sensore restituisce una tensione o corrente molto piccola. C'è inoltre molto rumore di misura anche quelli posizionati sui bracci dei robot. Segnale analogico sovrapposto a rumore, non lo posso connettere al pc perché devo digitalizzarlo e devo trattarlo poiché c'è rumore sopra di esso. Devo trasformarlo in un dato di un formato compatibile con quello che serve per il processamento, si chiama **Condizionamento del segnale**. **Adattamento impedenza**: creare un circuito che posto tra il sensore e il calcolatore permette al segnale di passare regolarmente, quindi adattare l'impedenza. **Amplificazione**: una volta che il segnale passa, prima di convertire il segnale lo amplifico perché l'uscita è sempre bassa, se non lo amplifico digitalizzo un segnale piccolissimo, entità molto bassa, devo stare attento al rumore con un **filtraggio analogico** per non amplificare il rumore insieme al segnale.

**Adattamento ad impedenza**, quando abbiamo un circuito può avere l'impedenza ovvero rapporto tra tensione e corrente, quindi il circuito in grigio avrà un'impedenza d'ingresso  $Z_{(in)}$  che mi rappresenta quanto va a caricare il sensore  $Z_{(out)}$ , è importante mettere in correlazione. Modellare il sensore come un circuito e il sensore può essere modellato con il generatore di tensione reale, così ho una tensione in uscita, ma ci sono altri modi che variano a seconda del sensore che utilizzo. L'interfaccia di condizionamento è un circuito con  $Z_{(in)}$  con una tensione di offset, e una tensione dovuta dal rumore elettrico, e oltre ad avere queste ci saranno delle correnti spurie di bias, e leakage, io però vorrei avere solo  $Z_{(in)}$ , sceglierla in maniera tale che sia compatibile con il carico del sensore, così il circuito che si interfaccia assorbe corrente, è condizionato ad un errore dovuto al fatto che dipende solo dall'impedenza, **adattamento d'impedenza**.

**Amplificatore**: il livello del segnale aumenti di intensità, amplificare il segnale, fa parte dell'interfaccia di condizionamento, le azioni in rosso nelle slide, l'**Op-Amp**: e le sue caratteristiche nelle slide. **Amplificatori da strumentazione**: il guadagno è più piccolo ma sono più performante, mentre prima avevamo un solo ingresso qui abbiamo due ingressi per la connessione diretta alla sorgente del segnale, l'uscita è proporzionale alla differenza di tensione dei due capi.

Il segnale dal sensore lo devo inviare all'interfaccia di condizionamento e può avvenire in due modi, o single ended o differenziale.

## 18 Elementi di filtraggio

Fase preliminare di filtraggio, due tipi di filtraggio, **analogico** che viene fatto sul segnale direttamente dal sensore, e **digitale** ovvero sul dato che è stato convertito da analogico a digitale. Idealmente prima di campionare il segnale se ho tanto rumore e vado a digitalizzare vado a digitalizzare anche il rumore, quindi il filtraggio analogico si fa a livello fisico per ridurre il rumore proveniente dal sensore, se non fatto bene o rimane del rumore, o ho un dataset solamente digitale a quel punto posso agire a livello digitale. Idealmente il filtraggio bisognerebbe farlo nella parte di condizionamento.

Filtro è un circuito selettivo in sequenza, che mi permette di eliminare, far passare, selezionare un intervallo di frequenze da un segnale di ingresso. La funzione di trasferimento mi permette di definire le caratteristiche di un filtro ed è caratterizzate da un'ampiezza e da una frequenza. Filtro passa basso, alto, banda. Passa basso: filtro caratterizzato da una risposta in frequenza con ampiezza unitaria fino a quella di cut, e un'ampiezza nulla da quel momento in poi, fase invece lineare in frequenza, ovvero le componenti armoniche sono tutte ritardate di una certa quantità.

Problemi: definizione delle specifiche, voglio che il mio filtro tagli le specifiche oltre determinate soglie, trovo la funzione di trasferimento per quelle specifiche, e implemento fisicamente un circuito che rispetti quella funzione di trasferimento. Si può avere sia passa basso passa alto o passa banda che è una combinazione dei due.

Ci sono tante funzioni preconfezionate per una determinata risposta in frequenza, Butterworth, Chebyshev, Ellittico, Bessel e tutte dipendono dalla funzione utilizzata nella funzione di trasferimento.

**Butterworth:** famiglia dei filtri che soddisfa bene la banda passante ma meno la banda di transizione. Caratterizzato da un andamento che non oscilla e la frequenza di taglio è indipendente dall'ordine del filtro. Aumentando l'ordine aumenta quanto dalla banda passante si passa alla banda proibita. Il filtro a livello matematico ha il modulo pari ad 1 diviso il polinomio di Butterworth, polinomio di ordine 1 2 3 4 sulle slide. Un polinomio di Butterworth si può riscrivere come radice di  $1 + \omega^2$ . Se vogliamo un filtro un po' più ripido quindi performante della strettezza della banda. Ha solo due parametri di design la frequenza di taglio e l'ordine di filtro. Se voglio migliorare a parità di ordine la strettezza della banda posso ricorrere al filtro di **Chebyshev**, preserva l'indipendenza dall'ordine, però introduce le oscillazioni, oscillano in banda passante, in maniera tale da ottenere una transizione più veloce. Sistema il cui modulo si può scrivere come in slide. Con  $C$  che è il polinomio di Chebyshev. Si è introdotto un terzo parametro che è Epsilon, quanto può oscillare o in banda proibita o in banda passante il mio sistema. Le oscillazioni hanno tutte la stessa ampiezza e sono contenute in un intervallo preciso. ESEMPIO SUGLI APPUNTI.

Se abbiamo circuiti con  $N$  molto grande, li realizziamo con circuiti più piccoli con circuiti di primo e secondo ordine e poi andiamo a fare una cascata di questi filtri.

APPUNTI SULLA DISCRETIZZAZIONE. In un'analisi real time solo Eulero in avanti, perché devo calcolare su ciò che conosco adesso, mentre nelle altre due non conosco poiché è futuro. Se invece che in formato analogico lo vogliamo trasformare in digitale ho due macro strade: sintetizzo tutto ex novo con delle tecniche apposite, la seconda è prendere parte della teoria del linguaggio analogico e poi applicarlo su quello digitale. Nel caso in cui abbiamo a disposizione la funzione di trasferimento tempo continuo e la cosa più semplice è discretizzarla, Eulero avanti, indietro e tramite la trasformata bilineare. L'approssimazione introduce dei difetti, però se riesco a conoscere tutti gli intervalli preferisco Tustin, invece a real time sono costretto ad utilizzare Eulero in avanti. Otteniamo **infinite impulse response**, FIR IIR, entrambi sono sistemi stazionari lineari e stabili.

**Sintetizzare un filtro digitale:** la prima cosa da fare è scegliere le specifiche, e la scelta è comune sia in quello analogico che digitale, poi si va a scegliere la funzione di trasferimento che mi soddisfa i requisiti del filtro, ripetere ciò che è stato fatto in quello analogico ottenere  $H(s)$  e poi ottenere  $H(z)$  discretizzandola. Poi c'è da scegliere la struttura tramite la quale implementare la funzione di trasferimento, qui si opera sui dati digitali che ho a disposizione, quindi scegliere la struttura vuol dire decidere come devono essere fatti i calcoli che mi realizzano quella funzione di trasferimento. Un processore fa somme e prodotti in pratica, il modo con cui si decide di lavorare con somme e memorie decide la struttura del mio filtro. Una volta scelta la struttura per chi fa sintesi dei filtri bisogna verificare la qualità del filtro, se abbiamo un polo e andiamo ad interpretarlo con un certo numero di bit viene troncato e introduce un errore e il filtro digitalizzato bisogna verificare che le prestazioni siano le stesse. La progettazione dei filtri digitali si fanno con strumenti di supporto. NOI ci concentreremo sul punto .2 e il punto .3 nelle slide.

La prendiamo un po' alla larga, un filtro è un sistema con una sua funzione di trasferimento lineare stazionario causale e stabile. Due tipi di rappresentazione **implicita**, lo stato dipende dallo stato e dall'ingresso e l'uscita anche, **esplicita** mi fa vedere come evolve lo stato e da tutta la memoria degli ingressi, mi servono per andare a vedere differenze tra FIR e IIR. Slide RICHIAMI DI NOMENCLATURA. RICHIAMO Strutture. Sistemi a memoria finita: sono i sistemi per i quali la risposta in uscita è indipendente dallo stato iniziale dopo un certo numero di campioni l'uscita è indipendente dal punto in cui si parte. FIR sistemi a memoria finita con una condizione, la risposta impulsiva del filtro sistema si esaurisce in tempo finito, se l'ingresso è un impulso dopo un certo numero di campioni si esaurisce. L'uscita andrà a zero, un esempio è il ritardo, gli do in ingresso uno  $U$  la ritarda 3 volte di un campione e poi ho in uscita la  $Y$ , ritardo di 3 campioni, se non do più ingressi l'uscita va a 0. Al contrario i sistemi a memoria infinita l'uscita non è mai indipendente dallo stato iniziale, una classe importante sono i sistemi descritti dalle equazioni alle differenze, gli autovalori non sono tutti nulli. Le strutture per i filtri FIR IIR possono essere ricorsive o meno, i FIR non ricorsivi ovvero senza retroazione ma anche con, invece i IIR sono strutture ricorsive.

Quali tipi di strutture si possono realizzare? Realizzare una funzione di trasferimento significa trovare 4 metriche  $A, B, C, D$ . Esempio generica funzione in  $z$  polinomiale, quindi l'uscita  $W(z)u(z)$ , per realizzarla 1 sul denominatore, facciamo per pezzi, per realizzare questa moltiplico il denominatore sia a sinistra che a destra, mi concentro e porto tutti i pezzi con la  $a$  sulla destra. La mia  $i$  tilde sarà dato dalla  $u + ik - a_0 + ik+1 - a_1$  e realizzo il pezzettino del denominatore anche graficamente. Adesso numeratore è  $b_0$  più tutti i componenti e lo farò in maniera analoga. Abbiamo introdotto degli stati che sono i valori nei collegamenti dopo i blocchi di memoria, ovvero i valori che vado ad immettere nei blocchi di memoria. La rappresentazione in spazio di stato è nata proprio con questo.

**Struttura Diretta 1 IIR:** la mia funzione di trasferimento in termini di rapporto di somme di coeff  $b$  per termini di ritardo e di coeff  $a$  per termini di ritardo, svolgendo i conti la struttura che si ottiene è quella in fondo. Prima parte che è di tipo FIR e una seconda parte con retroazione che è un IIR.  $2m + 1$  moltiplicatori,  $2m$  ritardi,  $2m$  sommatori.

**Struttura Diretta 2 IIR:** prodotto scambiando i fattori infatti la cascata delle funzioni è invertibile, facendo la commutazione otteniamo un'altra struttura, abbiamo permutato l'ordine, può essere semplificata? Si possono mettere insieme i ritardatori  $z$ , dato che ci sono degli stati comuni e risparmiare ritardi e memoria. Se io so realizzare le strutture 1 2 posso realizzare un filtro digitale con una loro combinazione.

**FIR:** un filtro FIR è un filtro che da un certo punto in poi non dipende dallo stato iniziale in cui l'uscita dipende solo dagli ingressi, e la risposta si può scrivere che va da 1 a  $m$ , può essere realizzato, un ingresso moltiplicato dalla risposta impulsiva, MEDIA PESATA DEGLI INGRESSI

DOVE I PESI SONO I VALORI DELLA RISPOSTA IMPULSIVA CHE NOI VOGLIAMO DEL NOSTRO FILTRO, dei più recenti campioni. Sono Filtri a media mobile. Filtro a media mobile. La fregatura principale è il tempo necessario per l'esecuzione ordine di filtro molto più elevato per ottenere un determinato livello di prestazione, a parità di richiesta di attenuazione ordine più grande quindi più ritardo. Questi solo se ci serve la fase lineare.