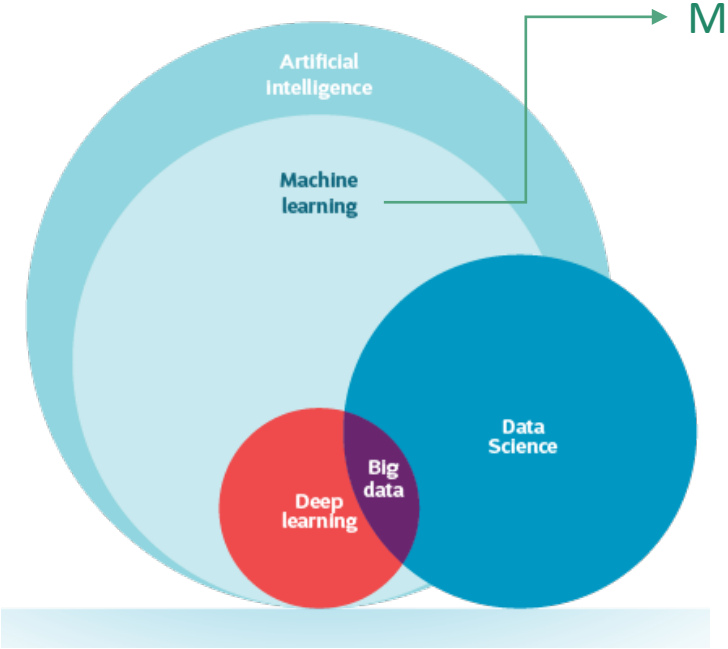
# L’intelligenza artificiale nel campo delle strutture

Nuova sfide per una gestione sostenibile delle infrastrutture

SINA
ASTM GROUP

# Intelligenza Artificiale

Prof. McCarthy (*1955*): “The science and engineering of making intelligent machines”




Machine Learning (Apprendimento automatico)

Deep Learning (apprendimento profondo) che si basa sulle **reti neurali**

Strutture formate da strati di collegamenti, più o meno fitti, tra «neuroni» che calcolano un risultato sulla base delle informazioni in ingresso. La precisione di queste reti dipende dalla complessità della struttura

Esempi di DL:

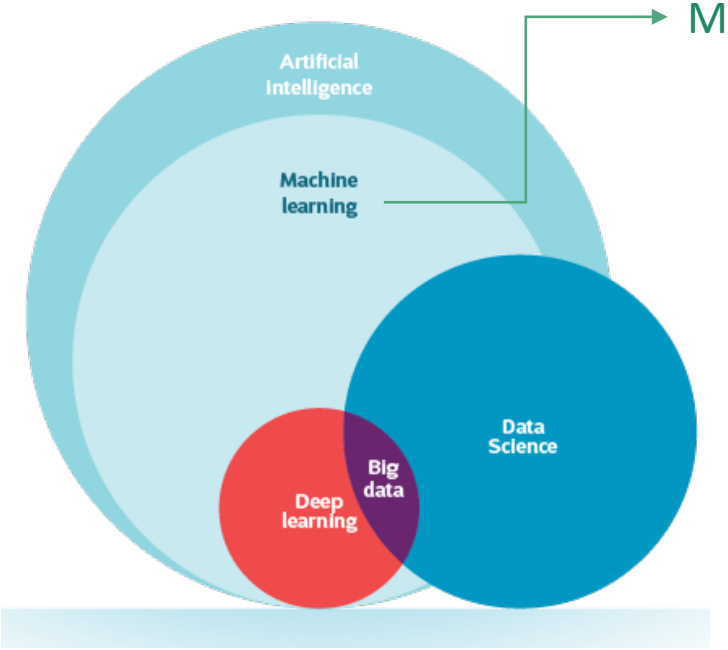
- Computer Vision (Visione Artificiale)
- Large Langauage Models (LLM) tra cui i Generative Pretrained Transformers (ChatGPT, Gemini…) → "**generative AI**"

**Algoritmi** + **Cloud computing** + **Dati**

# Intelligenza Artificiale

Stanford University Human-Centered Artificial Intelligence

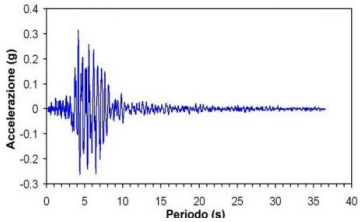
Prof. McCarthy (*1955*): “The science and engineering of making intelligent machines”




Machine Learning (Apprendimento automatico)

Deep Learning (apprendimento profondo) che si basa sulle **reti neurali**

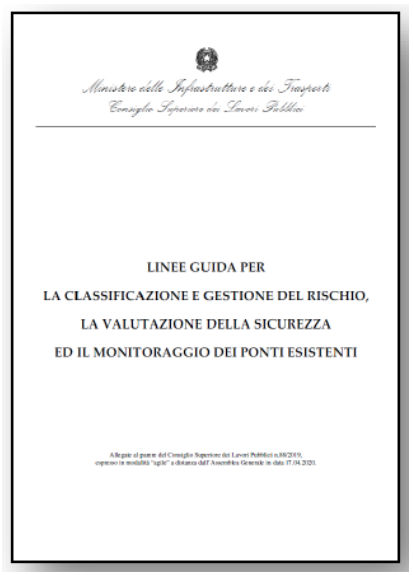
**“boring AI”,** capace di scavare nella conoscenza disponibile per poterne fornire di nuova a chi la utilizza



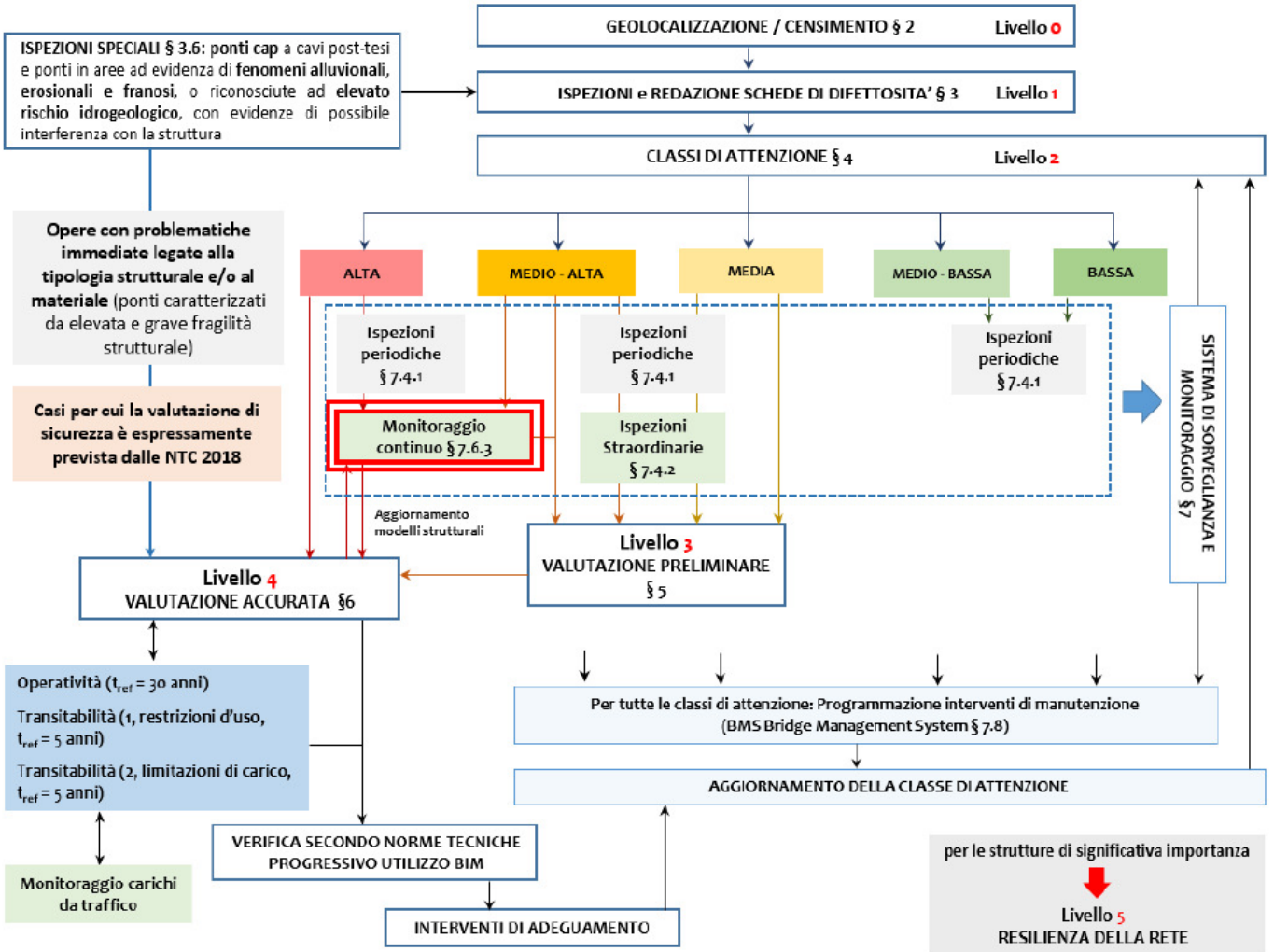

**Algoritmi** + **Cloud computing** + **Dati**

# Inquadramento normativo

D.M. MIMS n. 493 del 03/12/2021


Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

LINEE GUIDA PER
LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO,
LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA
ED IL MONITORAGGIO DEI PONTI ESISTENTI



# Inquadramento normativo

## D.M. MIMS n. 93 del 12/04/2022 – Piano di riparto (PNC al PNRR)

### Art. 1 comma 1 - Destinazione delle risorse

b) strumentazione di 6500 opere d'arte mediante la predisposizione e l'attuazione di un sistema di monitoraggio dinamico con controllo da remoto

### Art. 4 comma 1- Spese ammissibili ed affidamento dei servizi

b) Acquisto ed installazione dei dispositivi di monitoraggio

c) Spese relative alla realizzazione / implementazione della sala di controllo, all'acquisto del software e dell'hardware […]

Sensore accelerometrico (monoassiale, biassiale, triassiale)

Sensore di temperatura

Trasduttore di spostamento

Inclinometro (monoassiale, biassiale)

| Concessionaria | ADF | SALT | AUTOVIA PADANA | SATAP | ITP T2 (ex SATAP) | AT-CN | ITP T1 (Ex ATIVA) | SITAF | TOTALE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratta | A10 | A11-A12 | A21 | A4 | A21 | A33 | A4-A5-A55 | A32 | |
| N. Opere | 8 | 18 | 28 | 6 | 14 | 5 | 12 | 15 | **106** |
| N. Sistemi | 4 | 9 | 16 | 3 | 7 | 5 | 6 | 12 | **62** |

# Sistemi di monitoraggio SINA – Work Flow

**ANALISI**

Analisi comportamento strutturale opere → Analisi difettosità e vulnerabilità locali → Selezione campate da monitorare → Definizione schema di monitoraggio

**PROGETTAZIONE**

**Definizione Architettura di campo** in grado di integrare i diversi sottosistemi → **Progettazione dei sotto-sistemi** di acquisizione, alimentazione e comunicazione → Progettazione dettagli costruttivi → Definizione delle fasi di installazione

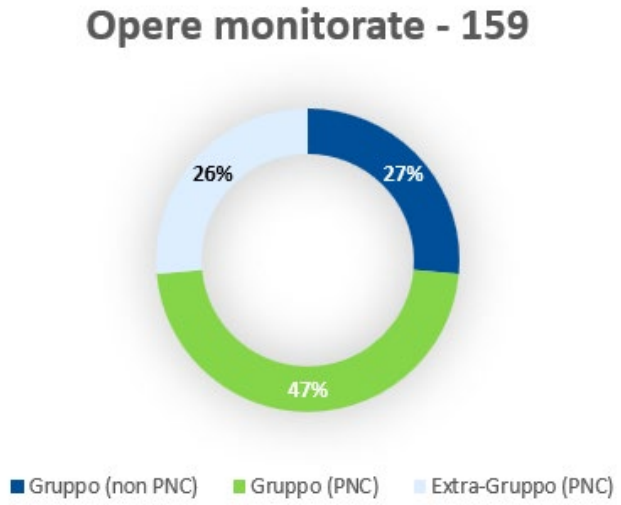
**INSTALLAZIONE TARATURA COLLAUDO**

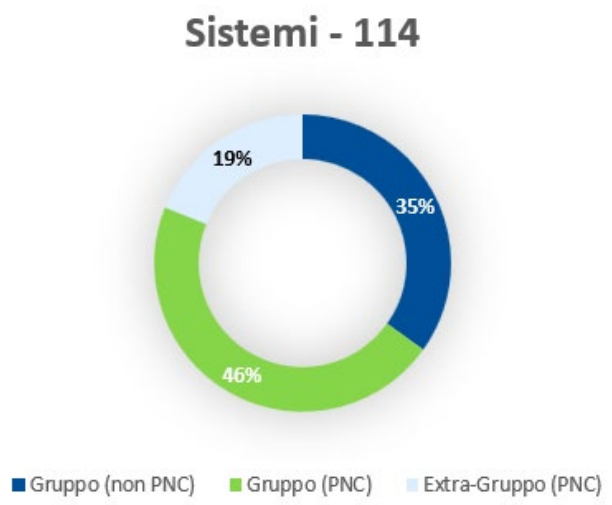
Approvvigionamento del sistema → Collaudo in fabbrica dei componenti → Installazione del sistema → Collaudo in campo del sistema

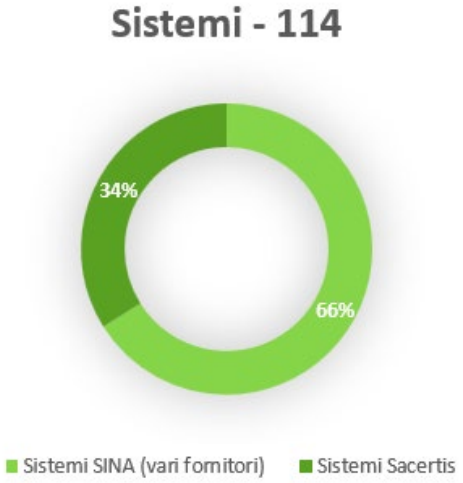
SINA

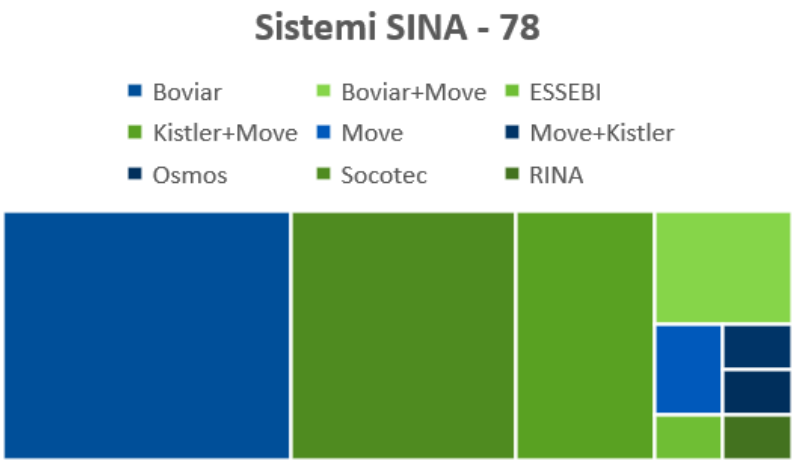
# ANALISI DATI

# Monitoraggio SINA – Analisi dei dati



# Back Office - Analisi dei dati e interpretazione

Nell'attività successiva all'installazione dei sistemi di monitoraggio, SINA è coinvolta nel processo di:

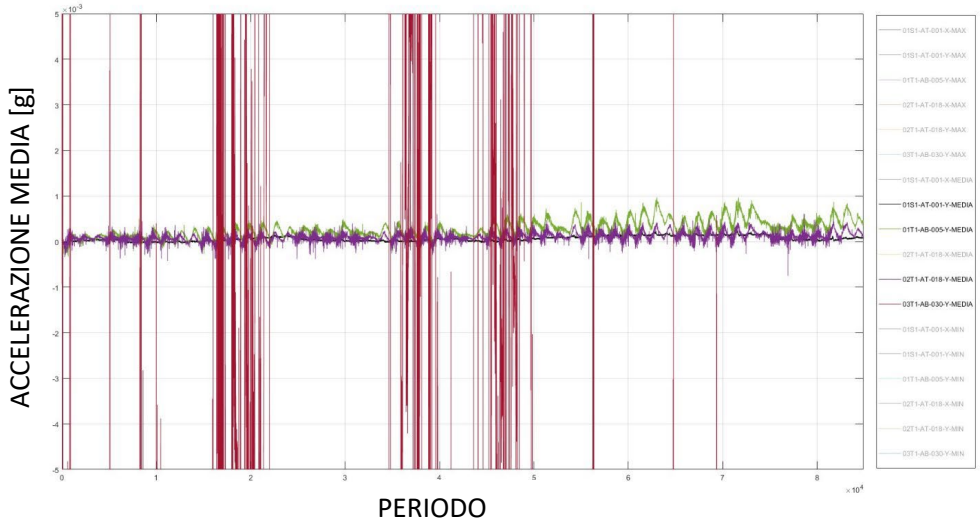
1. DIAGNOSTICA DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO: lettura delle misure al fine di individuare anomalie nella raccolta dei dati (presenza del dato, correttezza e plausibilità, possibili derive…)

| # | Canale | Presenza | Completezza | Correttezza | Plausibilità |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | NV060_01S1_AT_001_X | VERIFICATO | VERIFICATO | NON VERIFICATO | NON VERIFICATO |
| 2 | NV060_01S1_AT_001_Y | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 3 | NV060_01S1_AT_001_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 4 | NV060_01T1_AB_005_Y | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 5 | NV060_01T1_AB_005_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 6 | NV060_01T8_AM_011_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 7 | NV060_02T1_AT_018_X | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 8 | NV060_02T1_AT_018_Y | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 9 | NV060_02T1_AT_018_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 10 | NV060_02T1_AM_017_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 11 | NV060_02T1_AM_019_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 12 | NV060_02T8_AM_024_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 13 | NV060_03T1_AB_030_Y | VERIFICATO | VERIFICATO | NON VERIFICATO | NON VERIFICATO |
| 14 | NV060_03T1_AB_030_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 15 | NV060_03T8_AM_036_Z | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |

# Back Office - Analisi dei dati e interpretazione

Nell'attività successiva all'installazione dei sistemi di monitoraggio, SINA è coinvolta nel processo di:

1. DIAGNOSTICA DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO: lettura delle misure al fine di individuare anomalie nella raccolta dei dati (presenza del dato, correttezza e plausibilità, possibili derive…)



# Back Office - Analisi dei dati e interpretazione

Nell'attività successiva all'installazione dei sistemi di monitoraggio, SINA è coinvolta nel processo di:

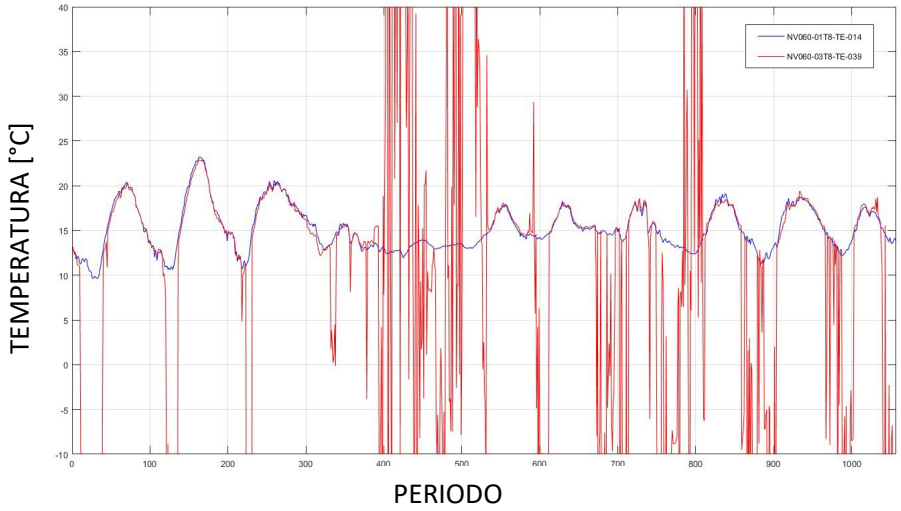
1. DIAGNOSTICA DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO: lettura delle misure al fine di individuare anomalie nella raccolta dei dati (presenza del dato, correttezza e plausibilità, possibili derive…)

| # | Canale | Presenza | Completezza | Correttezza | Plausibilità |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | NV060_01T1_SL_003 | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 2 | NV060_01T1_SL_004 | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 3 | NV060_01T8_SL_010 | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 4 | NV060_03T1_SL_016 | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 5 | NV060_03T1_SL_029 | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 6 | NV060_03T8_SL_035 | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 7 | NV060_01T8_TE_014 | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO | VERIFICATO |
| 8 | NV060_03T8_TE_039 | VERIFICATO | VERIFICATO | NON VERIFICATO | VERIFICATO |

# Back Office - Analisi dei dati e interpretazione

Nell'attività successiva all'installazione dei sistemi di monitoraggio, SINA è coinvolta nel processo di:

1. DIAGNOSTICA DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO: lettura delle misure al fine di individuare anomalie nella raccolta dei dati (presenza del dato, correttezza e plausibilità, possibili derive…)



# Back Office - Analisi dei dati e interpretazione

Nell'attività successiva all'installazione dei sistemi di monitoraggio, SINA è coinvolta nel processo di:

2. DIAGNOSTICA DELLE OPERE: analisi del dato secondo prestabiliti scenari al fine di dare un'interpretazione al comportamento delle opere (con una reportistica periodica)

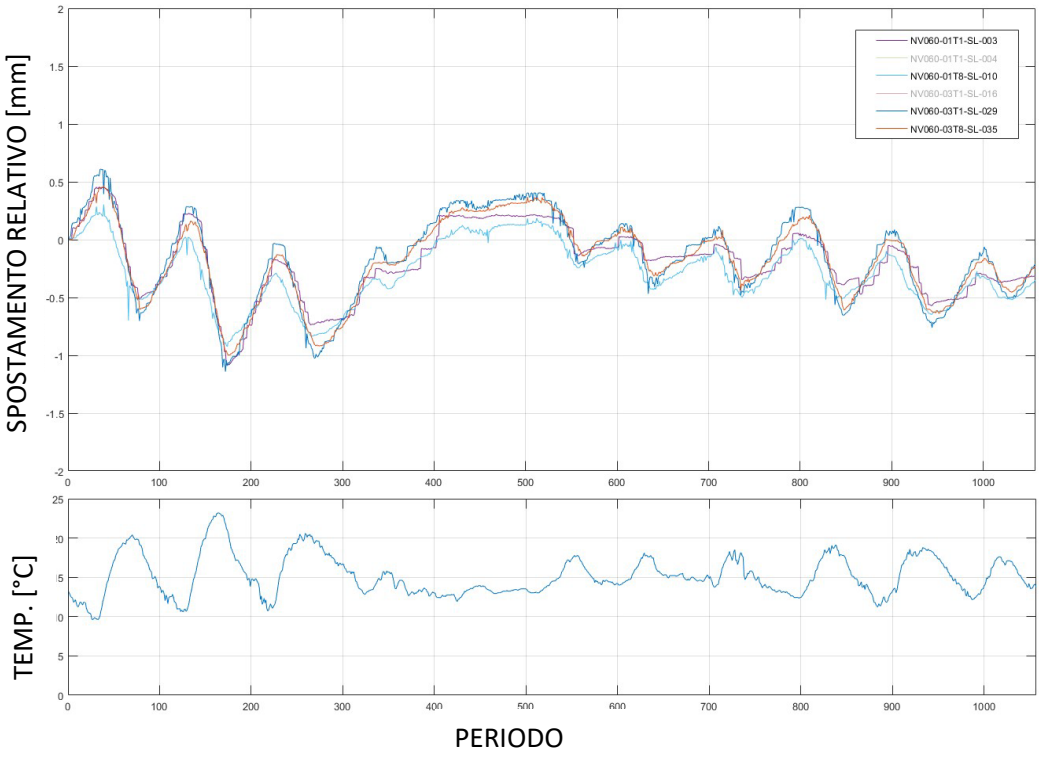
In passato il monitoraggio aveva principalmente uno scopo di **breve termine**, essendo legato esclusivamente ad opere considerate "critiche" (ad alto rischio) → Early Warning

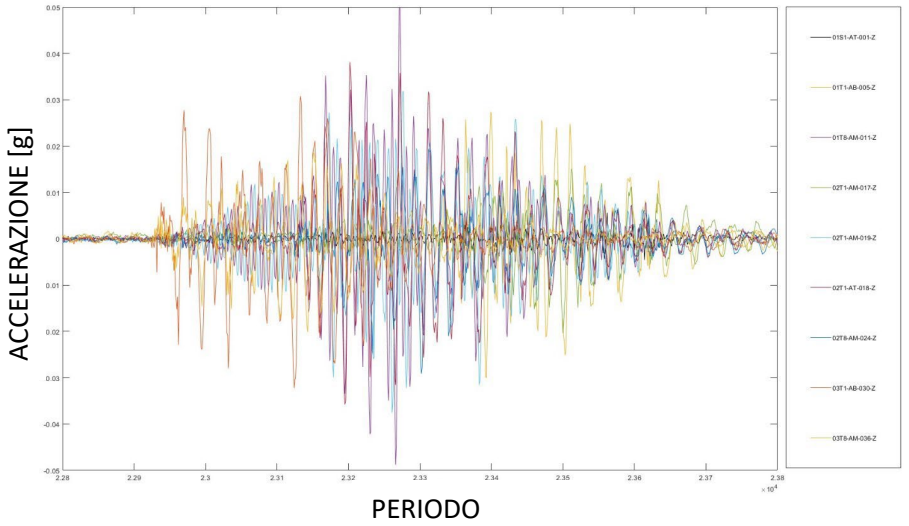
Oggi si punta ad un monitoraggio di più **lungo termine**, allo scopo di predire il comportamento delle opere nel tempo grazie ad una corretta caratterizzazione dello stato attuale (circa 1 anno di monitoraggio) che verrà confrontato con lo stato degli anni successivi → **S**tructural **H**ealth **M**onitoring

# Back Office - Analisi dei dati e interpretazione

Nell'attività successiva all'installazione dei sistemi di monitoraggio, SINA è coinvolta nel processo di:

2. DIAGNOSTICA DELLE OPERE: analisi del dato secondo prestabiliti scenari al fine di dare un'interpretazione al comportamento delle opere (con una reportistica periodica)



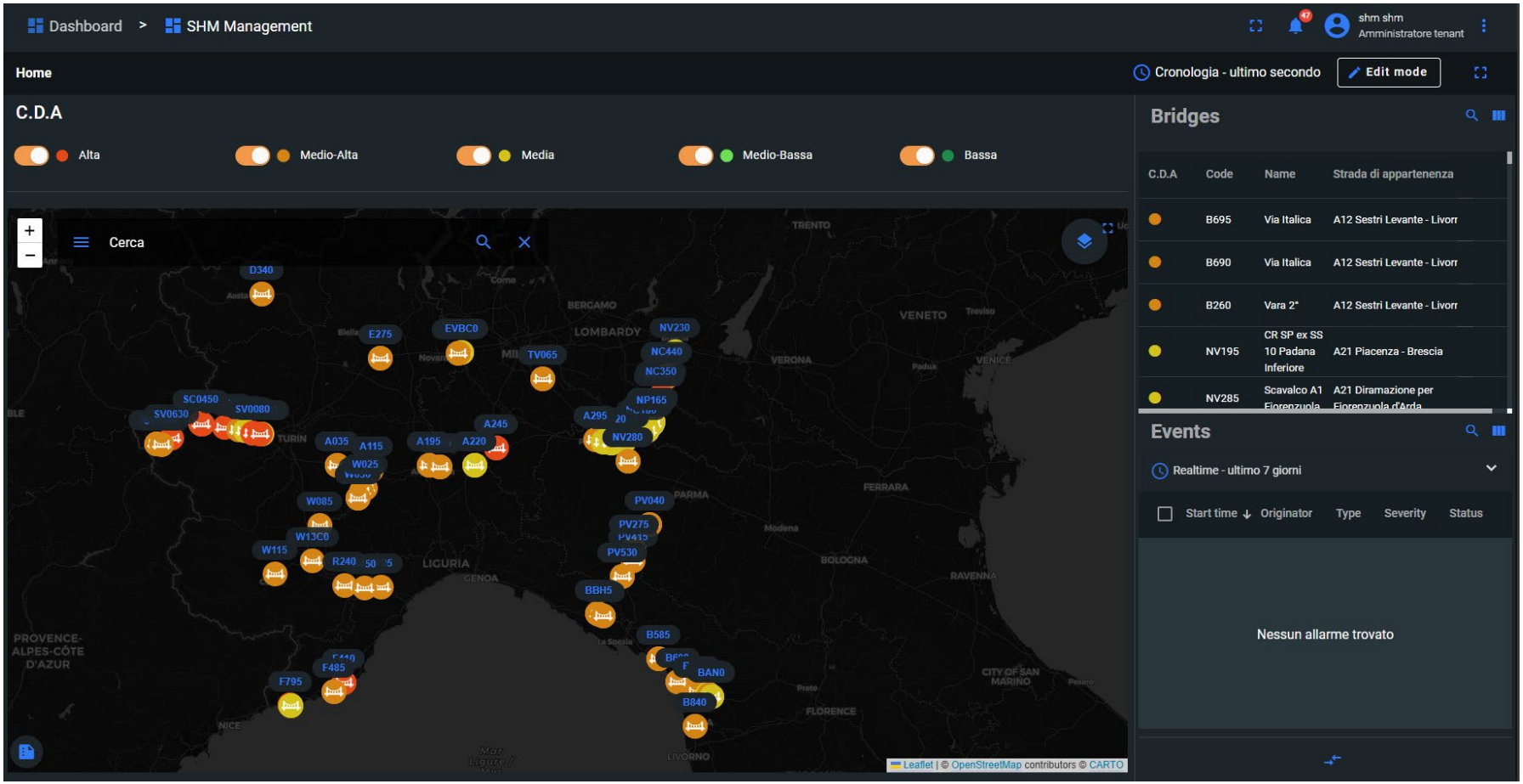



SINA SINELEC

# PIATTAFORMA

# Piattaforma

Attraverso l'utilizzo della **Piattaforma sviluppata da SINELEC** è possibile contestualizzare le opere sulla base della conoscenza disponibile ed analizzare i dati in maniera oggettiva e ricorsiva implementando anche routine di automazione



# Architettura intelligente

## Edge

Rotazione circolare, cache intelligente, riduzione latenza, aumento robustezza

## Sincronizzazione

Replica bidirezionale tra i nodi edge e il centro

## Sicurezza

Crittografia End-to-end, Protocolli di autenticazione sicura

## Dati

Riduzione traffico di rete (invio dei soli risultati)

**Massima integrità dei dati per operazioni “mission-critical”**

# SHM & Intelligenza Artificiale

## Analisi ML

Classificazione e regressione, rumore di fondo e anomalie

## Linear R.

Predice la tendenza strutturale con semplici relazioni lineari

## Random F.

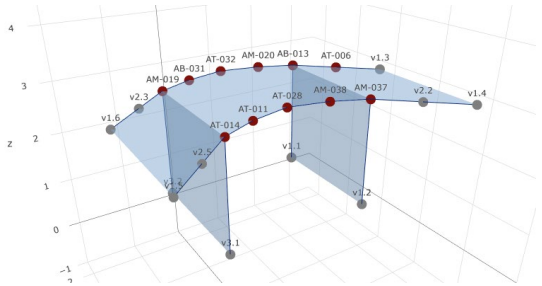
Classificazione robusta e regressione da decision tree multipli

## PCA

Riduce la complessità dei dati conservando le informazioni essenziali

## OMA

Identifica i parametri modali dalle vibrazioni ambientali

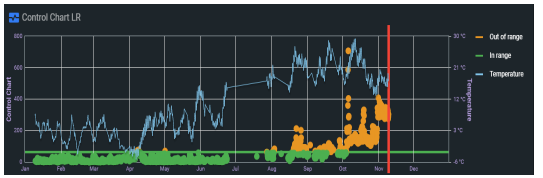



## Statica

Pre-processamento, tracciamento trend e variazioni dati

## Control Charts

Tracciamento variazioni e individuazione tendenze e anomalie




**DATO GREZZO** → **INTERPRETAZIONE**

**Da segnali grezzi a concrete interpretazioni — L'AI trasforma i dati strutturali in conoscenza**

SINA

# STUDI E RICERCHE

# Analisi dei dati e interpretazione

All'analisi basata su **modello agli elementi finiti** (model based) affianca un **approccio basato sui soli dati,** o al limite sulla geometria propria del sistema (data driven), avvalendosi di algoritmi di nuova concezione per l'interpretazione del comportamento strutturale.

## Model based

**Vantaggi**:

- Se correttamente impostato **localizza con precisione anomalie**
- Possibilità di **aggiornare** proprietà caratteristiche e condizioni al contorno (condizioni di carico, danno, …)
- Condurre **verifiche** secondo normativa (NTC, Eurocodici, …)

**Svantaggi**:

- **Modellazione onerosa** in termini di tempo e risorse
- Necessarie informazioni di dettaglio per la costruzione e corretta calibrazione del modello (**incertezza nella conoscenza**)
- **Updating complesso** in fase operativa sulla base dei dati acquisiti

## Data driven

**Vantaggi**:

- Monitoraggio basato **solo su dati** (in caso di scarsa conoscenza opere)
- Gestione di grandi quantità di dati sfruttando la possibilità di introdurre algoritmi di **automazione**
- Facilità di **aggiornamento**

**Svantaggi**:

- Limitata possibilità di **interpretazione** delle anomalie individuate;
- Dipendenza dall'**affidabilità** dei dati
- Necessità **infrastruttura adeguata** per immagazzinamento dei dati e processamento degli algoritmi

**È possibile sfruttare la sinergia dei due approcci per massimizzarne i vantaggi…**

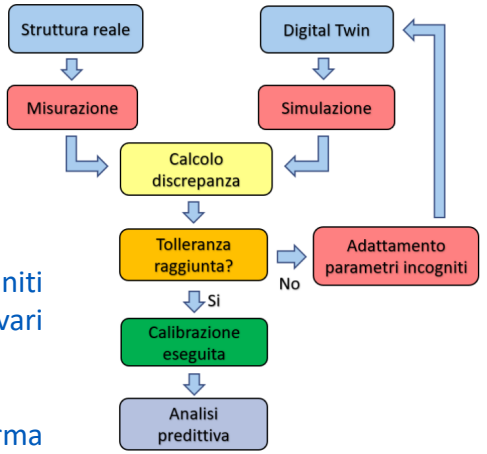
# CAEmate: una soluzione innovativa

Dal 2023 SINA collabora con CAEmate nell'ottica di valutare nuove soluzioni per **il monitoraggio e la manutenzione predittiva** di ponti e viadotti.

CAEmate ha condotto con SINA lo sviluppo di un **Gemello Digitale**, sistema basato su simulazione, analisi inversa in tempo reale e intelligenza artificiale.

Durante la sperimentazione, CAEmate ha modellato alcune strutture, oggetto di monitoraggio da parte di SINA:

- Un viadotto a 3 campate con impalcato isostatico a graticcio di travi e traversi in c.a. (Luci fino a 20 m circa)
- Un viadotto formato da 14 campate isostatiche in c.a.p. (Luci fino a 45 m circa)
- Due viadotti a cassone continuo precompresso formato da 7 campate (Luci fino a 100 m circa)




Il Gemello Digitale è stato **calibrato in continuo** attraverso simulazioni multifisiche automatiche agli elementi finiti che hanno permesso di considerare l'evoluzione dello stato tenso-deformativo della struttura, tenendo conto di vari effetti: carichi agenti, vibrazioni, temperatura, creep, danneggiamento progressivo e fatica.

Il Gemello digitale di CAEmate viene visualizzato online attraverso web browser e si appoggia alla piattaforma cloud-based **WeStatix SHM**, flessibile nell'acquisizione di dati, sicura, stabile e intuitiva nell'utilizzo.

La piattaforma permette ulteriori funzionalità:

- Possibilità di scaricare il modello BIM (formato .ifc) dell'opera per utilizzo da remoto con software di terze parti;
- Servizio di segnalazione automatica per variazioni di stato significative della struttura (soglie) e del sistema (assenza di dati);
- Possibilità di esportare una reportistica di dettaglio sui dati;

# CAEmate: Digital Twin

La modellazione si basa sulle reali caratteristiche della struttura, attraverso uno studio della documentazione disponibile e sui dati del monitoraggio, restituendo una migliore conoscenza del comportamento reale della struttura:

## Input del modello

- Fasi di carico
- Fasi di precompressione
- Geometrie: impalcato, pile, appoggi
- Interazione terreno-struttura
- Simulazione delle fasi di costruzioni e operative
- Dati del monitoraggio:
  - Rotazioni
  - Accelerazioni
  - Temperatura

## Output del modello

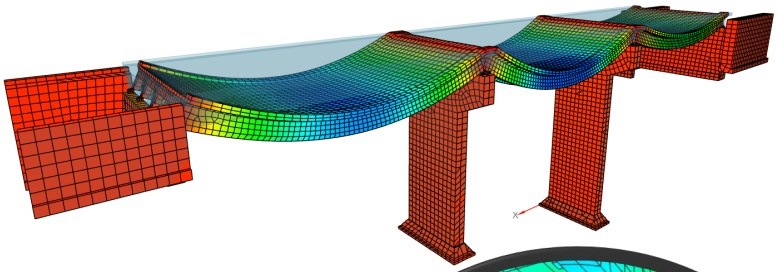
- Deformazioni transitorie
- Deformazioni permanenti
- Parametri OMA:
  - Frequenze naturali
  - Forme modali
  - Smorzamento
- Fattore di utilizzo
- Identificazione automatica dei carichi ed eventuali danni

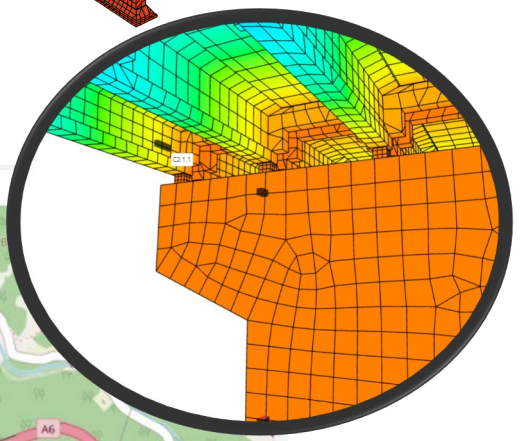
L'obiettivo del Digital Twin è di **minimizzare la discrepanza tra i dati misurati e i risultati delle simulazioni numeriche**, tramite analisi inverse e algoritmi di ottimizzazione iterativa multi-obiettivo che identificano qualsiasi parametro strutturale incognito (o per il quale ci sia una significativa incertezza) che governi i risultati della simulazione.

**Le calibrazioni non mirano ad ottenere la corrispondenza tra misura e simulazione, imponendo i dati misurati in quest'ultima, bensì a caratterizzare il comportamento dell'opera nel tempo, durante la sua intera vita utile, correlando cause ed effetti.**

# CAEmate: Digital Twin

La piattaforma presenta due interfacce: una **grafica 3D** e una **dashboard** per la lettura ed interpretazione dei dati.





# CAEmate: Calibrazione del modello

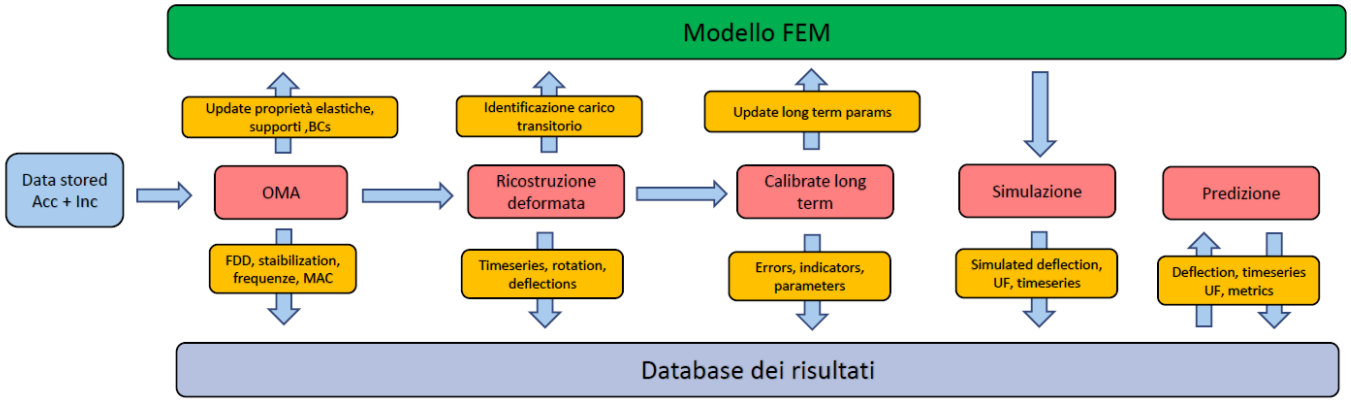
La calibrazione del modello avviene considerando i seguenti task:

- **Analisi Modale Operativa** (OMA): identificazione di **frequenza naturale**, lo **smorzamento** e le **forme modali** utilizzando i dati di risposta strutturale ottenuti in condizioni operative reali → identificare eventuali variazioni delle caratteristiche strutturali, come ad esempio rigidezza degli elementi strutturali, giunti o appoggi.

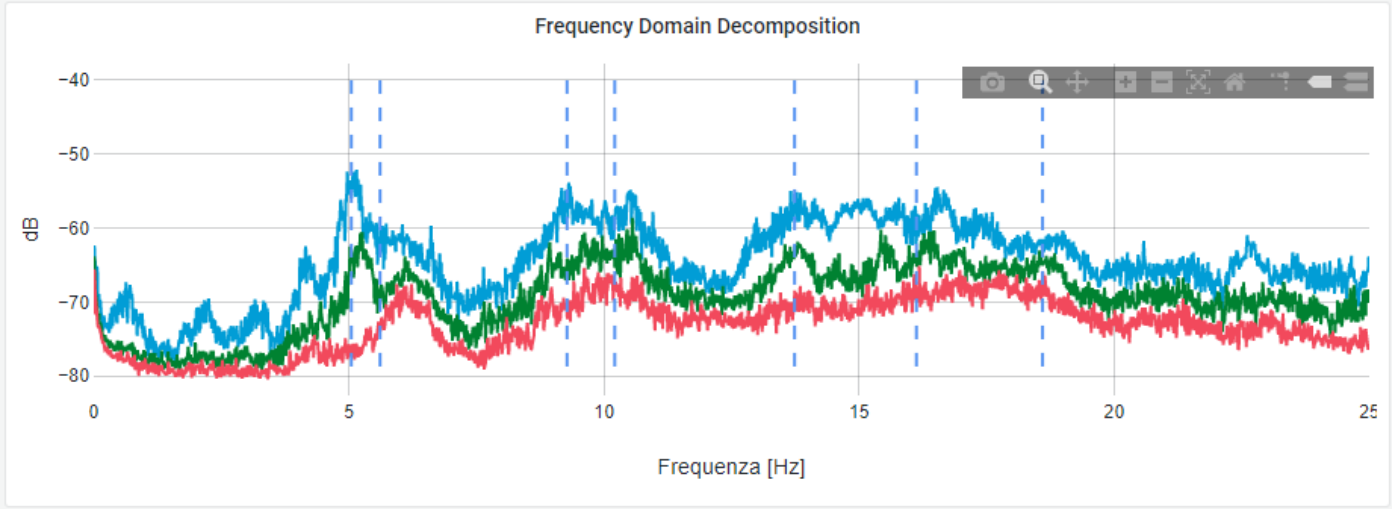
- **Ricostruzione della deformata**: tramite le **rotazioni misurate** si ricostruisce la rotazione complessiva e lo **spostamento complessivo** da cui si ricava lo **spostamento depurato dell'effetto termico.**

- **Calibrazione di lungo periodo**: l'identificazione di parametri non lineari del materiale tramite rimozione di effetti dovuti a temperatura e carichi transitori, e rappresentativi quindi della deformata anelastica dell'impalcato.

- **Calibrazione di breve periodo**: spostamenti dovuti a gradienti di temperatura, carichi agenti (es. traffico), che causano deformazioni e spostamenti repentini e solitamente reversibili (elastici) oppure anche scenari di danneggiamento improvviso.



# CAEmate: OMA


Frequency Domain Decomposition
dB
−40
−50
−60
−70
−80
0
5
10
15
20
25
Frequenza [Hz]

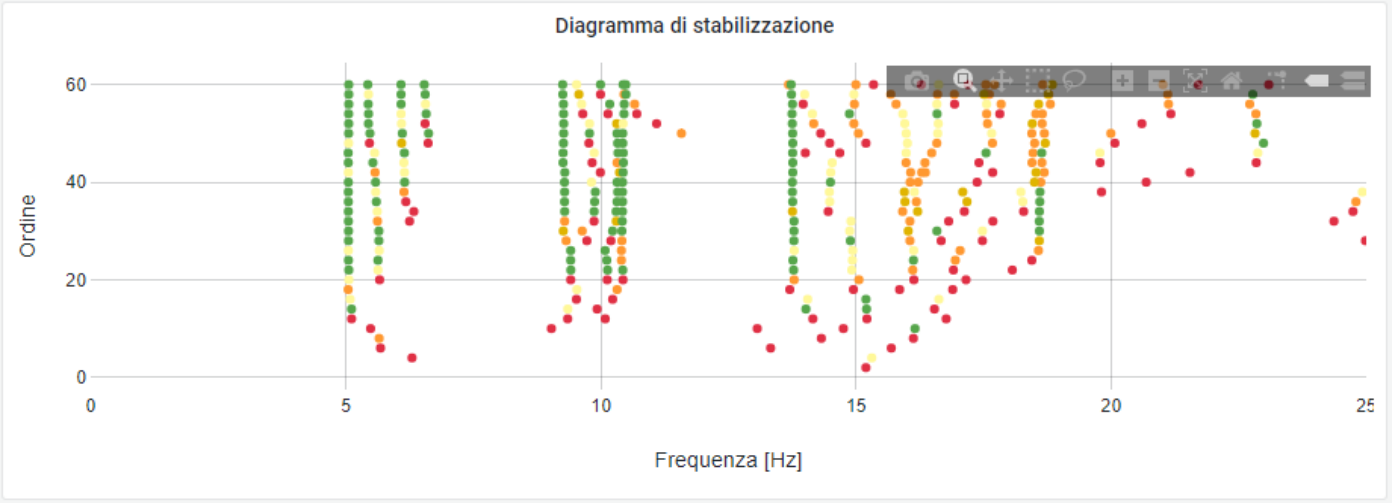


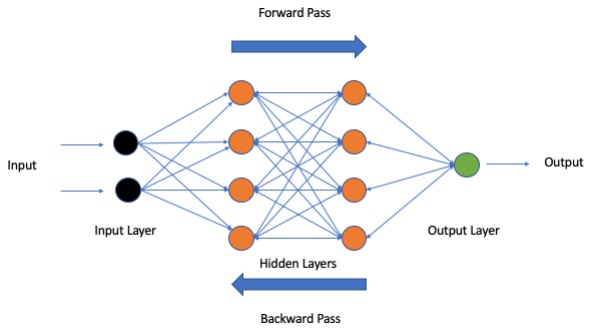
Diagramma di stabilizzazione
Ordine
60
40
20
0
0
5
10
15
20
25
Frequenza [Hz]

# CAEmate: Reti neurali

Il Gemello Digitale viene sottoposto ad una continua **calibrazione** sulla base dei dati misurati, attraverso analisi inversa, algoritmi di ottimizzazione ed intelligenza artificiale, con lo scopo di predeterminare il comportamento e il deterioramento futuro della struttura.

Le potenziali **incognite del problema** (rigidezza effettiva, grado di danneggiamento…), non misurabili direttamente, vengono identificate indirettamente: le incognite del modello sono aggiornate in continuo su base giornaliera minimizzando la discrepanza tra dati misurati e risultati del modello di calcolo.

L'approccio utilizzato da CAEmate per la previsione puntuale di **serie temporali univariate** (ossia previsioni in cui si analizza una sola incognita al variare del tempo) utilizza architetture di **deep neural network** (DNN).




Le reti neurali profonde (deep neural networks) sono modelli ispirati al cervello umano e composti da molteplici strati (layers) di «neuroni», uniti da complessi collegamenti (links).

Le DNN basate su **residual links** (collegamenti residui che "saltano" uno o più strati per facilitare il passaggio delle informazioni e rendere l'addestramento più stabile ed efficace) permettono di migliorarne le prestazioni:

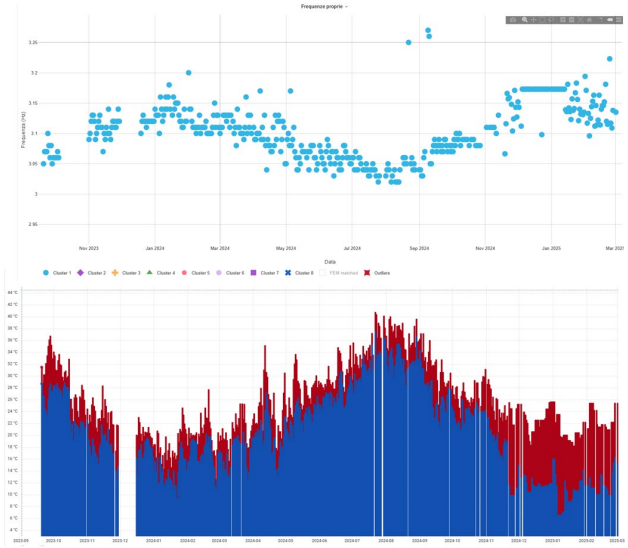
- **Forward residual links** (connessioni che portano l'informazione in avanti oltre il livello successivo)
- **Backward residual links** (connessioni che consentono l'adattamento del flusso inverso migliorando l'apprendimento)

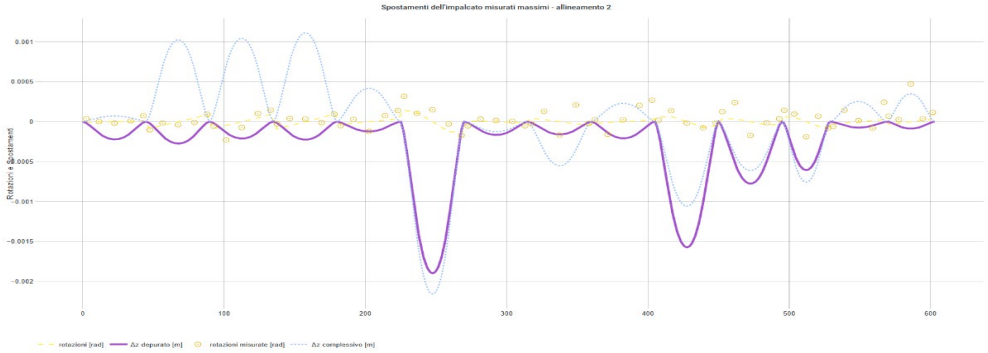
Il tipo di rete neurale viene scelto in base alle caratteristiche della serie temporale: dimensione del dataset, tendenze e influenza delle stagionalità.
Due tipici esempi di reti sono le RNN (**Recurrent Neural Networks**), *adatte per dati sequenziali* e le LSTM (**Long Short-Term Memory**), *una versione migliorata delle RNN, capace di "ricordare" a lungo termine e gestire meglio problemi di dipendenze temporali*.

**Attraverso la calibrazione iterativa, è possibile aumentare progressivamente l'affidabilità e la precisione del gemello digitale nel tempo**

# CAEmate: Caso studio

## Dipendenza delle frequenze dalla temperatura



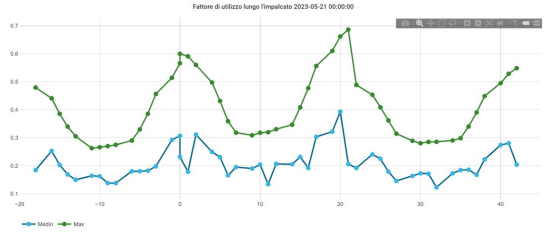



## Deformazioni massime e di lungo periodo

## Clustering modale

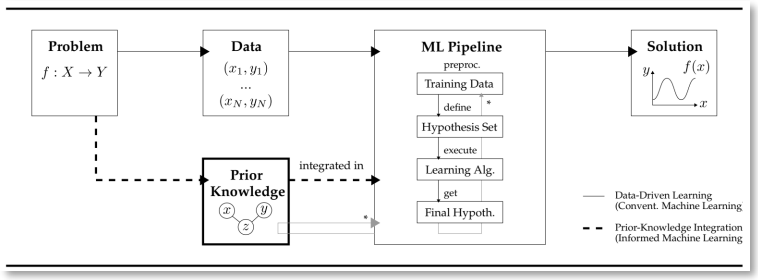
Il **fattore di utilizzo** calcolato in ogni punto della struttura viene visualizzato direttamente sul gemello digitale, permettendo di identificare le zone del viadotto maggiormente sollecitate e l'evoluzione di tale coefficiente nel corso del tempo.

Il fattore di utilizzo è composto dall'inviluppo di diverse componenti, tra cui verifiche a pressoflessione, taglio, verifiche delle tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio da armatura, nonché dalla quantificazione dell'apertura delle fessure...



# PoliMi: Population based SHM

**Titolo:**
*A Machine Learning Framework for Anomaly Detection in Bridges as a Decision Support Tool for Maintenance Management*




L. von Rueden *et al.*, 2023

**Descrizione:**
Il progetto propone una nuova metodologia per rilevare anomalie e danneggiamenti sui ponti all'interno di una rete infrastrutturale, utilizzando tecniche di **Machine Learning** applicate allo **Structural Health Monitoring.**
In particolare, si fa uso del **Transfer Learning** per sfruttare dati da ponti (o campate dello stesso ponte) che presentano dati del monitoraggio più numerosi al fine di analizzarne altri con numero di dati o sensori inferiore.

**Obiettivo:**
Sviluppare un **sistema robusto di machine learning** per identificare deviazioni rispetto alla condizione di riferimento in ponti "sani ", sfruttando transfer learning e tecniche "physics-informed" di novelty detection.

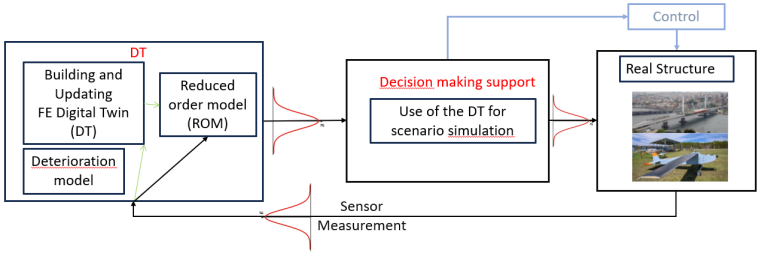
Sarà ulteriore obiettivo aumentare l'affidabilità del sistema anche in condizioni ambientali e operative differenti tra ponti sorgente e target.

**Processo:**
1. Analisi e minimizzazione degli **effetti ambientali e operativi** (EOFs) tramite metodi statistici e ML;
2. Selezione e validazione dell'approccio di **transfer learning** (attraverso un caso reale monitorato da SINA);
3. Sviluppo di un algoritmo "physics-informed" per il **novelty detection**;
4. Validazione del sistema su due ponti con condizioni operative diverse.

**Risultati attesi:**
Il framework sarà validato su casi studio realistici basati su dati di monitoraggio forniti da SINA per:
- Verificare la capacità di **trasferire conoscenza** tra ponti diversi;
- Testare la robustezza rispetto a variazioni ambientali e operative;
- Confrontare le prestazioni raggiunte con quelle di altri metodi tradizionali.

# PoliMi: Predictive maintenance

**Titolo:**
*Model Updating and Damage Detection for Bridge Integrity Management*




**Descrizione:**
Il progetto propone un approccio innovativo che unisce il **Bayesian Model Updating (BMU)** con un **modello surrogato basato su Variational Autoencoder (VAE)** per rilevare il danneggiamento. Il sistema consente di localizzare e stimare l'intensità del danno a partire dai dati di monitoraggio, fornendo un supporto al gestore della manutenzione.

**Obiettivo:**
Sviluppare un **sistema per il rilevamento in tempo reale dei danni** nei ponti, combinando modelli opportunamente calibrati (FE + BMU) e modelli surrogati data-driven (VAE) per:

- Migliorare la rappresentazione del comportamento reale della struttura;
- Consentire la rilevazione in tempo reale della posizione e intensità del danno;
- Fornire supporto alle decisioni del manutentore sulla base di regole predefinite.

**Processo:**

1. **Aggiornamento** del modello fisico (FE) mediante Bayesian Model Updating (BMU);
2. Generazione tramite il modello precedente di **scenari di danno** simulati per addestrare il modello surrogato;
3. **Addestramento del modello** surrogato basato su VAE, che apprende la relazione tra proprietà modali e scenari di danno;
4. **Inferenza in tempo reale**: il modello surrogato VAE riceve nuovi dati SHM e fornisce posizione e intensità del danno;
5. Definizione di **regole** per l'attivazione di interventi se l'intensità del danno supera soglie predefinite.

**Risultati attesi:**

- Applicazione su un **caso studio realistico** basato su dati di monitoraggio forniti da SINA;
- **Accuratezza elevata** nel classificare la posizione del danno;
- Rilevamento efficace della **progressione del danno nel tempo**;
- **Decision making automatizzato** su scenari simulati, con soglie di intervento al 20% e 40% di riduzione della rigidezza.

# PoliMi: Confronto DD-MB

## Transfer Learning (data driven)

**Vantaggi**:

- **Riduzione dei costi** per il monitoraggio strumentale grazie all'uso di dati da strutture simili;
- **Scalabilità** su reti infrastrutturali ampie;
- **Robustezza** in ambienti non uniformi;
- **Affidabilità** grazie all'integrazione di conoscenze fisiche;

**Svantaggi**:

- Necessità di **valutare la somiglianza** tra strutture per garantire il successo del transfer learning;
- Limitata disponibilità di **dati di danno reali** per addestrare gli algoritmi;
- **Complessità computazionale** e metodologica nell'implementazione del sistema;
- Dipendenza da **accuratezza dei modelli fisici** e da una corretta rimozione delle EOFs.

## FEM + BMU & VAE (model based)

**Vantaggi**:

- **Alta accuratezza** nel rilevamento di danni localizzati;
- **Aggiornamento continuo** dei modelli con dati reali;
- **Efficienza computazionale** grazie al modello surrogato;
- **Scalabilità** su altri casi studio tramite simulazioni.

**Svantaggi**:

- **Dipendenza da dati simulati** per addestrare il VAE;
- **Soglie prefissate** per le decisioni che potrebbero non adattarsi a tutti i casi reali;
- Necessità di un **FEM dettagliato e ben calibrato**;
- La qualità del risultato dipende dalla **bontà dell'identificazione modale** e dalla gestione delle **incertezze**.

# Grazie per l'attenzione

*#movingtothefuture*

SINA
ASTM GROUP