

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Monitoraggio di impalcati da ponte
a graticcio con inclinometri**



Relatore

Prof. Gabriele Bertagnoli

Candidato

Thomas Franco

Anno Accademico 2019-2020

INDICE

1 INTRODUZIONE	1
1.1 VIADOTTO IN ESAME	2
1.2 SENSORI INCLINOMETRICI	3
1.2.1 Principio di funzionamento	3
1.2.2 Fissaggio alla struttura	5
1.3 DATASET DEL MONITORAGGIO	7
1.3.1 File di output.....	7
1.3.2 Sensibilità degli strumenti e soglia di rumore.....	10
1.4 ALGORITMO IN PYTHON	11
1.4.1 Obbiettivi dell'analisi.....	11
1.4.2 Moduli aggiuntivi.....	11
1.4.3 Struttura del codice.....	13
1.4.4 File per i parametri di input	15
1.4.5 Cartella di salvataggio	15
1.5 PROCESSO DI ACQUISIZIONE DEI DATI	16
1.5.1 Posizione e proprietà dei sensori da analizzare.....	16
1.5.2 Lettura dei file e acquisizione dei dati.....	18
2 PULIZIA DEI DATI	20
2.1 RIMOZIONE DELLE PORZIONI COSTANTI.....	20
2.1.1 Calcolo della lunghezza limite.....	21
2.1.2 Eliminazione dei plateau	27
2.2 CORREZIONE DELLE PORZIONI TRASLATE	31
2.2.1 Richiamo della routine esterna.....	33
2.2.2 Scelta del parametro di controllo e definizione del limite	35
2.2.3 Algoritmo di controllo dei cicli di pulizia	37
2.2.4 Algoritmo di riconoscimento e pulizia.....	38
2.2.5 Taratura del parametro α	42
2.2.6 Analisi del segnale di esempio	50
2.3 CORREZIONE DEI PICCHI	53
2.3.1 Richiamo della routine esterna.....	54
2.3.2 Algoritmo 1	56
2.3.3 Algoritmo 2	57
2.4 SALVATAGGIO E VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI	60
2.4.1 Confronto tra grafici.....	60
2.4.2 File di testo	63

3 ANALISI DEI SEGNALI	65
3.1 RIMOZIONE DELLE DERIVE STRUMENTALI	65
3.1.1 Medie mobili sulle rotazioni grezze.....	65
3.1.2 Medie mobili su temperatura e umidità	67
3.1.3 Calcolo dei coefficienti di correlazione	68
3.1.4 Calcolo della deriva istantanea.....	75
3.1.5 Seconda correzione dei segnali	77
3.1.6 Salvataggio dei risultati	92
3.2 ANALISI NEL COMINIO DELLA FREQUENZA.....	97
3.2.1 Trasformata di Fourier	97
3.1.2 Densità spettrale di energia.....	99
3.3 CROSS-CORRELAZIONE DEI SEGNALI	101
3.3.1 Linee temporali dei segnali.....	101
3.3.2 Parametri di input	102
3.3.3 Algoritmo di acquisizione e analisi dei gruppi di sensori.....	103
3.3.4 Algoritmo di cross-correlazione dei segnali.....	105
3.3.5 Salvataggio dei file di output	109
3.3.6 Analisi sull'intero periodo di monitoraggio.....	110
3.3.7 Analisi finestre temporali ristrette	122
4 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	129
4.1 RISULTATI DELL'ANALISI	129
4.1.1 Pulizia dagli errori strumentali.....	129
4.1.2 Svincolamento dalle condizioni termo-igrometriche	132
4.1.2 Cross-correlazione tra sensori	133
4.2 MIGLIORAMENTI DEL CODICE DI CALCOLO	134
RINGRAZIAMENTI	135

INDICE DELLE FIGURE

CAPITOLO 1

Figura 1.1	Sezione trasversale del ponte monitorato (Sez. A-A).....	2
Figura 1.2	Pianta della prima campata del ponte monitorato	2
Figura 1.3	Struttura degli accelerometri capacitivi (a), meccanici (b) e piezoelettrici (c).....	4
Figura 1.4	Schema di un inclinometro a barra	5
Figura 1.5	Foto dell'inclinometro utilizzato senza cablaggio.....	6
Figura 1.6	Foto dell'inclinometro utilizzato con cablaggio	6
Figura 1.7	Inizio del file di output 'C1.1.1.csv'	7
Figura 1.8	Segnale di rotazione X relativo allo strumento C1.3.3	8
Figura 1.9	Segnale di rotazione Y relativo allo strumento C1.3.3.....	9
Figura 1.10	Segnale di temperatura relativo allo strumento C1.3.3	9
Figura 1.11	Segnale di umidità relativo allo strumento C1.3.3	10
Figura 1.12	Definizione e utilizzo di una funzione personalizzata in Python	12
Figura 1.13	Struttura del codice di calcolo	14
Figura 1.14	Secondo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	15
Figura 1.15	Primo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	16
Figura 1.16	Algoritmo di gestione dei percorsi dei file degli strumenti	17
Figura 1.17	Algoritmo di acquisizione dei segnali indicati dall'utente	18

CAPITOLO 2

Figura 2.1	Plateau presenti nel segnale di temperatura del sensore C1.1.1.....	21
Figura 2.2	Quarto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	22
Figura 2.3	Algoritmo per il calcolo delle lunghezze limite dei plateau	24
Figura 2.4	Distribuzioni statistiche della lunghezza dei plateau per le 4 grandezze del sensore C1.1.1	25
Figura 2.5	Algoritmo per la rimozione dei plateau dal generico segnale	29
Figura 2.6	Confronto tra il segnale prima e dopo il processo di pulizia dai plateau.....	30
Figura 2.7	Errori di traslazione creati nel segnale di rotazione X dello strumento C1.1.1.....	32
Figura 2.8	Algoritmo per il richiamo della funzione 'rimuovi_traslazione'.....	34
Figura 2.9	Algoritmo per la definizione del massimo scarto accettabile.....	36
Figura 2.10	Algoritmo di controllo dei cicli di pulizia del segnale	37
Figura 2.11	Prima parte del quinto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	39
Figura 2.12	Algoritmo per il rilevamento e la pulizia degli errori di traslazione.....	41
Figura 2.13	Numero di errori riscontrati nell'analisi in funzione del parametro α scelto	45
Figura 2.14	Seconda e terza parte del quinto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	47
Figura 2.15	Algoritmo di ricerca del percentile corretto.....	49
Figura 2.16	Errori di traslazioni presenti all'interno del segnale di esempio	51
Figura 2.17	Output dell'analisi del segnale di esempio.....	52
Figura 2.18	Confronto tra il segnale prima e dopo il processo di pulizia dagli errori di traslazione.....	53
Figura 2.19	Picchi presenti nel segnale di temperatura del sensore C1.1.2	53
Figura 2.20	Sesto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	55
Figura 2.21	Algoritmo 1 di pulizia dei picchi	57
Figura 2.22	Algoritmo 2 di pulizia dei picchi	59
Figura 2.23	Confronto tra il segnale prima e dopo il processo di pulizia dai picchi	60
Figura 2.24	Settimo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	61

Figura 2.25	Segnale di temperatura del sensore C1.6.5 prima e dopo la pulizia dei plateau	61
Figura 2.26	Segnale di umidità del sensore C1.2.1 prima e dopo la pulizia dei picchi	62
Figura 2.27	Terzo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	62
Figura 2.28	Confronto finale tra il segnale di rotazione X del sensore C1.1.2 prima e dopo la pulizia	63
Figura 2.29	File 'resoconto pulizia sensore C1.1.1'	64

CAPITOLO 3

Figura 3.1	Ottavo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	66
Figura 3.2	Immagine del file di testo 'dati_iniziali_A.csv'	75
Figura 3.3	Nono gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	76
Figura 3.4	Coefficienti di correlazione tra mr1X e mt24-rn in funzione del ritardo	84
Figura 3.5	Coefficienti di correlazione tra mr1X e mu24-rn in funzione del ritardo	85
Figura 3.6	Coefficienti di correlazione tra mr1Y e mt24-rn in funzione del ritardo	86
Figura 3.7	Coefficienti di correlazione tra mr1Y e mu24-rn in funzione del ritardo.....	87
Figura 3.8	Segnale di rotazione X del sensore C1.1.1 prima e dopo la rimozione delle correlazioni	91
Figura 3.9	Segnali grezzi di rotazione X istantanea e mediata del sensore C1.1.1	92
Figura 3.10	Segnali corretti di rotazione X istantanea e mediata del sensore C1.1.1	93
Figura 3.11	Segnali doppiamente corretti di rotazione X istantanea e mediata del sensore C1.1.1.....	93
Figura 3.12	Segnali mediati di rotazione X grezzi, corretti e doppiamente corretti del sensore C1.1.1	94
Figura 3.13	Segnali di rotazione X 'diff_mr2' e 'diff_mr2k' del sensore C1.1.1	95
Figura 3.14	Segnali di rotazione istantanei e mediati del sensore C1.1.1 dal 20/03/2019 al 24/03/2019	95
Figura 3.15	Ampiezze dei segnali di rotazione X grezzi, corretti e doppiamente corretti.....	99
Figura 3.16	ESD relativa ai segnali di rotazione grezzi, corretti e doppiamente corretti	100
Figura 3.17	Distribuzione di frequenza del tempo di campionamento del sensore C1.1.1	101
Figura 3.18	Undicesimo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'	102
Figura 3.19	Algoritmo di acquisizione dei gruppi di sensori da cross-correlare.....	104
Figura 3.20	Combinazione dei sensori del generico m-esimo gruppo	105
Figura 3.21	Intersezione delle linee temporali di una generica coppia di sensori	106
Figura 3.22	Algoritmo di cross-correlazione dei segnali	107
Figura 3.23	Effetto dell'intersezione sui segnali di rotazione X dei sensori C1.1.1 e C.1.2.1	108
Figura 3.24	File di output della cross-correlazione tra segnali dei sensori del gruppo 1	109
Figura 3.25	Divisione degli strumenti installati sull'impalcato nei macro-gruppi da cross-correlare.....	110
Figura 3.26	Andamento della correlazione tra rotazioni X dei sensori allineati trasversalmente	111
Figura 3.27	Andamento della correlazione tra rotazioni Y dei sensori allineati trasversalmente	111
Figura 3.28	Andamento della correlazione tra rotazioni X dei sensori allineati longitudinalmente	112
Figura 3.29	Andamento della correlazione tra rotazioni Y dei sensori allineati longitudinalmente.....	112
Figura 3.30	Pianta della campata con i sensori anomali segnalati.....	121
Figura 3.31	Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.1.4	123
Figura 3.32	Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.2.5	124
Figura 3.33	Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.2.4	125
Figura 3.34	Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.4.3	126
Figura 3.35	Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.6.2	127
Figura 3.36	Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.6.1	128

CAPITOLO 4

Figura 4.1	Andamento dello scarto quadratico medio dei sensori della trave 1.....	131
-------------------	--	-----

INDICE DELLE TABELLE

CAPITOLO 2

Tabella 2.1	Lunghezza limite dei plateau per i segnali relativi ai sensori delle travi 1 e 2	26
Tabella 2.2	Lunghezza limite dei plateau per i segnali relativi ai sensori delle travi 3 e 4	26
Tabella 2.3	Lunghezza limite dei plateau per i segnali relativi ai sensori delle travi 5 e 6	26
Tabella 2.4	Resoconto della pulizia dai plateau dei segnali relativi ai sensori delle travi 1 e 2	30
Tabella 2.5	Resoconto della pulizia dai plateau dei segnali relativi ai sensori delle travi 3 e 4	31
Tabella 2.6	Resoconto della pulizia dai plateau dei segnali relativi ai sensori delle travi 5 e 6	31
Tabella 2.7	Coefficienti di variazione per le grandezze relative ai sensori delle travi 1 e 2	42
Tabella 2.8	Coefficienti di variazione per le grandezze relative ai sensori delle travi 3 e 4	43
Tabella 2.9	Coefficienti di variazione per le grandezze relative ai sensori delle travi 5 e 6	43
Tabella 2.10	Numero di errori rilevati dall' algoritmo in funzione del parametro α scelto.....	44
Tabella 2.11	Picchi rilevati e corretti all'interno dei segnali relativi ai sensori delle travi 1 e 2	58
Tabella 2.12	Picchi rilevati e corretti all'interno dei segnali relativi ai sensori delle travi 3 e 4	58
Tabella 2.13	Picchi rilevati e corretti all'interno dei segnali relativi ai sensori delle travi 5 e 6	58

CAPITOLO 3

Tabella 3.1	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 1 e 2.....	69
Tabella 3.2	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 3 e 4.....	70
Tabella 3.3	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 5 e 6.....	71
Tabella 3.4	Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 1 e 2.....	72
Tabella 3.5	Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 3 e 4.....	73
Tabella 3.6	Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 5 e 6.....	74
Tabella 3.7	Derive termiche e igrometriche per le rotazioni X e Y dei sensori sulle travi 1 e 2.....	76
Tabella 3.8	Derive termiche e igrometriche per le rotazioni X e Y dei sensori sulle travi 3 e 4.....	77
Tabella 3.9	Derive termiche e igrometriche per le rotazioni X e Y dei sensori sulle travi 5 e 6.....	77
Tabella 3.10	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 1 e 2.....	78
Tabella 3.11	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 3 e 4.....	79
Tabella 3.12	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 5 e 6.....	80
Tabella 3.13	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 1 e 2.....	81
Tabella 3.14	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 3 e 4.....	82
Tabella 3.15	Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 5 e 6.....	83
Tabella 3.16	Ritardo con cui si presentano gli effetti termico (a) e igrometrico (b)	88
Tabella 3.17	Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva termica differita per le rotazioni X.....	89
Tabella 3.18	Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva termica differita per le rotazioni Y	90
Tabella 3.19	Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva igrometrica differita per le rotazioni X ...	90
Tabella 3.20	Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva igrometrica differita per le rotazioni Y....	90
Tabella 3.21	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 1	113
Tabella 3.22	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 2	114
Tabella 3.23	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 3	114
Tabella 3.24	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 4	115
Tabella 3.25	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 5	115
Tabella 3.26	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 1.....	116

Tabella 3.27	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 2.....	116
Tabella 3.28	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 3.....	117
Tabella 3.29	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 4.....	117
Tabella 3.30	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 5.....	118
Tabella 3.31	Cross-correlazioni tra rotazioni X (a) , Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 6.....	118
Tabella 3.32	Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.1.4.....	123
Tabella 3.33	Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.2.5.....	124
Tabella 3.34	Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.2.4.....	125
Tabella 3.35	Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.4.3.....	126
Tabella 3.36	Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.6.2.....	127
Tabella 3.37	Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.6.1.....	128

CAPITOLO 4

Tabella 4.1	Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e corretti dei sensori sulle travi 1 e 2.....	130
Tabella 4.2	Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e corretti dei sensori sulle travi 3 e 4.....	130
Tabella 4.3	Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e corretti dei sensori sulle travi 5 e 6.....	130
Tabella 4.4	Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e svincolati dei sensori sulle travi 1 e 2.....	132
Tabella 4.5	Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e svincolati dei sensori sulle travi 3 e 4.....	132
Tabella 4.6	Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e svincolati dei sensori sulle travi 5 e 6.....	132

Capitolo 1

Introduzione

Oggi, in Italia, il tema del monitoraggio strutturale è particolarmente sentito dai tecnici, dagli addetti ai lavori e più in generale da tutta l'opinione pubblica in seguito ad una serie di tragici eventi culminati con i crolli del viadotto Polcevera di Genova avvenuto nell'agosto del 2018 e del ponte di Albiano Magra (vicino a La Spezia) avvenuto nell'aprile del 2020.

Questi avvenimenti catastrofici, che negli ultimi anni stanno assumendo una preoccupante regolarità, hanno messo in luce la necessità di riesaminare le priorità programmatiche della rete infrastrutturale italiana e in particolare, per le numerose opere esistenti, di procedere a verifiche di dettaglio definendo adeguati criteri di monitoraggio manutentivo.

L'impianto infrastrutturale italiano, costituito da 11000 viadotti, di cui 4000 aventi lunghezza superiore a 100 metri, distribuiti su 30000 km di strade, è stato progettato e realizzato per la maggior parte nel XX secolo e, dunque, risulta vetusto per far fronte alle richieste prestazionali odierne che si fanno sempre più onerose in termini di traffico e logistica.

Gli interventi di manutenzione necessari a rimettere in sicurezza questi viadotti indeboliti dal tempo e dall'azione combinata di traffico e agenti atmosferici devono essere fondati su un buon livello di conoscenza della struttura e richiedono pertanto di essere affiancati da un buon sistema di indagini. Lo scopo finale di queste azioni mirate è primariamente la valutazione della sicurezza che sono in grado di garantire oggi i viadotti stradali al fine di programmarne gli interventi manutentivi. Inoltre, eventualmente, i sistemi di monitoraggio potranno in futuro essere potenziati e giocare un ruolo attivo nella sicurezza mediante l'implementazione di algoritmi che consentono un'analisi continua sulla struttura effettuando le verifiche del comportamento strutturale in tempo reale.

Gli obiettivi di questa tesi sono l'analisi e l'interpretazione dei dati derivanti da una campagna di monitoraggio effettuata su un viadotto della rete autostradale italiana e la scrittura di un algoritmo in Python in grado di acquisire ed elaborare i dati derivanti dalla strumentazione installata sul ponte in studio e da altre tipologie di strumentazione simili.

1.1 Viadotto in esame

Nel primo semestre dell'anno 2019, è stata effettuata una campagna di monitoraggio su un viadotto della rete autostradale italiana costituito da 12 campate isostatiche e avente lunghezza complessiva di circa 267 metri. Come mostrato in Figura 1.1, gli impalcati del ponte in studio sono graticci costituiti da 6 travi precomprese longitudinali equispaziate di 2 metri e con due sbalzi laterali di 1.1 metri.

In particolare, si hanno a disposizione i dati relativi alla prima campata sulla quale sono stati installati 5 sensori inclinometrici agli estremi, ai quarti e in mezzera di ogni trave longitudinale per un totale di 30 strumenti. Ognuno degli strumenti viene denominato con un codice identificativo del tipo Cx.y.z dove la lettera C sta per 'campata', x è il numero della campata del ponte, y è il numero della trave e z è il numero dello strumento installato sulla trave. In Figura 1.2, si riporta una pianta della prima campata in cui viene evidenziata la disposizione degli strumenti installati.

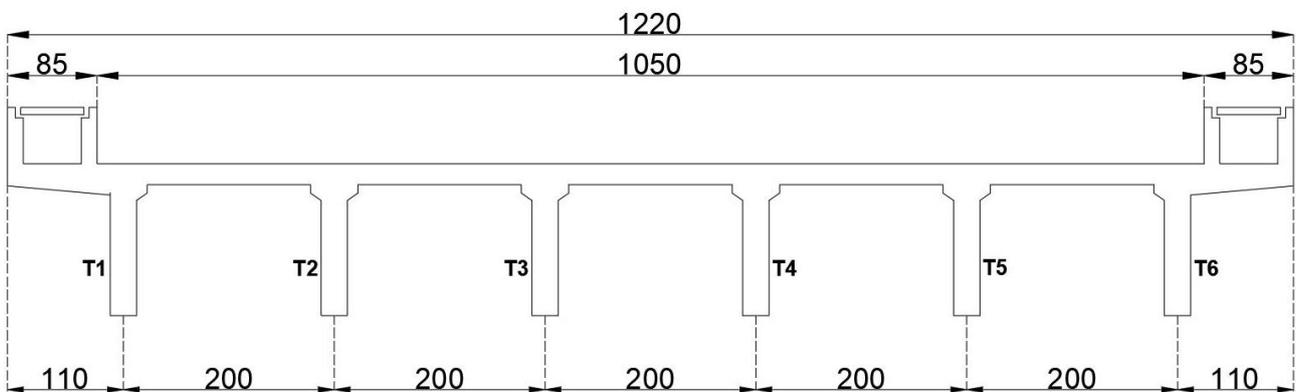


Figura 1.1 Sezione trasversale del ponte monitorato (Sez A-A)

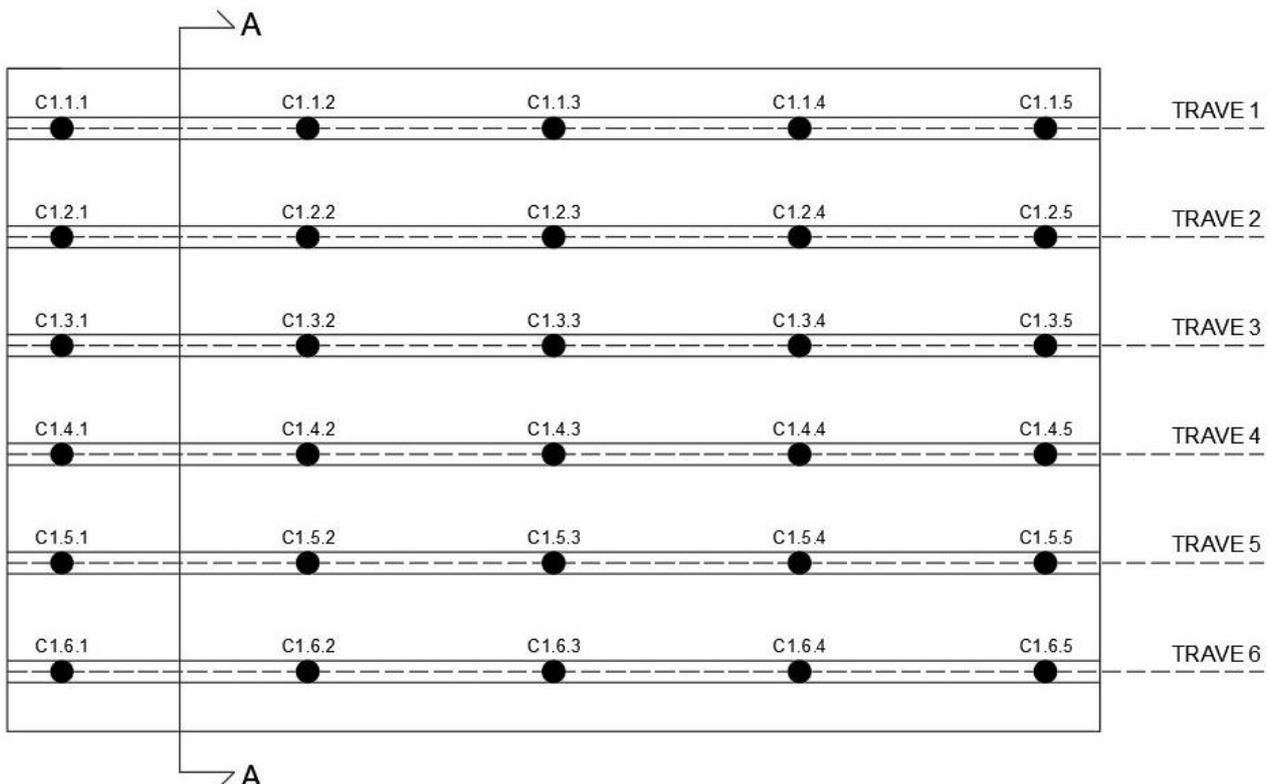


Figura 1.2 Pianta della prima campata del ponte monitorato

1.2 Sensori inclinometrici

In generale, l'inclinometro (o clinometro) è uno strumento utilizzato per misurare gli angoli di inclinazione di un oggetto rispetto alla direzione della gravità. In particolare, a seconda della tipologia, questi apparecchi sono in grado di misurare l'inclinazione rispetto ad un asse o rispetto ad un piano (e dunque a una coppia di assi) di riferimento solitamente grazie ad un accelerometro incorporato.

Gli inclinometri sono usati in svariati settori e, in particolare, trovano grande applicazione in ambito civile per il monitoraggio geotecnico di versanti (tubi inclinometrici) o, come nel caso in studio, per il monitoraggio strutturale di costruzioni esistenti (inclinometri a parete).

Il codice di calcolo implementato è in grado di gestire l'analisi di due tipi di output derivanti dal monitoraggio ad opera di due tipi differenti di sensori inclinometrici. Gli strumenti installati sul viadotto in esame sono degli inclinometri aventi tecnologia MEMS in grado di misurare due rotazioni rispetto a due assi ortogonali di riferimento. Questi sensori sono anche provvisti di un termometro e di un igrometro per misurare la temperatura e l'umidità del microclima interno allo strumento. La seconda tipologia di sensore compatibile con il codice è un inclinometro monoassiale MEMS a barra provvisto di un termometro.

1.2.1 Principio di funzionamento

Gli inclinometri misurano gli angoli di inclinazione sfruttando la gravità e sono dunque corredati da uno o più accelerometri. Il principio di funzionamento di un accelerometro è molto semplice poiché esso può venire schematizzato in modo elementare come una massa m nota, resa solidale ad un elemento di supporto attraverso una molla avente una certa rigidezza k , anch'essa nota.

Quando l'oggetto su cui è montato l'accelerometro è sottoposto a un'accelerazione, grazie alla sua inerzia, la massa m tende a conservare il suo stato cinematico ed è quindi la molla a deformarsi imprimendo alla massa una forza tale da farle avere la stessa accelerazione del supporto. Misurando l'allungamento Δl della molla e avendo nota la sua rigidezza k , è possibile ricavare la forza elastica impressa sulla massa, la quale risulta appunto proporzionale secondo la massa stessa m all'accelerazione subita dal supporto. L'accelerazione calcolata viene successivamente restituita in output per via digitale o analogica a seconda del modello del sensore.

Gli accelerometri di tipo capacitivo hanno un principio di funzionamento simile ma fondato su un fenomeno di natura elettromagnetica. Infatti, analogamente alla tipologia meccanica, essi si basano sullo spostamento di una massa; tuttavia, quest'ultimo non viene più ricavato misurando l'allungamento di una molla ma in funzione della variazione di capacità elettrica C di un condensatore. La capacità è infatti funzione della distanza tra le armature del condensatore di cui la prima è fissa mentre la seconda (la stessa massa m) è libera di muoversi. Noto lo spostamento, l'accelerazione del supporto viene ricavata, convertita in un segnale elettrico e restituita in output.

I sensori inclinometrici attualmente compatibili con il codice di calcolo implementato contengono invece degli accelerometri aventi tecnologia MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*). Essi sono dei microsistemi elettro-meccanici composti da un insieme di dispositivi di varia natura (meccanici, elettrici ed elettronici) integrati in forma altamente miniaturizzata su un substrato costituito da un materiale semi-conduttore (tipicamente il silicio).

Il loro principio di funzionamento si fonda sulla piezoelettricità ovvero sulla proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale se soggetti a una deformazione meccanica. In particolare, quando viene applicata una pressione (o una depressione) esterna, il cristallo si polarizza e lavora come un condensatore in quanto avviene una separazione delle cariche di segno opposto che si posizionano sulle facce opposte del cristallo stesso. Di conseguenza, se le due facce opposte vengono collegate ad un circuito esterno, viene generata una corrente detta piezoelettrica.

L'accelerometro può essere schematizzato con una massa m che lavora a mensola collegata (tipicamente utilizzando la cera o dei dispositivi magnetici o meccanici) con due elementi piezoelettrici posizionati all'incastro (costituiti comunemente da una lega ceramica ferroelettrica polarizzata artificialmente). Quando il gruppo viene fatto vibrare, la massa è soggetta a taglio e applica una forza ai due elementi piezoelettrici che, deformandosi, generano una corrente elettrica Q proporzionale all'accelerazione subita come mostrato nell'Equazione 1.1

$$Q = d_{ij} \cdot m \cdot a \quad (1.1)$$

Q è la carica indotta nel circuito, d_{ij} è chiamata sensibilità del trasduttore (ed è dipendente dal materiale piezoelettrico utilizzato), m è la massa e a è l'accelerazione in uscita dallo strumento. I vantaggi nell'utilizzo degli accelerometri piezoelettrici rispetto alle altre due tipologie sono la robustezza e l'affidabilità sul lungo periodo e la resistenza a sollecitazioni anche molto elevate. In Figura 1.3, si riporta la struttura degli accelerometri meccanici, capacitivi e piezoelettrici.

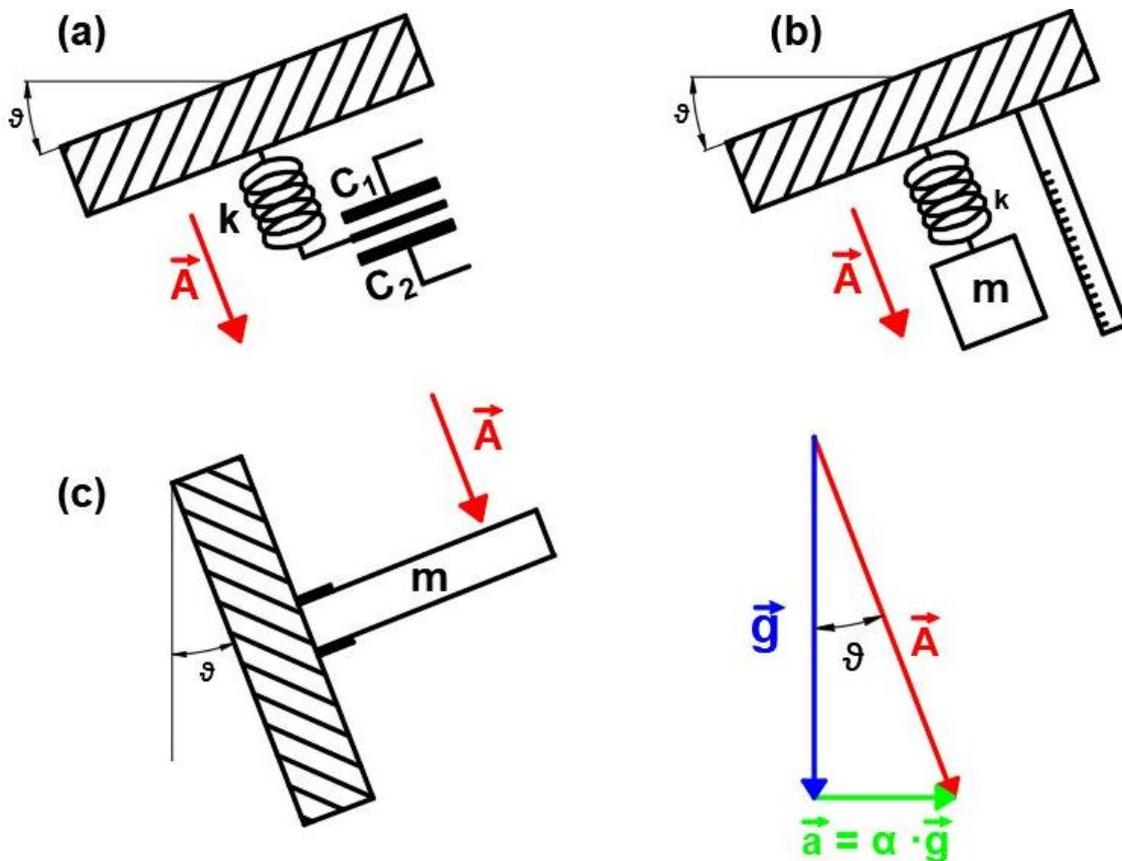


Figura 1.3 Struttura degli accelerometri capacitivi (a), meccanici (b) e piezoelettrici (c)

Indipendentemente dalla tipologia di accelerometro utilizzato, quest'ultimo restituisce una quantità α adimensionale, la quale è un'accelerazione normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità g e costituisce la componente orizzontale che, sommata vettorialmente alla gravità, fornisce l'accelerazione globale A inclinata del generico angolo ϑ .

Il triangolo rettangolo mostrato in Figura 1.3 ha come cateto minore l'accelerazione restituita a (riportata in funzione della gravità), come cateto maggiore l'accelerazione di gravità g e come ipotenusa l'accelerazione A misurata globalmente. Di conseguenza, come mostrato nell'Equazione 1.2, il parametro α non è altro che la tangente dell'angolo ϑ e dunque, preliminarmente, è necessario calcolare l'arcotangente di tutte le misurazioni per ottenere la rotazione dall'accelerazione misurata.

$$\vartheta = 1000 \cdot \arctan\left(\frac{\vec{a}}{\vec{g}}\right) = 1000 \cdot \arctan\left(\frac{\alpha \cdot \vec{g}}{\vec{g}}\right) = 1000 \cdot \arctan(\alpha) \quad (1.2)$$

Dal momento che gli angoli misurati dagli inclinometri sono molto piccoli, la tangente dell'angolo ϑ può essere confusa con l'angolo stesso e dunque i segnali non subiscono grosse variazioni.

Nel caso in studio, si utilizzano dei sensori biassiali che sono in grado di calcolare le rotazioni rispetto a due assi di riferimento e verranno restituiti conseguentemente in output due inclinazioni ϑ_x e ϑ_y .

1.2.2 Fissaggio alla struttura

Una delle differenze tra i due inclinometri attualmente compatibili con il codice è il sistema con cui vengono fissati alla struttura. Gli strumenti relativi al ponte in studio hanno il vantaggio di avere dimensioni assai ridotte e sono dunque contenuti in piccole scatole di plastica che vengono fissate direttamente alle travi del ponte con dei tasselli. Nelle Figure 1.5 e 1.6, si riportano le immagini dell'involucro che contiene i sensori utilizzati per il ponte in esame prima e dopo il cablaggio.

L'altra tipologia di strumento è invece un inclinometro 'a barra' (anche chiamato *tilt beams sensors*). Questi tipi di inclinometro a parete possono essere utilizzati singolarmente per monitorare l'inclinazione tra due punti oppure possono essere installato in serie per misurare i cedimenti differenziali della struttura. Come mostrato nel modello riportato in Figura 1.4, essi sono essenzialmente costituiti da un sensore (lungo circa 15 cm) montato su una trave di alluminio (di lunghezza L pari solitamente a 1, 2 o 3 metri) i cui estremi sono appunto i due punti di riferimento rispetto ai quali si vuole monitorare l'inclinazione.



Figura 1.4 Schema di un inclinometro a barra



Figura 1.5 Foto dell'inclinometro utilizzato senza cablaggio



Figura 1.6 Foto dell'inclinometro utilizzato con cablaggio

1.3 Dataset del monitoraggio

Gli strumenti installati sul ponte in studio contengono al proprio interno un sensore inclinometrico biassiale, un termometro e un igrometro, i quali sono stati attivi dalle ore 01:00 di venerdì 15 febbraio 2019 alle ore 01:58 di sabato 15 giugno 2019. In questi 4 mesi, ogni strumento ha misurato con un tempo di campionamento di 6-7 minuti per un totale di circa 26100 acquisizioni. Le misurazioni non sono state acquisite in maniera sincrona tra uno strumento e l'altro ma in sequenza e ogni lettura si discosta dalla precedente di 1-2 secondi. Questa peculiarità, unita al fatto che durante il periodo di monitoraggio alcuni sensori saltano delle misurazioni, porterà ad avere degli assi temporali non perfettamente sovrapponibili e creerà problemi in fase di confronto dei segnali di sensori diversi.

1.3.1 File di output

L'output di ogni strumento è organizzato in un file di testo (in formato csv) avente un numero di righe pari al numero di acquisizioni avvenute e un numero di colonne pari al numero di grandezze che vengono restituite per ogni acquisizione. In Figura 1.7, si riporta un'immagine dell'inizio del file relativo allo strumento C1.1.1, la quale mostra il layout con cui le misurazioni effettuate sono riportate all'interno del file di output.

```
timestamp, Ax[g], Ay[g], Max_x, Min_x, Max_y, Min_y, SQM_x, SQM_y, Humidity, Temperature
1550188813750,0.02331,-0.00965,0.02358,0.022969999999999997,-0.00932,-0.009909999999999999,0.0001,9e-05,59,8.5
1550189140955,0.02333,-0.00965,0.02362,0.02307,-0.00938,-0.0099,9e-05,9e-05,59,8.5
1550189481297,0.02331,-0.00967,0.02362,0.02306,-0.00932,-0.00996,0.0001,9e-05,59,8.5
1550189845161,0.0233,-0.00969,0.02361,0.023,-0.00942,-0.009940000000000001,0.0001,8e-05,59,8.5
1550190201499,0.02331,-0.00967,0.02358,0.02301,-0.00944,-0.00993,0.0001,9e-05,59,8.5
1550190554638,0.02333,-0.00965,0.02358,0.02306,-0.00938,-0.009909999999999999,9e-05,9e-05,59,8.5
1550190897711,0.02331,-0.00966,0.02367,0.023030000000000002,-0.00938,-0.00996,9e-05,9e-05,59,8.5
1550191227346,0.023280000000000002,-0.0097,0.02362,0.02295,-0.00941,-0.00999,0.00011,9e-05,59,8.5
1550191595405,0.023280000000000002,-0.00969,0.02361,0.02295,-0.00944,-0.00997,0.0001,9e-05,59,8.5
1550191941497,0.02331,-0.00967,0.02361,0.02298,-0.00938,-0.010020000000000001,0.0001,9e-05,59,8.5
1550192289935,0.02331,-0.00966,0.02361,0.023030000000000002,-0.00932,-0.00997,0.0001,0.0001,59,8.5
1550192643142,0.02332,-0.00966,0.02362,0.02304,-0.00936,-0.0099,9e-05,9e-05,59,8.5
1550192985913,0.02329,-0.00965,0.02358,0.02283,-0.0093,-0.00993,9e-05,9e-05,59,8.5
1550193338861,0.02331,-0.00966,0.02361,0.022969999999999997,-0.00941,-0.00997,0.0001,9e-05,59,8.5
```

Figura 1.7 Inizio del file di output 'C1.1.1.csv'

Questi file si chiamano *nome_sensore.csv* e, per comodità, vengono salvati in cartelle dedicate al singolo strumento e denominate nello stesso modo; questo semplificherà il salvataggio dei risultati. Osservando il file di output, si nota immediatamente che, nonostante la presenza di 3 soli sensori all'interno dello strumento, esso restituisce in output ben 11 grandezze differenti.

Ciò è dovuto al fatto che l'acquisizione delle rotazioni non è avviene in maniera istantanea ma in un intervallo di tempo Δt molto piccolo nel quale l'inclinometro effettua un gran numero di misurazioni diverse di cui esegue poi una statistica restituendo infine per ogni rotazione misurata il valore medio insieme ai valori massimi e minimi e ai rispettivi scarti quadratici medi.

Questo porta ad avere 8 misure di rotazione (4 per l'asse X e 4 per l'asse Y) alle quali vanno aggiunti gli output dell'igrometro e del termometro e il segnale che contiene tutti gli istanti di acquisizione.

A titolo di esempio, nelle Figure 1.8, 1.9, 1.10 e 1.11, si riportano gli andamenti dei segnali relativi ai valori medi di rotazione X e Y, alla temperatura e all'umidità misurati dallo strumento C1.3.3.

Riassumendo, ogni riga del file di output del generico strumento contiene le misurazioni relative alle grandezze fisiche riportate di seguito.

- **Timestamp:** è il riferimento temporale delle misurazioni restituito in formato Unix Timestamp ovvero come il numero di millisecondi intercorsi tra un 'tempo zero' (che è stato fissato convenzionalmente alle ore 00:00 di giovedì 01/01/1970) e l'istante relativo alla misurazione.
- **Ax[g] e Ay[g]:** sono i valori medi delle rotazioni (misurate nell'intervallo Δt) rispetto ai due assi di riferimento del sensore inclinometrico.
- **Max_x e Max_y:** sono i valori massimi delle rotazioni (misurate nell'intervallo Δt) rispetto ai due assi di riferimento del sensore inclinometrico.
- **Min_x e Min_y:** sono i valori minimi delle rotazioni (misurate nell'intervallo Δt) rispetto ai due assi di riferimento del sensore inclinometrico.
- **SQM_x e SQM_y:** sono i valori degli scarti quadratici medi delle rotazioni (misurate nell'intervallo Δt) rispetto ai due assi di riferimento del sensore inclinometrico.
- **Humidity:** sono i valori di umidità misurati dall'igrometro presente all'interno dello strumento e relativi al microclima presente nell'intorno del generico sensore.
- **Temperature:** sono i valori di temperatura misurati dal termometro presente all'interno dello strumento e relativi al microclima presente nell'intorno del generico sensore.

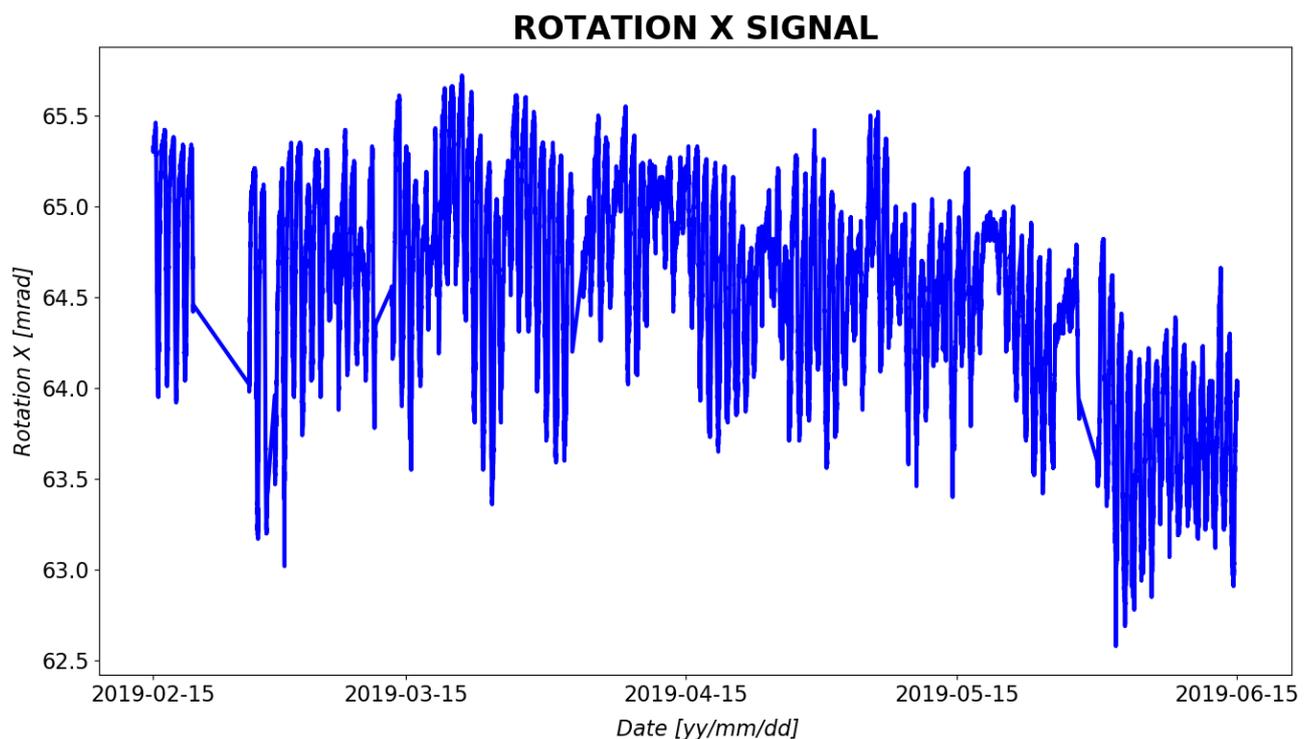


Figura 1.8 Segnale di rotazione X relativo allo strumento C1.3.3

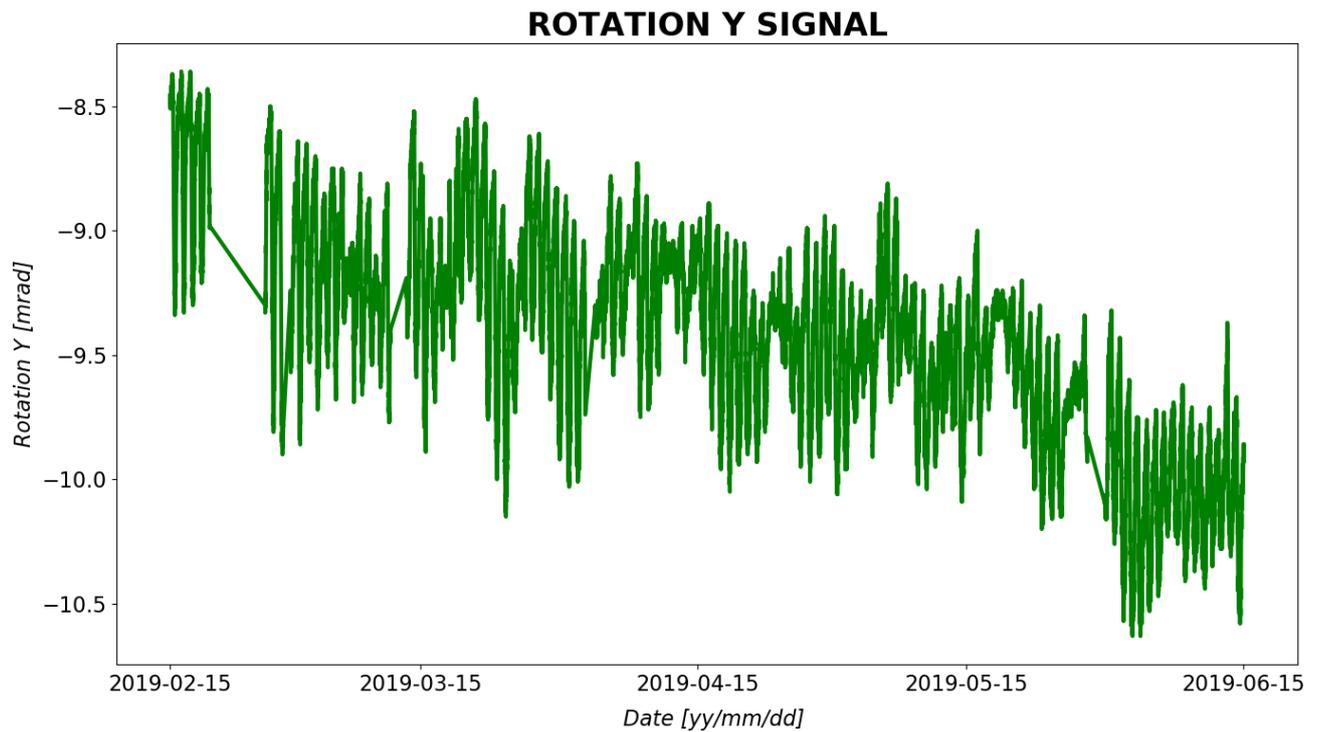


Figura 1.9 Segnale di rotazione Y relativo allo strumento C1.3.3

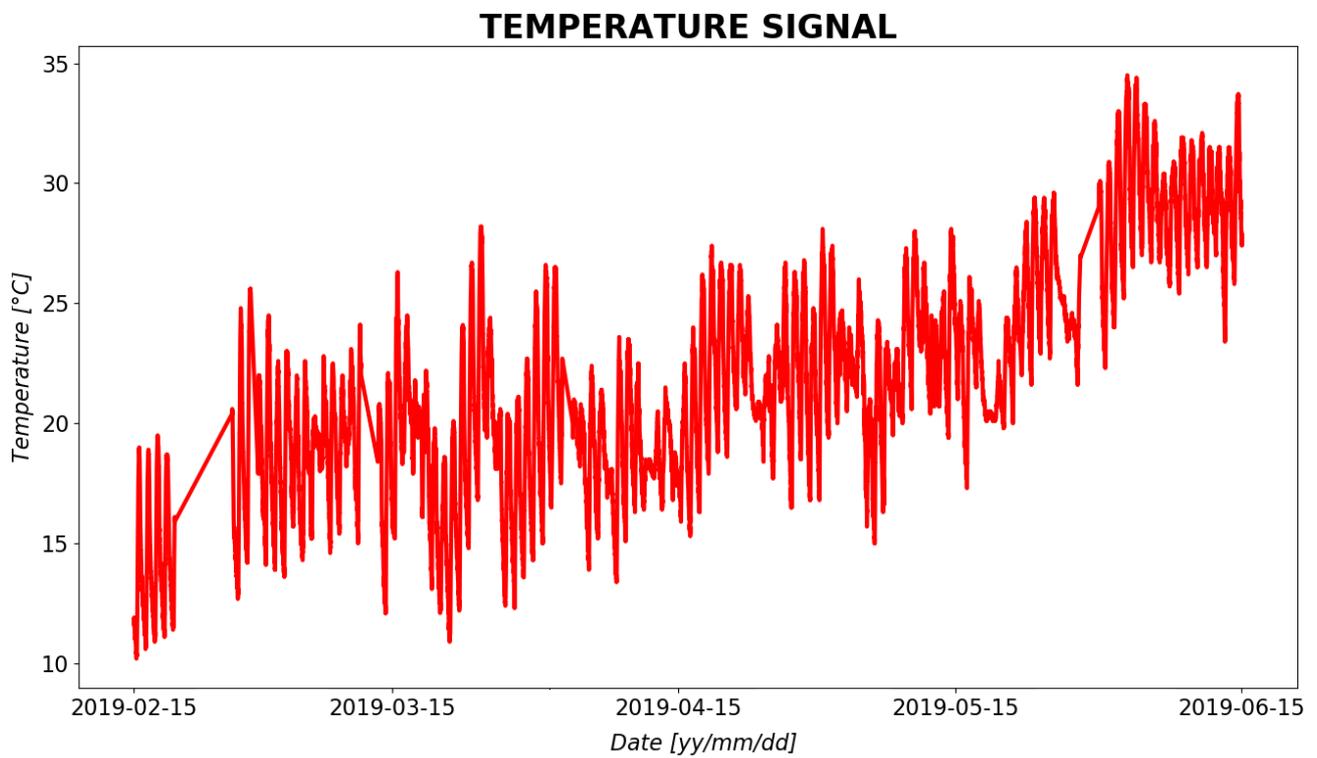


Figura 1.10 Segnale di temperatura relativo allo strumento C1.3.3

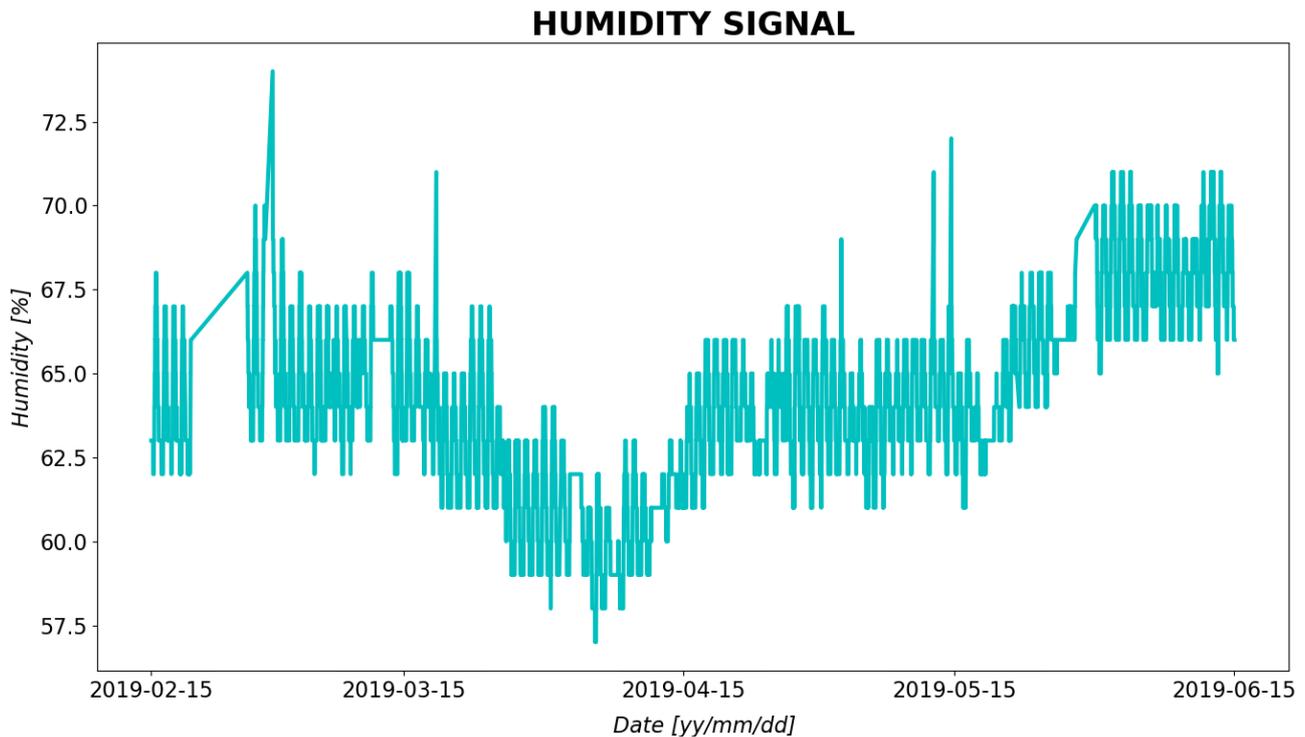


Figura 1.11 Segnale di umidità relativo allo strumento C1.3.3

1.3.2 Sensibilità degli strumenti e soglia di rumore

I valori presenti nel file vengono restituiti con precisioni molto diverse poiché i diversi sensori hanno delle sensibilità che differiscono di diversi ordini di grandezza. In particolare, i sensori meno precisi sono l'igrometro, che restituisce i valori di umidità interi, e il termometro che è invece in grado di rilevare variazioni decimali di temperatura. Questa differenza di precisione è visibile in Figura 1.11 poiché il segnale di umidità, essendo costituito da misurazioni che non hanno cifre decimali, tende a mantenersi costante per un certo numero di acquisizioni e dunque ha una forma più squadrata.

Le rotazioni sono invece restituite con un gran numero di cifre significative poiché sono già frutto di calcoli effettuati all'interno del sensore; tuttavia, è necessario capire quante cifre costituiscono vera informazione e quante sono invece inutili poiché i segnali risultanti contengono una certa quota indesiderata che si sovrappone al segnale utile. Il rumore degli accelerometri è Gaussiano e non correlato ed è calcolabile applicando la formulazione riportata in Equazione 1.3.

$$N = \rho_N \cdot \sqrt{1.6 \cdot BW} \quad (1.3)$$

Dove ρ_N è la densità di rumore e BW è la larghezza di banda dell'accelerometro. Per il caso studio, non si ha a disposizione la scheda tecnica dello strumento e non è dunque possibile conoscere la banda utile e la densità di rumore degli accelerometri installati.

1.4 Algoritmo in Python

I dati relativi alla campagna di monitoraggio vengono analizzati in maniera automatica da un algoritmo in grado di operare sui sensori di tipo inclinometrico. In particolare, attualmente, il codice implementato effettua correttamente l'analisi per gli strumenti presenti sul ponte in studio e per una seconda classe di inclinometri di tipo monoassiale e dotata unicamente di termometro ma, se necessario, è possibile implementare l'analisi anche per altre tipologie similari di strumenti.

1.4.1 Obiettivi dell'analisi

Preliminarmente il codice acquisisce i dati di output dei sensori inclinometrici nonché la tipologia dei sensori stessi in quanto l'analisi esegue istruzioni diverse a seconda del tipo di strumentazione.

Dopo aver acquisito tutti i dati, può avere inizio l'analisi dei segnali campionati, la quale si articola in 2 macro-fasi. In un primo momento, si ripuliscono i segnali da tutte le anomalie dovute all'errata acquisizione degli strumenti: in particolare, si eliminano le misurazioni che si mantengono costanti nel tempo (plateau), e si correggono tutti i valori che escono al di fuori dalle oscillazioni di segnale considerate attendibili per una (picchi) o più acquisizioni (errori di traslazione). Gli algoritmi di pulizia dedicati a questa prima fase di analisi sono dettagliatamente sviscerati nel capitolo 2.

Al termine della correzione degli errori, si passa alla seconda fase che si divide a sua volta in due sotto-fasi: nella prima, si esegue un'analisi statistica dei dati al fine di rimuovere dai segnali l'influenza delle condizioni atmosferiche (temperatura e umidità) mentre nella seconda si esegue la cross-correlazione dei segnali di output dei diversi strumenti per rilevare eventuali andamenti anomali; gli algoritmi di correlazione dedicati alla seconda fase dell'analisi vengono descritti nel capitolo 3.

Al termine di ogni singola fase, il codice provvede a salvare i risultati ottenuti (in forma grafica e numerica) e i segnali (qualora essi siano stati modificati in alcune loro parti) in apposite directory. Come spiegato dettagliatamente nel capitolo 2, queste procedure di salvataggio sono di fondamentale importanza in particolar modo nella fase di pulizia dei segnali poiché permettono di restituire un feedback immediato all'utente guidandolo nelle scelte arbitrarie dei parametri di input.

1.4.2 Moduli standard e aggiuntivi

Il codice è stato scritto con il linguaggio di programmazione Python attraverso l'ambiente di sviluppo *IDLE* (Integrated Development and Learning Environment) e si avvale di diverse librerie di funzioni (chiamate moduli). Questi moduli possono essere già presenti all'interno del pacchetto iniziale dopo l'installazione di Python, possono essere già esistenti ma necessitare di essere installati da sorgenti esterne oppure possono essere direttamente implementati ex novo secondo le esigenze specifiche. Tutti i moduli appartenenti al primo caso sono moduli che fanno parte della cosiddetta 'libreria standard' e che consentono al programmatore di eseguire tutte le operazioni basilari come ad esempio la manipolazione delle stringhe (con il modulo *string.py*), la gestione dei tempi e delle date (con il modulo *datetime.py*), l'esecuzione di alcune funzioni matematiche fondamentali (con il modulo *math.py*) e l'interazione con il sistema operativo (con il modulo *os.py*). Oltre alla libreria standard, esistono molti altri moduli, sviluppati da terzi e messi a disposizione gratuitamente in rete.

La quasi totalità di questi moduli è disponibile sul Python Package Index (*PyPI*), il quale è una sorta di ‘deposito’ mondiale nel quale vengono salvati tutti i pacchetti che vengono via via aggiornati. Per poter usufruire di questi pacchetti, si utilizza un programma chiamato *pip* che viene automaticamente installato insieme alla distribuzione base di Python. Quando si desidera installare una libreria esterna, sarà sufficiente accedere alla directory che lo contiene e digitare il comando ‘*pip install nome_libreria.py*’ attraverso l’interfaccia a linea di comando; in questo modo la libreria verrà automaticamente installata sul proprio pacchetto e potrà, da quel momento, essere richiamata.

Tra queste librerie predefinite, in particolare, l’algoritmo implementato per l’analisi del viadotto si avvale delle seguenti: *numpy.py* (creazione, manipolazione e salvataggio di grandi array multidimensionali), *pandas.py* (manipolazione e analisi di serie di dati), *matplotlib.py* (creazione e al salvataggio di grafici) e *openpyxl.py* (creazione, manipolazione e salvataggio di fogli Excel).

Infine, il programmatore ha la possibilità di creare dei moduli personalizzati definendo le funzioni al suo interno. La definizione di queste funzioni deve rispettare dei criteri ben definiti. In particolare, la prima riga deve iniziare con il comando ‘*def*’ seguito dal nome con cui verrà richiamata la funzione e dai parametri di input (posti tra parentesi e separati da virgole) e deve chiudersi con un simbolo ‘:’.

Dopo aver dichiarato le variabili che la funzione deve ricevere in input per poter funzionare, segue una parte di codice indentato che contiene le istruzioni che vengono eseguite quando si richiama la funzione; esse possono eventualmente comprendere la definizione di nuove variabili temporanee.

Infine, sullo stesso livello di indentazione della prima riga, nella riga finale, vengono dichiarati i parametri (fuori parentesi e separati da virgole) restituiti in output preceduti dal comando ‘*return*’.

A prescindere dalla tipologia di libreria, prima di poter utilizzare le funzioni al suo interno, essa deve essere preliminarmente importata utilizzando il comando ‘*import nome_libreria*’, oppure, per comodità, il comando ‘*import nome_libreria as nl*’ dove *nl* è un’abbreviazione scelta dal programmatore per riferirsi alla libreria scelta. Una volta fatto ciò, è dunque possibile richiamare la generica funzione dichiarandone il nome preceduto dall’abbreviazione della libreria che la contiene e da un punto e seguito dai parametri di input tra parentesi. Qualora invece si sia interessati ad una sola funzione presente in una libreria, è possibile richiamarla senza importare la libreria intera attraverso il comando ‘*from nome_libreria import nome_funzione*’. A titolo di esempio, in Figura 1.12, vengono riportati la creazione e l’utilizzo della generica funzione *media_e_somma*, la quale viene definita all’interno di un modulo personalizzato chiamato *calcolo.py*.

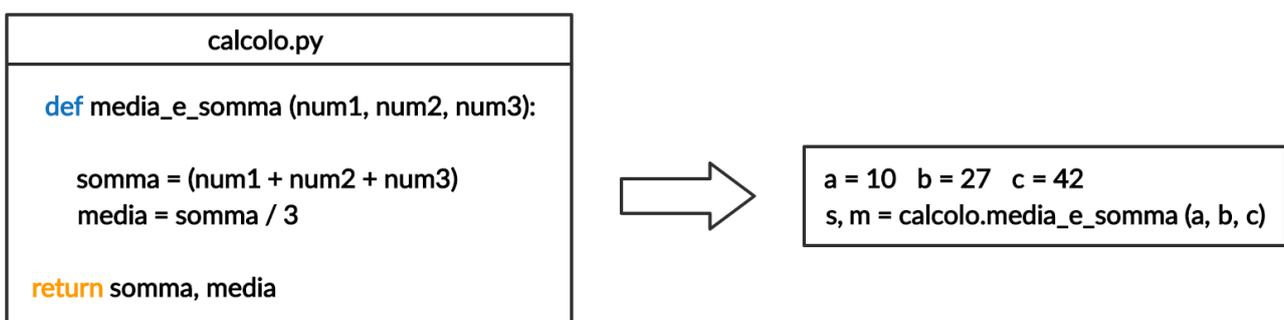


Figura 1.12 Definizione e utilizzo di una funzione personalizzata in Python

1.4.3 Struttura del codice

Data la complessità del codice e data la forte ricorsività delle operazioni effettuate, si è ritenuto opportuno utilizzare un approccio di ‘programmazione a blocchi’ grazie al quale il codice viene suddiviso in un modulo principale e in un numero variabile di moduli secondari nei quali vengono definite le funzioni che effettuano tutte quelle operazioni che vengono ripetute molte volte nell’analisi dei segnali e per le quali non avrebbe senso riscrivere ogni volta tutte le istruzioni.

Questo approccio consente di praticare una programmazione molto strutturata che conferisce snellezza e leggibilità al codice a fronte della ripetitività delle operazioni. Queste peculiarità permettono di lavorare con un codice gestibile in caso di modifiche o implementazioni future. Riassumendo, per effettuare l’analisi dei segnali di output degli inclinometri, il codice richiamerà alcune funzioni già esistenti contenute all’interno di librerie predefinite e altre che vengono invece definite all’interno di moduli secondari appositamente creati per il caso in studio.

Nello specifico, il codice implementato è composto da un modulo principale chiamato *main.py* che contiene il flusso principale delle operazioni e che, quando necessario, richiama le funzioni personalizzate che sono al momento divise, a seconda delle operazioni svolte, in 7 moduli secondari. Questi moduli, che sono a tutti gli effetti script Python, vengono descritti sommariamente di seguito.

- ***Plateau.py***: questo modulo secondario contiene le funzioni deputate al riconoscimento e alla rimozione di tutte quelle porzioni di segnale che presentano delle misurazioni costanti per un tempo eccessivo (vedi paragrafo 2.1); in particolare, esso contiene le funzioni *trova_lim*, *pulisci_tipoA* e *pulisci_tipoB* e fa parte della prima fase dell’analisi.
- ***Errori_di_traslazione.py***: questo modulo secondario contiene la funzione *rimuovi_traslazioni* deputata al riconoscimento e alla correzione di tutte quelle porzioni di segnale che presentano una traslazione rigida rispetto all’andamento medio (vedi paragrafo 2.2). Esso fa parte della prima fase dell’analisi.
- ***Picchi.py***: questo modulo secondario contiene la funzione *rimuovi_picchi* deputata al riconoscimento e alla correzione di tutte quelle misurazioni che, singolarmente, si distaccano in maniera eccessiva dall’andamento medio del segnale (vedi paragrafo 2.3). Esso fa parte della prima fase dell’analisi.
- ***Excel.py***: questo modulo secondario contiene le funzioni deputate all’apertura dei file Excel che conterranno i risultati e che verranno restituiti in output dall’algoritmo; in particolare, esso contiene le funzioni *crea_layout* e *crea* e fa parte della seconda fase dell’analisi.
- ***Statistica***: questo modulo contiene le funzioni deputate alle analisi statistiche effettuate nel processo di svincolamento dalle condizioni termo-igrometriche; in particolare, esso contiene le funzioni *calcoli_rotazioni*, *calcoli_temp_umidA*, *calcoli_temp_umidB*, *correlazione*, *deriva_istantanea* e *deriva_differita* e fa parte della seconda fase del calcolo.

- **Grafici:** questo modulo contiene le funzioni deputate alla creazione e al salvataggio di tutti i grafici di output generati dal codice alla fine di ogni operazione eseguita; in particolare, esso contiene le funzioni *plot_raw_vs_puliti*, *plot_no_derive*, *fourier* e *ritardi_plot* e costituisce la fase di salvataggio dei risultati in forma grafica.
- **Cross_correlazione:** questo modulo contiene la funzione deputata alla ricerca delle correlazioni tra i segnali misurati dai vari strumenti (*cross_correlazione*).

In Figura 1.13, si riporta uno schema riassuntivo che descrive la struttura a blocchi del codice implementato specificando ulteriormente le funzioni create per l'analisi e il salvataggio dei dati.

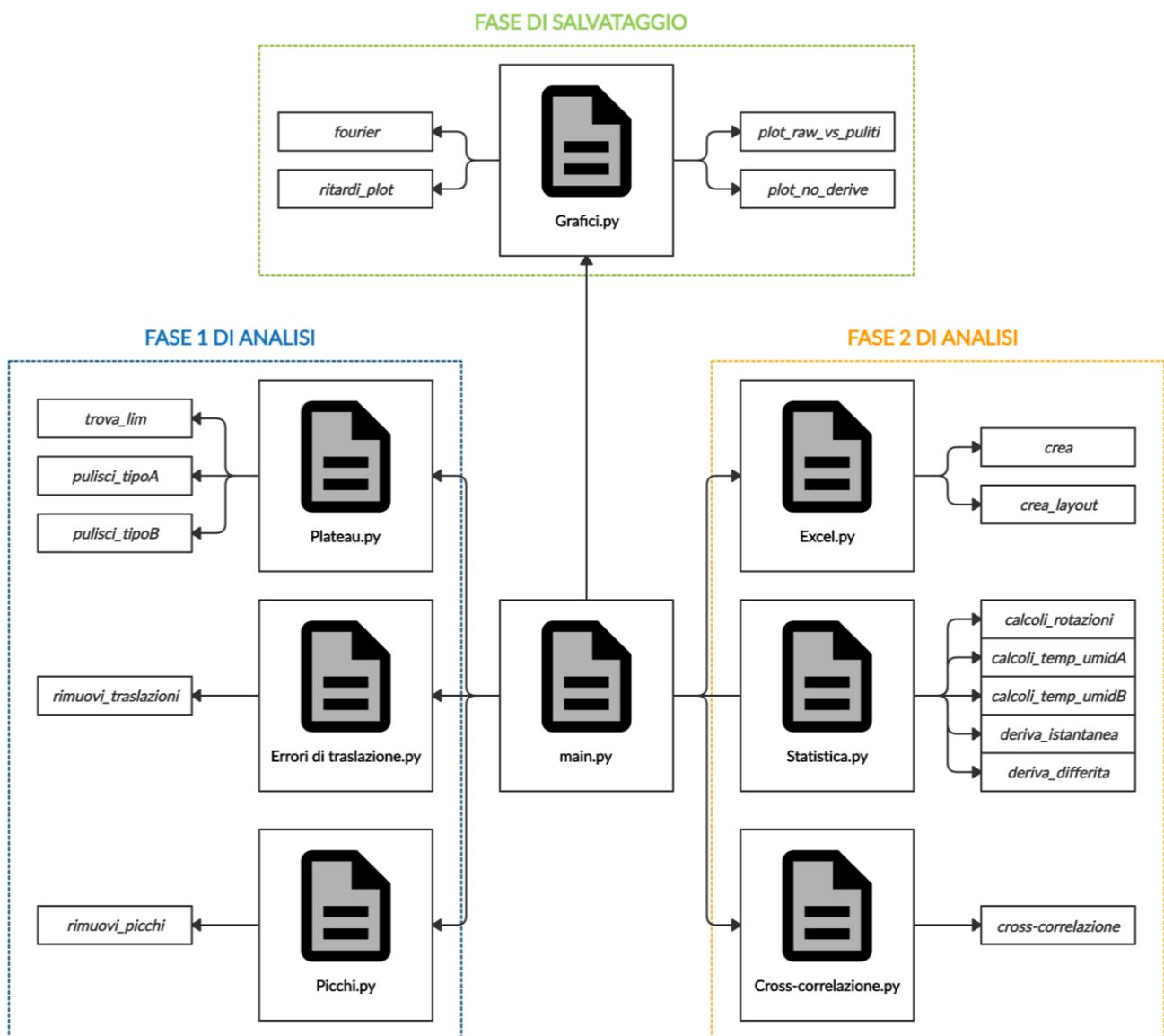


Figura 1.13 Struttura del codice di calcolo

1.4.4 File per i parametri di input

Oltre agli 8 script di cui è composto il codice, i quali devono essere posti nella stessa directory, il codice necessita della presenza di alcuni ulteriori file per poter funzionare correttamente. Infatti, tutte le operazioni eseguite dagli algoritmi presenti nel codice necessitano di alcuni parametri di ingresso scelti dall'utente e dipendenti dalla tipologia di ponte su cui viene eseguito il monitoraggio e dalle caratteristiche degli strumenti installati. Per permettere all'utente di interfacciarsi con il codice, sono stati creati due file di testo nella medesima directory in cui sono presenti i moduli.

Il primo file si chiama *file di input utente.txt* e contiene tutte quelle informazioni che è necessario che l'utente inserisca preliminarmente e senza le quali l'algoritmo non può essere eseguito (informazioni sugli strumenti installati e sulla posizione dei relativi file all'interno del computer, parametri per la creazione dei grafici e parametri di calcolo). All'interno del file, le informazioni sono organizzate in 11 gruppi che il codice acquisisce in momenti diversi dell'esecuzione e che sono precedute da alcune linee di istruzioni che descrivono i parametri che è necessario riportare e le modalità di inserimento. Infatti, per un corretto funzionamento del codice, è necessario inserire i parametri seguendo esattamente le istruzioni sia in termini di unità di misura che in termini di simboli e spazi da usare.

Il secondo file si chiama *dati_iniziali_A.csv* e contiene i dati a ponte scarico ovvero le acquisizioni delle grandezze misurate (Rotazioni X e Y, umidità e temperatura) in assenza di carichi di traffico sul ponte. Il primo file di testo verrà mostrato volta per volta quando verrà richiamato. Ovviamente, esisterà un file *dati_iniziali_B.csv* che conterrà i medesimi dati relativi all'altra tipologia di strumento.

1.4.5 Cartella di salvataggio

Come sarà mostrato nel Paragrafo 2.4, la maggior parte dei risultati sono salvati direttamente all'interno delle directory che contengono i file relativi agli strumenti. Invece, il salvataggio dei risultati che sono comuni a tutti gli strumenti e che, per comodità, vengono raggruppati in unico file Excel (come nel caso dei risultati della seconda fase dell'analisi) o in un unico grafico (come nel caso del grafico ritardo-correlazione), è effettuato in una cartella che viene creata all'inizio dell'esecuzione.

Il nome di tale cartella di salvataggio può essere scelto liberamente dall'utente il quale deve poi fornirne il relativo percorso all'interno del secondo gruppo di parametri presenti all'interno di *File di input utente.txt* come mostrato in Figura 1.14. In questo caso, si è scelto di chiamarla *RISULTATI* e di posizionarla, per comodità, nella stessa cartella in cui sono presenti i moduli del codice e i file di input. I dati salvati all'interno di questa cartella verranno dettagliatamente descritti nel capitolo 3.

```
(2) PERCORSO CARTELLA DI OUTPUT (2)

Inserire il percorso della cartella di output in cui saranno salvati i file Excel (che contengono i
risultati comuni a tutti i sensori) separato con una virgola dalla parola "risultati" e chiudere
la riga con un'ulteriore virgola come nell'esempio.

Esempio: risultati,percorso,
risultati,C:\Users\User\Desktop\Unione codici\RISULTATI,
```

Figura 1.14 Secondo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

1.5 Processo di acquisizione dei dati

Dopo aver creato tutti i file e le directory come descritto nel paragrafo precedente, il codice è pronto per essere eseguito e, in questo paragrafo, sono descritti nel dettaglio i processi di lettura dei file, di acquisizione dei dati misurati e di salvataggio nelle apposite variabili. Inoltre, si procederà alla creazione delle cartelle di salvataggio a partire dai percorsi acquisiti dal file di input.

1.5.1 Posizione e proprietà dei sensori da analizzare

L'algoritmo è in grado di acquisire automaticamente i file di dati di tutti gli strumenti qualunque sia la loro posizione all'interno del computer se l'utente fornisce un percorso valido. A questo scopo, viene richiesto all'utente di inserire le informazioni sullo strumento da analizzare nel primo gruppo di parametri all'interno di *File di input utente.txt*: il tipo, il nome, il percorso all'interno del computer e la scelta di eseguire il grafico di una particolare tipologia di curva che verrà descritta nel capitolo 3. Dunque, il primo passo dell'algoritmo è proprio l'apertura di *File di input utente.txt* per leggerlo e acquisire i dati inseriti dall'utente seguendo le istruzioni riportate. In Figura 1.15, si riporta un'immagine del primo gruppo di parametri del file di input.

```

(1) PERCORSO FILE DA ACQUISIRE (1)

Inserire il nome del sensore da analizzare e il relativo percorso separati da una virgola, preceduti
dalla scritta 'sensoreA' o 'sensoreB' (a seconda della tipologia di sensore) e seguiti dal simbolo '\';
infine chiudere la linea con una virgola e con un 'sì' o un 'no' a seconda che si voglia o no disegnare
la curva la relativa al sensore all'interno del grafico che riporterà i coefficienti di correlazione in
funzione del ritardo. Qualora, durante una particolare esecuzione, non si volesse acquisire un dato
sensore, è sufficiente porre a inizio riga un qualsiasi carattere. Di seguito, un esempio.

Esempio: tipo sensore, nome sensore, percorso file\, sì/no

sensoreA,C1.1.1,C:\Users\User\Desktop\Unione codici\DATI DEI SENSORI\Sensore C1.1.1\,sì
sensoreA,C1.1.2,C:\Users\User\Desktop\Unione codici\DATI DEI SENSORI\Sensore C1.1.2\,sì
#sensoreA,C1.1.3,C:\Users\User\Desktop\Unione codici\DATI DEI SENSORI\Sensore C1.1.3\,sì
sensoreA,C1.1.4,C:\Users\User\Desktop\Unione codici\DATI DEI SENSORI\Sensore C1.1.4\,no

```

Figura 1.15 Primo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

Tutte le righe di *File di input utente.txt* che contengono i parametri da acquisire iniziano con una parola chiave che permetta al codice di riconoscere immediatamente la sezione del file che sta acquisendo. In particolare, per il primo gruppo di parametri, le informazioni sugli strumenti sono divise in righe che devono iniziare con la parola 'sensoreA' o 'sensoreB' e rispettare un ben preciso layout per poter garantire una corretta acquisizione.

In questo caso, oltre a caratterizzare la riga che sta leggendo, l'acquisizione della prima stringa fornisce anche informazioni sulla natura dello strumento analizzato. Infatti, il codice è in grado di elaborare e manipolare i dati da molte tipologie di strumenti se i rispettivi output sono organizzati in un file csv come descritto nel paragrafo 1.3.1. Tuttavia, dovendo elaborare grandezze diverse, il codice dovrà eseguire alcune istruzioni che saranno diversificate a seconda del tipo di sensore.

Al momento il codice riesce a gestire l'analisi dell'output degli strumenti installati sul ponte in studio (tipo A) e di un secondo tipo di sensore che misura un'unica rotazione e la temperatura (tipo B).

Dunque, nota la tipologia di strumento, il codice è in grado di scegliere le operazioni mirate per il tipo di output e necessita del nome e del percorso del file di input per poter iniziare l'acquisizione dei dati e per avere un riferimento in cui eseguire il salvataggio dei risultati che potranno così essere visualizzati e estratti comodamente dall'utente direttamente nella cartella relativa allo strumento. Infine, al termine della riga, è presente la dicitura 'si/no' così che l'utente possa scegliere se desidera tracciare la curva relativa allo strumento specifico nel grafico ritardo-coefficiente di correlazione. Si noti che è necessario che la riga termini con un simbolo di virgola in modo tale che il codice non inserisca degli spazi bianchi o dei ritorni a capo all'interno della stringa ma riconosca che il parametro finale è effettivamente terminato (poiché la separazione dei dati nella riga è effettuata dalle virgole). Qualora in una particolare esecuzione dell'algoritmo non si voglia includere un particolare sensore, sarà sufficiente porre un qualsiasi carattere all'inizio della riga corrispondente per impedire l'acquisizione. Come descritto nel paragrafo 2.4 questa possibilità di eseguire la pulizia solo per un numero ristretto di strumenti (e addirittura di segnali) sarà determinante nella buona riuscita e nell'ottimizzazione degli algoritmi di pulizia del segnale.

L'algoritmo di acquisizione inizia con l'apertura del file e con il conteggio del numero di righe. Successivamente, si entra in un ciclo avente un numero di iterazioni pari alle righe contate: ad ogni iterazione, si analizza l'n-esima riga del file, la si divide in stringhe singole utilizzando le virgole come separatori e si controlla se la riga contiene informazioni utili in base alla parola chiave a inizio riga. Nel caso specifico, se la prima stringa della riga riporta la dicitura 'SensoreA' o 'SensoreB' si procede a salvare tale parametro e i successivi all'interno dei vettori creati precedentemente mentre, in caso contrario, si passa alla linea successiva. Infine, per ogni strumento analizzato, si combinano il percorso del file e il nome del sensore per creare la directory *nome_file_immagini di output* nella quale verranno salvati tutti i grafici di output che derivano dall'analisi effettuata.

In Figura 1.16, si riporta un diagramma di flusso per spiegare nel dettaglio il funzionamento dell'algoritmo che acquisisce il primo gruppo di dati di *File di input utente.txt*; con la stessa metodologia, vengono acquisiti i parametri anche nel caso delle altre sezioni del file.

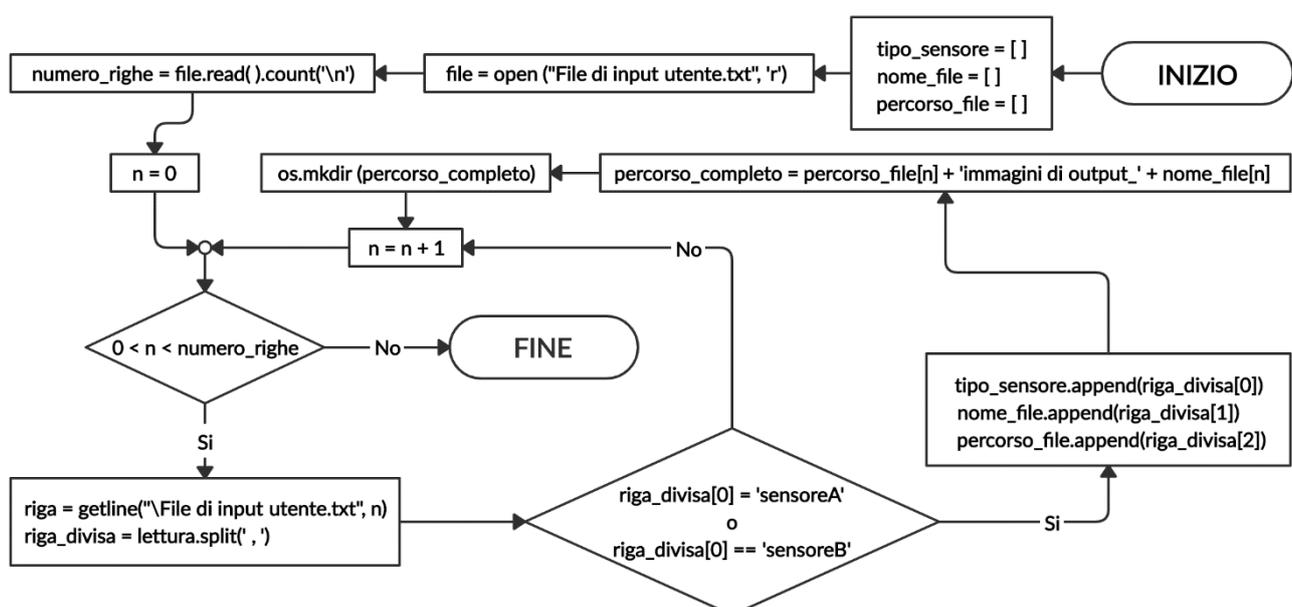


Figura 1.16 Algoritmo di gestione dei percorsi dei file degli strumenti

1.5.2 Lettura dei file e acquisizione dei dati

Dopo aver letto da *File di input utente.txt* i percorsi relativi ai file che contengono i segnali che devono essere acquisiti e analizzati, il codice può partire con l'effettiva acquisizione dei dati misurati.

Il processo è notevolmente facilitato dal formato csv (Comma-Separated Values) in quanto, già in partenza, il file è considerato come una tabella di dati separati da virgole da cui è immediato estrarre e salvare le colonne all'interno di vettori. In Figura 1.17, si riporta un diagramma di flusso per spiegare nel dettaglio il funzionamento dell'algoritmo che acquisisce i dati da un generico file csv.

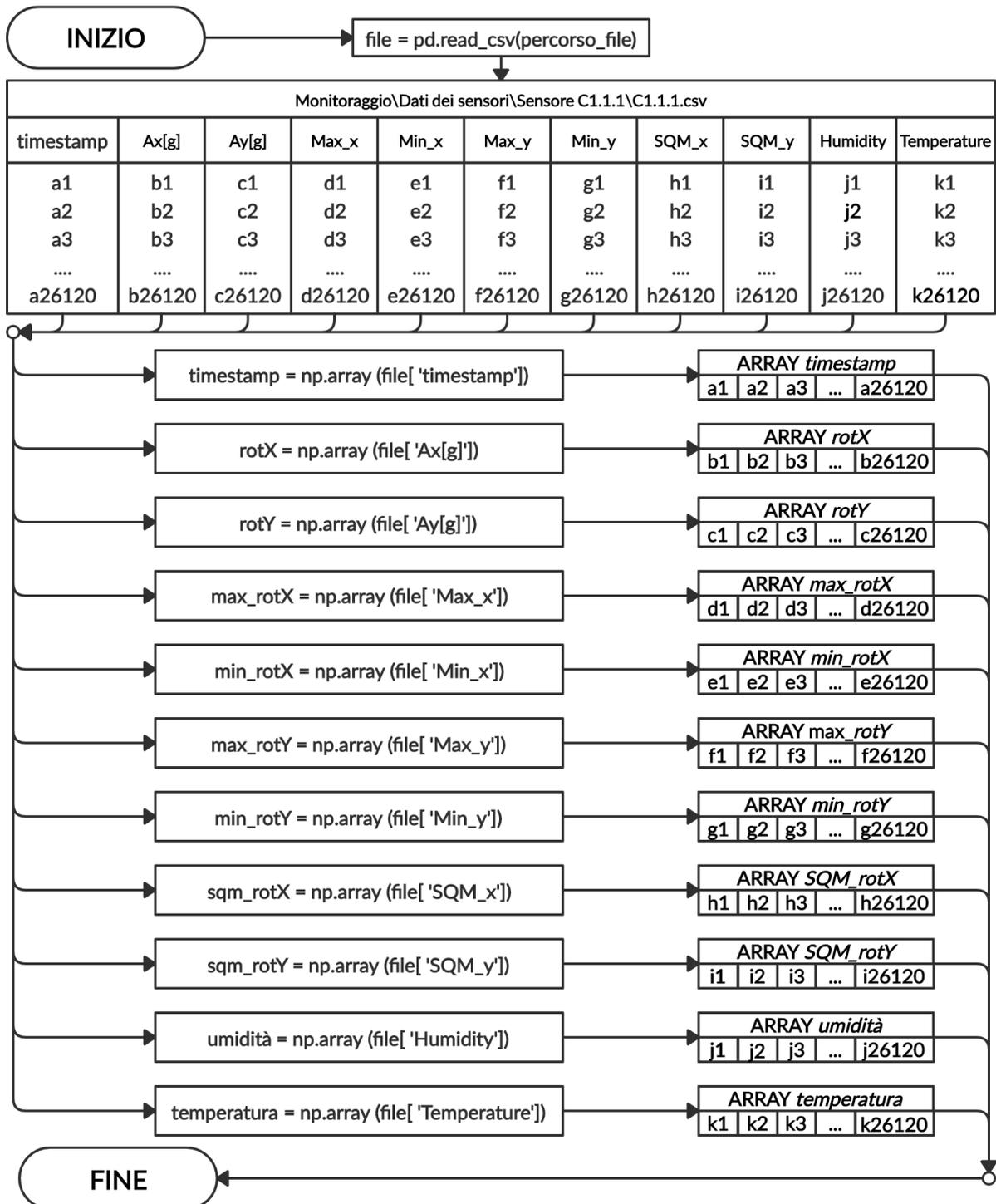


Figura 1.17 Algoritmo di acquisizione dei segnali indicati dall'utente

L'implementazione di questo algoritmo di acquisizione risulta conveniente per la facilità e la velocità con cui è possibile aggiungere nel codice la lettura di un nuovo tipo di file csv. Infatti, qualora in futuro si desiderasse generalizzare l'analisi ad altre tipologie di sensore sarebbe sufficiente aggiungere una porzione di algoritmo che riconosca le colonne in funzione dei titoli che sono presenti nella prima riga ricordando di rispettarne perfettamente la struttura (in termini di caratteri maiuscoli o minuscoli e spazi) poiché il riconoscimento delle diverse colonne è fondato sulle stringhe presenti a inizio file. Dunque, l'algoritmo riconosce e acquisisce tutte le colonne che contengono i segnali misurati e le salva in array monodimensionali aventi lunghezza pari al numero di righe del file analizzato: nel caso in studio, al termine dell'acquisizione si ottengono 11 vettori che contengono circa 26100 dati. L'ultimo passaggio consiste nella trasformazione di tutti i segnali di accelerazione in segnali di rotazione secondo la formulazione riportata nell'Equazione 1.1 e nella conversione di tutte le linee temporali in un formato che consenta una maggiore leggibilità per l'utente. Al termine dell'acquisizione, l'output dello strumento presenta il riferimento temporale in formato Unix Timestamp ovvero come il numero di millisecondi intercorsi tra un 'istante zero' (fissato alla mezzanotte di giovedì 01/01/1970) e l'istante di acquisizione della misura da parte dello strumento. Per effettuare la trasformazione, si utilizza il modulo *datetime.py* già previsto all'interno della libreria standard di Python, il quale possiede alcune funzioni per trasformare automaticamente una misura di tempo in tutti i formati esistenti tra cui appunto il Timestamp. In particolare, si applica la funzione *fromtimestamp* a tutti i valori nel vettore dei tempi salvando il risultato all'interno del vettore *data*. Il vettore dei riferimenti temporali in formato Unix Timestamp viene diviso per 1000 (per portarlo in secondi) e viene comunque conservato poiché sarà di fondamentale importanza nelle operazioni future (in fase di calcolo, è comodo avere esplicitamente i secondi intercorsi tra le diverse misure). Fatto ciò, tutti i dati di output degli strumenti sono stati acquisiti e memorizzati ed è dunque possibile iniziare l'analisi vera e propria dei segnali a partire dagli algoritmi di pulizia dagli errori di acquisizione.

Capitolo 2

Pulizia dei dati

Nei dati di alcuni sensori, possono essere presenti, in maniera del tutto casuale, alcune tipologie di errori di varia natura che coinvolgono una o più grandezze misurate, i quali rendono necessario un pretrattamento dei dati grezzi. A tale scopo, il codice contiene alcuni algoritmi in grado di eseguire una pulizia dei segnali escludendo o correggendo gli elementi affetti da questi errori. Le anomalie corrette da questi algoritmi sono soltanto in parte effettivamente presenti all'interno dei segnali misurati sul ponte in studio. Tuttavia, nella pratica comune, alcune anomalie non rilevate sull'impalcato studiato possono essere riscontrate durante i monitoraggi e quindi il codice deve essere in grado di rilevarle e rimuoverle.

2.1 Rimozione delle porzioni costanti

Il primo errore presente all'interno dei dati grezzi è la presenza di porzioni di segnale costanti nel tempo per una o più grandezze; tale anomalia è dovuta a temporanei malfunzionamenti o spegnimenti di uno o più sensori presenti nello strumento. Durante questi intervalli di tempo, il sensore acquisisce delle misurazioni che si mantengono costanti come mostrato in Figura 2.1. Dal momento che non è possibile sapere l'andamento che il segnale avrebbe avuto in assenza dell'anomalia, è necessario scrivere un algoritmo che ripulisca il segnale eliminando tutti le acquisizioni che sono parte di queste porzioni denominate 'plateau'. All'interno di questa casistica ricade un altro tipo di errore che avviene quando il sensore restituisce valori che si distaccano dal trend medio mantenendosi però costanti come nel caso del terzo plateau evidenziato in Figura 2.1. Nella scrittura dell'algoritmo di pulizia, è necessario prendere in considerazione che, a livello teorico, non tutti i plateau presenti in un segnale sono da scartare poiché, per esempio, una misura di temperatura costante per 3-4 acquisizioni (ovvero per un intervallo temporale di 15-25 minuti nel caso dei sensori utilizzati per il ponte in studio) potrebbe essere plausibile. La rimozione automatica dei valori errati da parte dell'algoritmo deve dunque essere eseguita valutando gli andamenti delle curve e la sensibilità degli strumenti per evitare di eliminare elementi non affetti da errore.

In particolare, si nota che, per tutti i sensori relativi al ponte in studio, le rotazioni X e Y sono scarsamente influenzate da questa tipologia di errore mentre temperatura e umidità presentano tratti di plateau molto importanti che molto spesso sono coincidenti. Inoltre, analizzando i dati di output, si vede che il termometro ha una sensibilità superiore di un ordine di grandezza rispetto all'igrometro.

Da ciò segue che, nel caso dell'umidità, la quale non viene restituita con cifre decimali, la presenza di plateau più lunghi è più accettabile in confronto ai segnali di temperatura che hanno invece una precisione che arriva fino al primo valore decimale.

L'algoritmo deve dunque essere in grado di gestire questi problemi sugli andamenti delle curve in maniera automatica in quanto le misure possono essere affette da questa tipologia di errore in maniera più o meno marcata a seconda della grandezza misurata e a seconda dello strumento.

In ogni caso, una misura sbagliata in un certo istante di tempo inficia tutte le altre misurazioni avvenute nello stesso istante: quindi, se per esempio viene riscontrato un plateau all'interno del segnale di temperatura, l'algoritmo escluderà parallelamente anche tutte le misurazioni effettuate negli stessi istanti sulle rotazioni e sull'umidità, anche se probabilmente sono corrette. La ragione di questa scelta è dovuta al fatto che, al termine dell'esecuzione degli algoritmi di pulizia, tutti i segnali relativi al medesimo strumento devono avere la stessa lunghezza poiché si procederà a rimuovere l'effetto che la temperatura e l'umidità hanno sulla misura della rotazione.

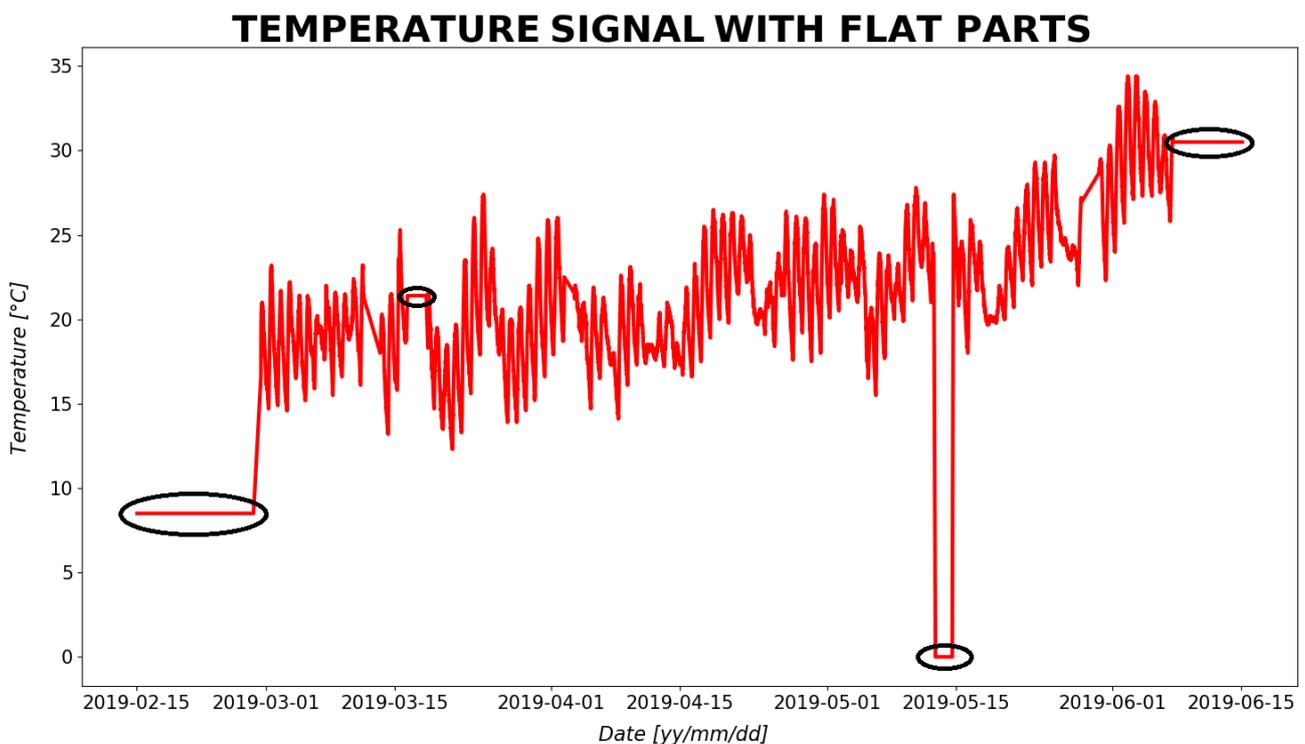


Figura 2.1 Plateau presenti nel segnale di temperatura del sensore C1.1.1

2.1.1 Calcolo della lunghezza limite

Come specificato nel paragrafo precedente, la soglia di accettabilità sulla lunghezza di un plateau è variabile da sensore a sensore e soprattutto da grandezza a grandezza; nella taratura di tale limite, è dunque necessario fornire all'algoritmo un metodo univoco per tutti i casi.

Per definire questa soglia in maniera automatica, l'algoritmo elabora una statistica sulla lunghezza dei plateau all'interno di ognuna delle grandezze calcolandone, nell'ipotesi di distribuzione Gaussiana, i valori di media e di scarto quadratico medio e combinandoli opportunamente.

La lunghezza limite dei plateau viene definita escludendo un percentile (a scelta dell'utente) che dipenderà dalla sensibilità dello strumento: per i sensori installati sul ponte in studio, data la buona precisione nel calcolo delle rotazioni e della temperatura e la scarsa precisione nel calcolo dell'umidità, si sceglie di scartare rispettivamente il percentile del 5% per le rotazioni e la temperatura e il percentile dell' 1% per l'umidità ipotizzando per quest'ultima una maggiore tolleranza. L'algoritmo calcola dunque la lunghezza limite come mostrato nell'Equazione 2.1.

$$L_{LIM} = \mu_L + \alpha \cdot \sigma_L \quad (2.1)$$

Dove μ_L e σ_L sono rispettivamente media e scarto quadratico medio delle distribuzioni di lunghezza dei plateau e α è il coefficiente per la definizione del percentile scelto dall'utente. Come specificato in precedenza, nel caso in studio, si è assunto il valore di $\alpha = 1.96$ nel caso delle rotazioni e della temperatura e un valore di $\alpha = 2.58$ nel caso dell'umidità.

Come spiegato nel capitolo 1, l'acquisizione del parametro α viene effettuata attraverso *file di input utente.txt* in cui sarà presente una sezione nella quale l'utente deve inserire quanto richiesto. In Figura 2.2, è riportata la sezione del file nella quale sono riportati i percentili che il codice deve acquisire nonché le istruzioni di inserimento e alcuni percentili notevoli che l'utente può utilizzare.

```
(4) PERCENTILI PER I PLATEAU (4)

Date le etichette scritte sotto e relative ai parametri da inserire, modificare lasciando un unico spazio dopo il
simbolo ':' e inserire il valore desiderato; si ricorda che si sta facendo riferimento al parametro  $\alpha$  presente
nella seguente formulazione:

       $\mu = \sigma + \alpha \cdot \text{sqm}$ 

Di seguito sono riportati alcuni percentili noti ma è possibile inserire il valore che si desidera:

68,3 % = P{  $\mu - 1,00 \sigma < X < \mu + 1,00 \sigma$  }
95,0 % = P{  $\mu - 1,96 \sigma < X < \mu + 1,96 \sigma$  }
95,5 % = P{  $\mu - 2,00 \sigma < X < \mu + 2,00 \sigma$  }
99,0 % = P{  $\mu - 2,58 \sigma < X < \mu + 2,58 \sigma$  }
99,7 % = P{  $\mu - 3,00 \sigma < X < \mu + 3,00 \sigma$  }

Percentile_rotX_plateau: 1.96
Percentile_rotY_plateau: 1.96
Percentile_temperatura_plateau: 1.96
Percentile_umidità_plateau: 2.58
```

Figura 2.2 Quarto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

Il calcolo delle lunghezze limite viene effettuato mediante una funzione che viene richiamata dal modulo principale *main.py* 4 volte (2 per le rotazioni, 1 per la temperatura e 1 per l'umidità) per ogni strumento. Tale funzione si chiama *trova_lim* ed è definita nel modulo esterno *Plateau.py*.

Per poter funzionare e fornire correttamente il risultato, la funzione necessita di ricevere in input alcuni parametri di calcolo, i quali vengono definiti con un ciclo di 4 iterazioni.

Prima di tutto tali parametri vengono salvati all'interno di un array avente dimensioni che dipendono dalla tipologia di parametro (ad esempio i 4 segnali saranno inseriti all'interno di una matrice avente 4 colonne e circa 26100 righe); successivamente ha inizio il ciclo nel quale, ad ogni iterazione m , l' m -esimo elemento di ogni array (scalare o vettore) viene selezionato e passato al modulo esterno *Plateau.py* per effettuare il calcolo della lunghezza limite.

I parametri che, ad ogni iterazione, vengono passati in input alla funzione, sono riportati di seguito.

- **grandezza**: è il vettore (avente lunghezza pari a circa 26100 valori) in cui si vanno a ricercare i plateau; esso contiene le misurazioni relative alla grandezza rispetto alla quale si esegue la pulizia all'*i*-esima iterazione.
- **percentile**: è il parametro α contenuto nell'equazione 2.1, acquisito da *File di input utente.txt* e relativo alla grandezza rispetto alla quale si esegue la pulizia all'*i*-esima iterazione.
- **N**: è la lunghezza del vettore *grandezza*, la quale è variabile da strumento a strumento e si manterrà invece costante nelle 4 iterazioni.

Avendo correttamente fornito i parametri relativi all'*i*-esima iterazione, la funzione ha inizio con la definizione del vettore vuoto *lunghezze_grandezza* (nel quale saranno salvate le lunghezze dei plateau riscontrati), della variabile *contatore* (che conterà il numero di elementi aventi valori costanti) e della variabile *valore_precedente* (che viene inizializzata con il valore iniziale fuori scala pari a 10^{14} e che, al termine di ogni generica iterazione *m*, assume il valore dell'*m*-esimo elemento del segnale). Successivamente, inizia un ciclo di riconoscimento avente *N* iterazioni in cui vengono contati i plateau come segue: ad ogni iterazione *m*, il codice acquisisce l'*m*-esimo valore del vettore *grandezza* e lo confronta con il valore precedente incrementando la variabile *contatore* nel caso in cui essi siano uguali oppure sovrascrivendo la variabile *valore_precedente* e azzerando la variabile *contatore* nel caso in cui essi siano diversi.

Ogni volta che l'*m*-esimo elemento del segnale sarà diverso dalla variabile *valore_precedente* e la variabile *contatore* sarà almeno pari a 2, ci si troverà al termine di un plateau avente lunghezza pari alla variabile *contatore* che verrà dunque aggiunta al vettore *lunghezze_grandezza* prima di essere reinizializzata al valore 1 per ricominciare il conteggio della lunghezza del plateau successivo. Eseguendo questa operazione per gli altri elementi contenuti all'interno del vettore *grandezza*, il vettore *lunghezze_grandezza* verrà progressivamente riempito e, al termine del ciclo, esso conterrà le lunghezze di tutti i plateau rilevati all'interno del segnale.

Una volta noto il numero di plateau riscontrati all'interno del segnale (pari alla lunghezza del vettore *lunghezze_grandezza*) e le rispettive lunghezze, l'algoritmo può proseguire calcolando media e scarto quadratico medio combinandoli come mostrato nell'equazione 2.1 per ottenere la lunghezza limite. Dopo aver eseguito il calcolo, il modulo esterno *Plateau.py* restituisce al blocco principale il limite per l'*i*-esima grandezza, il quale viene salvato all'interno del vettore *limiti* per poi essere facilmente richiamato nella fase di pulizia del segnale. A questo punto, si procede con la (*i*+1)-esima iterazione del ciclo aggiornando i parametri di input e passandoli nuovamente al modulo esterno *Plateau.py*.

Dopo aver eseguito le 4 iterazioni, il vettore *limiti* conterrà la lunghezza limite dei plateau per tutte le grandezze relative all'*n*-esimo strumento e si potrà procedere con la pulizia dei rispettivi segnali. In Figura 2.3, si riporta un diagramma di flusso per illustrare nel dettaglio le fasi dell'algoritmo che calcola le lunghezze limite di tutte le grandezze misurate dall'*n*-esimo strumento.

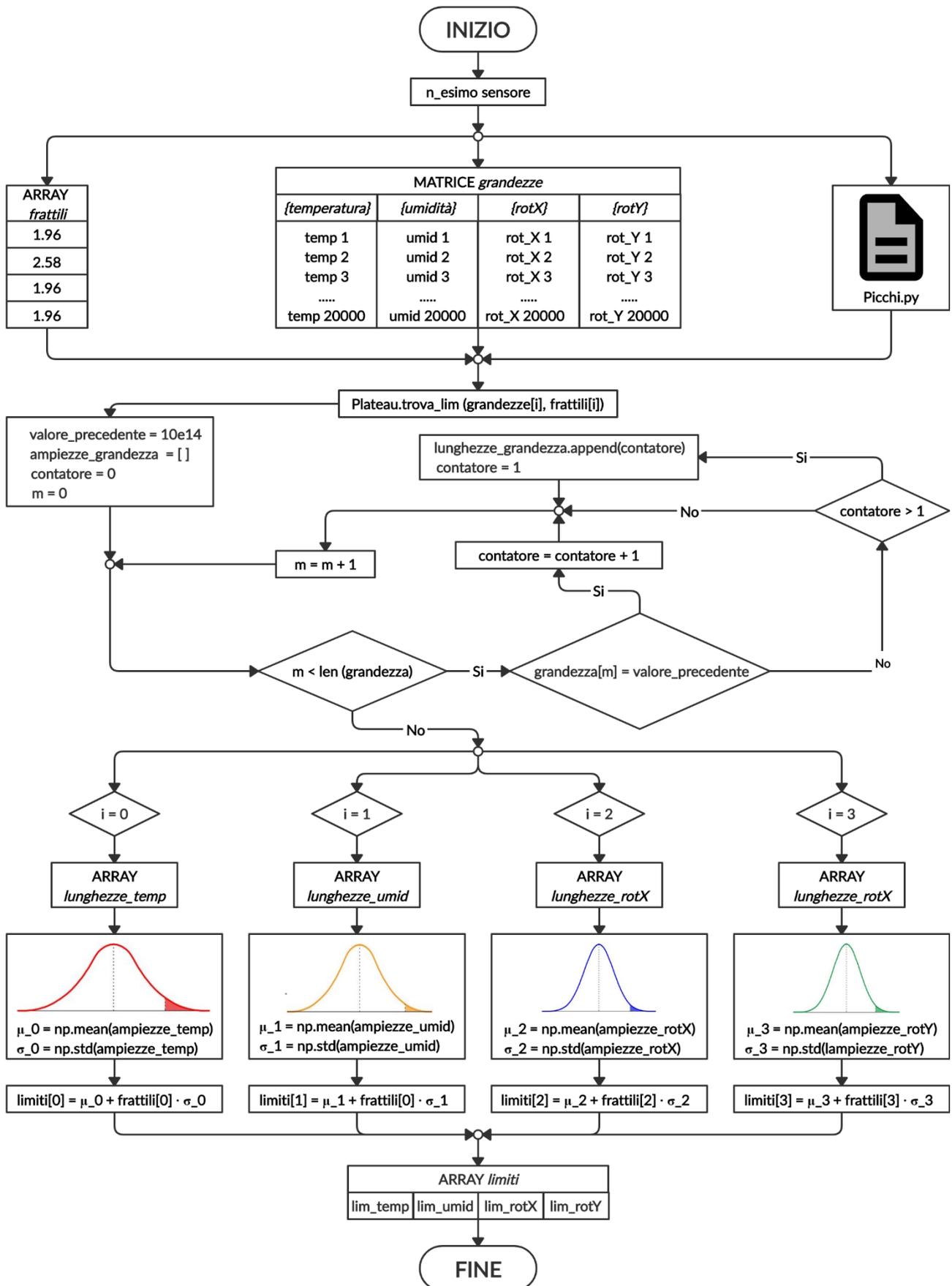


Figura 2.3 Algoritmo per il calcolo delle lunghezze limite dei plateau

A titolo di esempio, si riporta il calcolo della lunghezza limite relativa alle grandezze misurate dallo strumento C1.1.1: analizzando, come mostrato in Figura 2.3, l'output dei diversi sensori, si ottengono le distribuzioni statistiche mostrate in Figura 2.4.

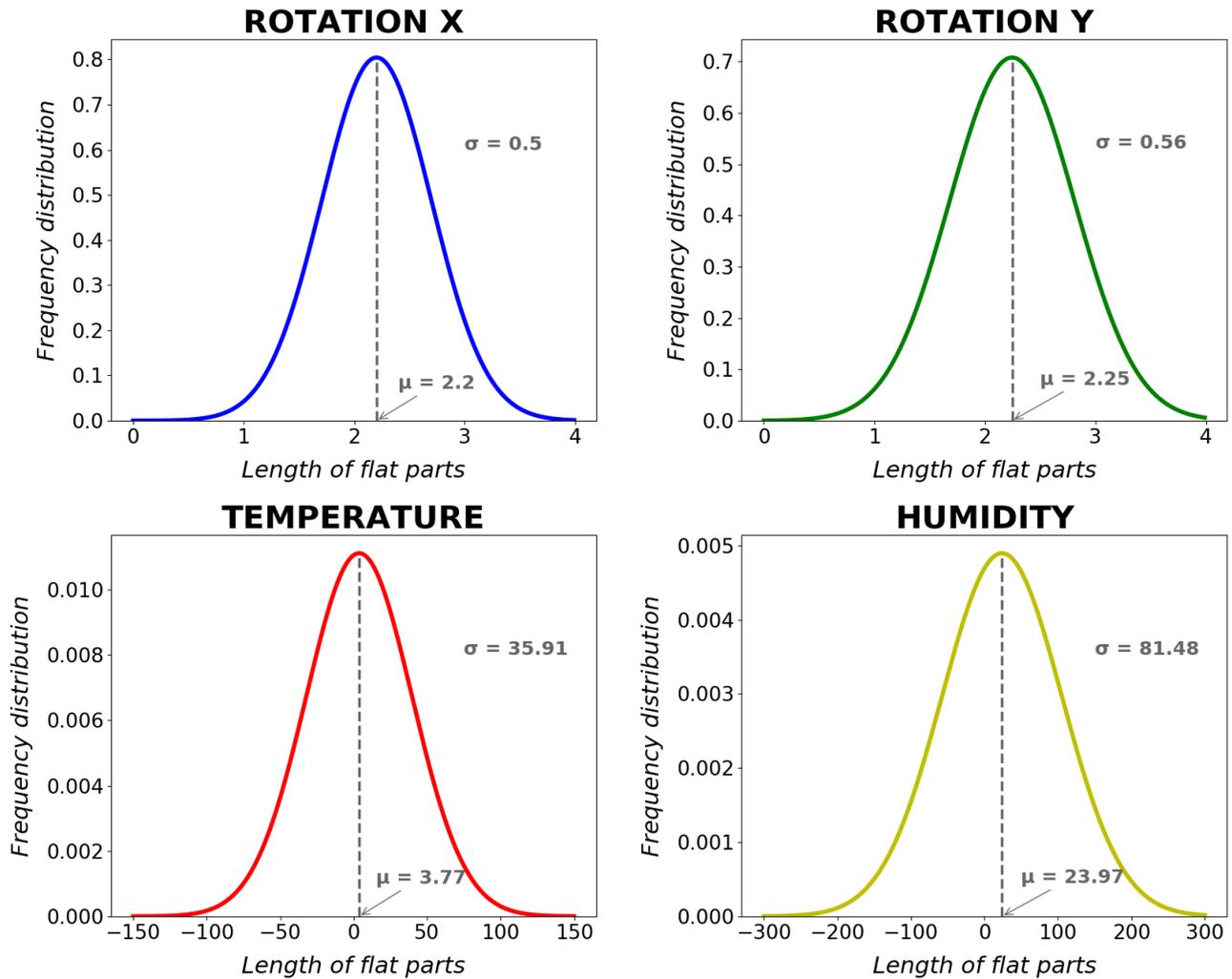


Figura 2.4 Distribuzioni statistiche della lunghezza dei plateau per le 4 grandezze del sensore C1.1.1

Osservando le densità di probabilità delle lunghezze dei plateau per ognuna delle grandezze misurate, viene effettivamente confermato quanto scritto in precedenza riguardo la precisione dei sensori presenti all'interno dello strumento e la ricorrenza dei plateau nei diversi segnali.

L'inclinometro risulta infatti molto preciso in quanto le rotazioni hanno uno scarto quadratico medio basso e delle campane molto strette intorno ai valori medi che corrispondono a circa 2-3 misurazioni costanti. Il termometro e l'igrometro risultano invece più soggetti alla presenza di plateau in quanto hanno uno scarto quadratico medio decisamente più elevato e delle campane più larghe intorno ai valori medi che corrispondono rispettivamente a circa 3-4 e 23-24 misurazioni costanti; in particolare, si vede chiaramente la tendenza del segnale relativo all'umidità ad avere plateau più lunghi a causa della bassa sensibilità dello strumento. Avendo effettuato la statistica, è possibile calcolare le lunghezze limite che verranno restituite al blocco principale e salvate all'interno del vettore *limiti* per essere successivamente utilizzate per la pulizia del segnale.

Le Equazioni 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 mostrano il calcolo delle lunghezze limite per le grandezze relative allo strumento C1.1.1 a partire dai valori mostrati in Figura 2.4.

$$L_{LIM}^{rotX} = 2.2 + 1.96 \cdot 0.5 = 3.18 \quad (2.2)$$

$$L_{LIM}^{rotY} = 2.25 + 1.96 \cdot 0.56 = 3.35 \quad (2.3)$$

$$L_{LIM}^{temp} = 3.77 + 1.96 \cdot 35.91 = 74.15 \quad (2.4)$$

$$L_{LIM}^{umid} = 23.97 + 2.58 \cdot 81.48 = 234.19 \quad (2.5)$$

Dunque, in generale, la lunghezza limite dei plateau sarà molto bassa nel caso delle rotazioni (a causa della scarsissima presenza di plateau da scartare), bassa o medio-alta per le temperature (a seconda dell'errore a cui è soggetto il singolo sensore) e medio-alta o alta per le umidità (a causa della bassa sensibilità dell'igrometro).

Nelle Tabelle 2.1, 2.2, e 2.3 sono riportate le lunghezze limite dei plateau (intese come numero di misure consecutive aventi medesimo valore) per ogni grandezza misurata e per ogni strumento presenti sul ponte in studio; i risultati ottenuti confermano le tendenze descritte.

	C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5	C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5
lim. rot. X	3.18	2.93	3.01	2.99	3.07	3.33	3.09	2.93	3.18	3.06
lim. rot. Y	3.35	3.22	3.13	3.10	3.30	3.22	3.22	3.06	3.25	3.18
lim. temp.	74.15	5.90	4.81	14.58	4.98	5.94	101.10	46.15	5.04	4.99
lim. umid.	234.19	87.76	5.57	76.46	6.23	103.30	250.95	157.72	104.19	63.55

Tabella 2.1 Lunghezza limite dei plateau per i segnali relativi ai sensori delle travi 1 e 2

	C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5	C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5
lim. rot. X	2.97	3.04	2.99	3.12	3.03	3.32	3.19	3.05	3.11	3.22
lim. rot. Y	3.17	3.06	3.00	3.06	3.14	3.30	3.05	3.21	3.12	3.23
lim. temp.	6.61	5.12	5.09	5.27	4.82	5.88	4.99	4.91	5.37	5.09
lim. umid.	103.78	94.97	79.83	63.24	68.04	113.62	5.77	64.47	77.38	59.74

Tabella 2.2 Lunghezza limite dei plateau per i segnali relativi ai sensori delle travi 3 e 4

	C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5	C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
lim. rot. X	3.10	3.15	2.83	3.10	3.13	3.15	3.01	3.22	3.13	3.11
lim. rot. Y	3.11	3.07	3.00	3.22	3.14	3.14	3.14	3.31	3.31	3.24
lim. temp.	5.56	15.04	15.06	5.30	5.66	46.73	14.34	5.33	5.59	219.17
lim. umid.	81.56	74.60	79.35	91.76	85.26	171.09	107.96	89.48	96.89	594.70

Tabella 2.3 Lunghezza limite dei plateau per i segnali relativi ai sensori delle travi 5 e 6

2.1.2 Eliminazione dei plateau

Al termine dell'esecuzione della funzione *trova_lim*, sono note le lunghezze limite per tutti i segnali e si può procedere con l'eliminazione dei plateau che hanno una lunghezza superiore.

Questo processo viene effettuato dalla funzione *pulisci_tipoA*, la quale è definita all'interno del modulo secondario *Plateau.py*. Come si può intuire dal nome della funzione, per rimuovere i plateau dai segnali, si è scelto di creare e richiamare due funzioni diverse per le due tipologie di sensore poiché cambia il numero di parametri che è necessario fornire in input.

Mediante un ciclo di 4 iterazioni strutturato come quello utilizzato in precedenza per la ricerca della lunghezza limite, il modulo principale *main.py* richiama la funzione *pulisci_tipoA*, la quale, per poter funzionare e fornire correttamente il risultato, necessita di ricevere in input i parametri di calcolo riportati di seguito.

- **grandezza**: è il vettore (avente lunghezza pari a circa 26100 valori al primo giro e poi decrescente nei giri successivi) relativo alla grandezza che contiene i plateau che verranno eliminati all'*i*-esima iterazione).
- **limite**: è la lunghezza limite dei plateau calcolata in precedenza con la funzione *trova_lim*; in particolare, esso sarà il valore contenuto all'*i*-esima posizione del vettore *limiti*.
- **N**: è la lunghezza del vettore *grandezza*, la quale è variabile da sensore a sensore e decrescerà con il procedere delle iterazioni.
- **grandezze non pulite**: sono i 12 vettori che contengono i segnali non puliti relativi a tutte le grandezze (i valori medi, massimi e minimi delle rotazioni X e Y, gli scarti quadratici medi delle rotazioni X e Y, la temperatura, l'umidità e il riferimento temporale in formato Unix Timestamp e in formato 'gg/mm/aa h:min'; per la prima iterazione, tali vettori contengono i dati raw acquisiti dal file di input mentre, nelle iterazioni successive, essi contengono i dati puliti che vengono restituiti dall'iterazione precedente.

Dopo aver ricevuto in input i parametri relativi all'*i*-esima iterazione, la funzione *pulisci_tipoA* procede alla correzione del segnale mediante un ciclo di *N* iterazioni nel quale vengono individuati e rimossi tutti i plateau che hanno una lunghezza superiore al limite calcolato in precedenza.

Questo processo viene effettuato con un algoritmo molto simile a quello utilizzato per la ricerca e il conteggio dei plateau. Per prima cosa, si creano 12 vettori inizialmente vuoti (nei quali verranno progressivamente inseriti gli elementi corretti che non vengono eliminati dall'algoritmo di pulizia), la variabile *contatore* (la quale conterà la lunghezza di ogni plateau rilevato) e la variabile *valore_precedente* (che viene inizializzata con il valore iniziale fuori scala pari a 10^{14} e che, al termine di ogni generica iterazione *m*, assumerà il valore dell'*m*-esimo elemento del segnale).

Successivamente ha inizio il ciclo in cui, ad ogni iterazione *m*, l'*m*-esimo elemento viene confrontato con l'elemento precedente e con l'elemento successivo al fine di capire se ci si trova in corrispondenza di un plateau e, in caso affermativo, se il valore corrente ricade all'inizio, all'interno o alla fine di tale plateau.

Nel primo caso, l' m -esimo elemento è uguale all' $(m+1)$ -esimo ma diverso dalla variabile *valore_precedente*: ciò significa che ci si trova all'inizio di un plateau costituito da almeno 2 elementi ed è dunque necessario incrementare di 1 la variabile *contatore* e sovrascrivere la variabile *valore_precedente* (che all'iterazione successiva non verrà più aggiornata poiché conterrà il valore che si sta mantenendo costante all'interno del plateau) con il valore dell' m -esimo elemento.

Nel secondo caso, l' m -esimo elemento è uguale sia all' $(m+1)$ -esimo elemento sia alla variabile *valore_precedente*: ciò significa che ci si trova all'interno di un plateau che comprende minimo 3 elementi ed è dunque necessario incrementare di 1 la variabile *contatore* senza sovrascrivere la variabile *valore_precedente* poiché il suo valore si manterrà costante nelle iterazioni successive fino al termine del plateau.

Nel terzo caso, l' m -esimo elemento è diverso dall' $(m+1)$ -esimo elemento ma è uguale alla variabile *valore_precedente*: ciò significa che ci si trova in corrispondenza dell'ultimo elemento di un plateau ed è dunque necessario reinizializzare a 1 la variabile *contatore* senza sovrascrivere la variabile *valore_precedente* poiché il valore si mantiene costante ancora per l'iterazione corrente.

In quest'ultimo caso, prima dell'azzeramento del contatore, è necessario eseguire l'operazione di salvataggio o di rimozione del plateau. Infatti in questo momento la variabile *contatore* sta indicando la lunghezza del plateau appena superato, la quale andrà confrontata con il limite calcolato in precedenza. Se la lunghezza del plateau è inferiore al limite, gli elementi che lo compongono sono corretti e ha dunque inizio un ciclo annidato che, compiendo un numero di iterazioni pari alla lunghezza del plateau, li salva all'interno dei vettori vuoti creati prima dell'inizio del processo di pulizia: in particolare, ad ogni iterazione k , l' $(m+k-\text{contatore})$ -esimo elemento di ognuno dei 12 vettori passati in input alla funzione viene progressivamente aggiunto al rispettivo vettore pulito.

Se invece la lunghezza del plateau supera il limite, semplicemente si procede con l'iterazione del ciclo di controllo senza eseguire il salvataggio degli elementi del plateau.

Infine, se non si ricade in nessuna delle 3 opzioni descritte, ovvero se l' m -esimo elemento è diverso sia dalla variabile *valore_precedente* che dall' $(m+1)$ -esimo elemento, non ci si trova in corrispondenza di un plateau ed è dunque necessario reinizializzare a 1 la variabile *contatore*, aggiornare la variabile *valore_precedente* con il valore dell'elemento corrente e salvare all'interno del rispettivo vettore pulito, tutti gli m -esimi elementi presenti all'interno dei 12 vettori passati in input alla funzione.

Dopo aver terminato l'analisi del segnale, il modulo secondario *Plateau.py* restituisce al modulo principale *main.py* i 12 vettori contenenti il segnale ripulito dove il ciclo di indice i procederà al salvataggio dei segnali puliti all'interno dei vettori che verranno analizzati nell'iterazione successiva, aggiornerà il limite prendendo l'elemento successivo del vettore *limiti* ed estrarrà dalla matrice *grandezze* la colonna che conterrà il segnale rispetto al quale verrà eseguita la pulizia; infine, tali parametri di input verranno nuovamente passati alla funzione *pulisci_tipoA* per una nuova analisi.

In Figura 2.5, si riporta un diagramma di flusso per illustrare nel dettaglio le fasi dell'algoritmo di eliminazione dei plateau e in particolare, i 4 casi in cui è possibile ricadere.

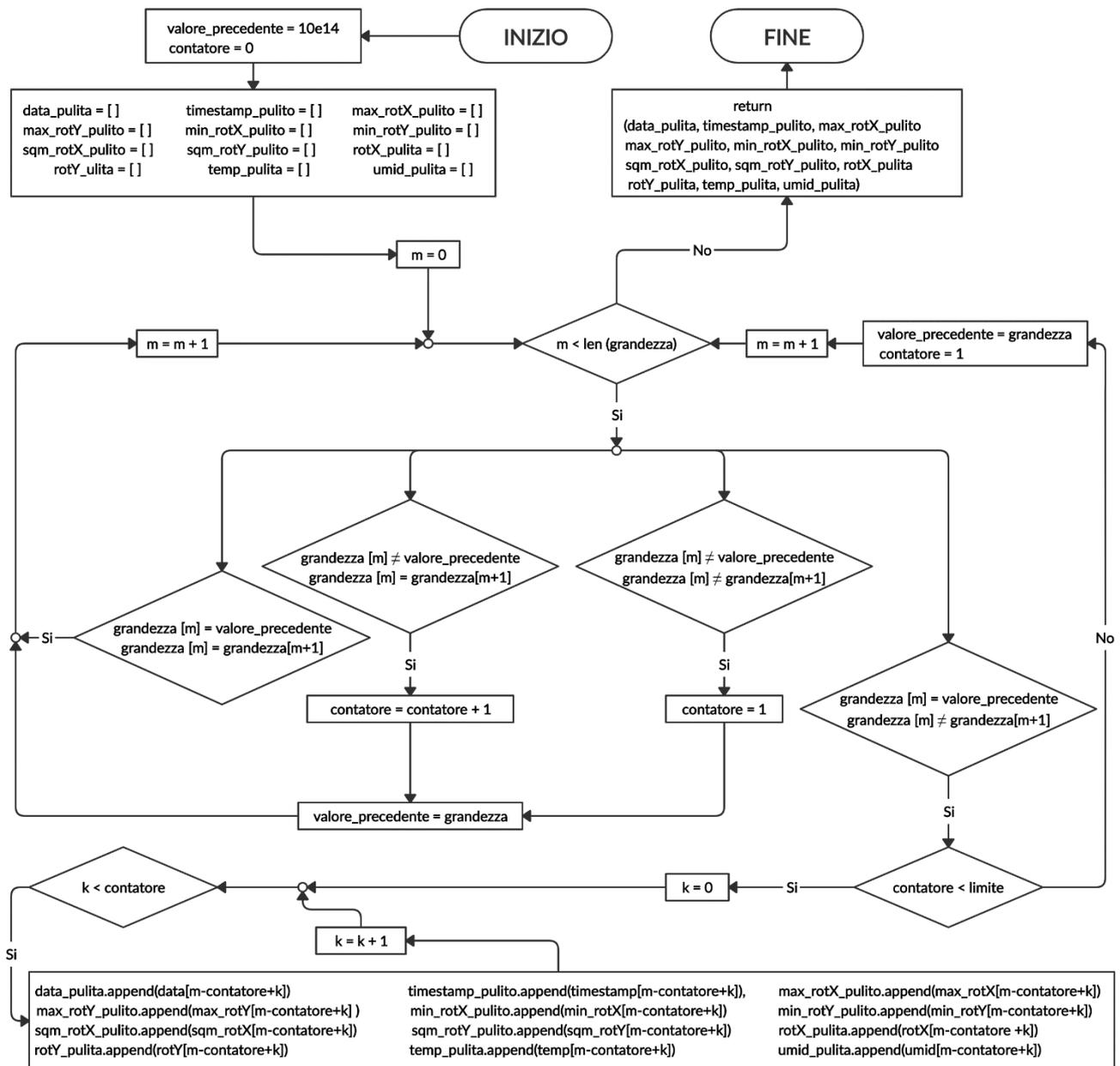


Figura 2.5 Algoritmo per la rimozione dei plateau dal generico segnale

Dopo l'esecuzione della funzione *pulisci_tipoA* per tutte le 4 grandezze, tutti i plateau sono stati rimossi e le porzioni di segnali che risultavano piatte nel grafico mostrato in Figura 2.1 sono state sostituite da un tratto inclinato che raccorda il primo e l'ultimo punto. Tale risultato è sintomo di una buona riuscita della pulizia poiché, nella fase di creazione del grafico, viene riscontrato un buco all'interno del segnale dovuto al fatto che l'algoritmo ha eliminato gli elementi errati; di conseguenza, le misurazioni relative agli istanti immediatamente precedente e immediatamente successivo a questa interruzione vengono semplicemente collegate con un segmento.

In Figura 2.6, si riporta il segnale raw graficato in Figura 2.1 a confronto con il medesimo segnale dopo la pulizia dei plateau, la quale ha comportato la rimozione di 5705 elementi con una conseguente riduzione da una lunghezza iniziale di 26121 misurazioni a una lunghezza finale di 20416 misurazioni.

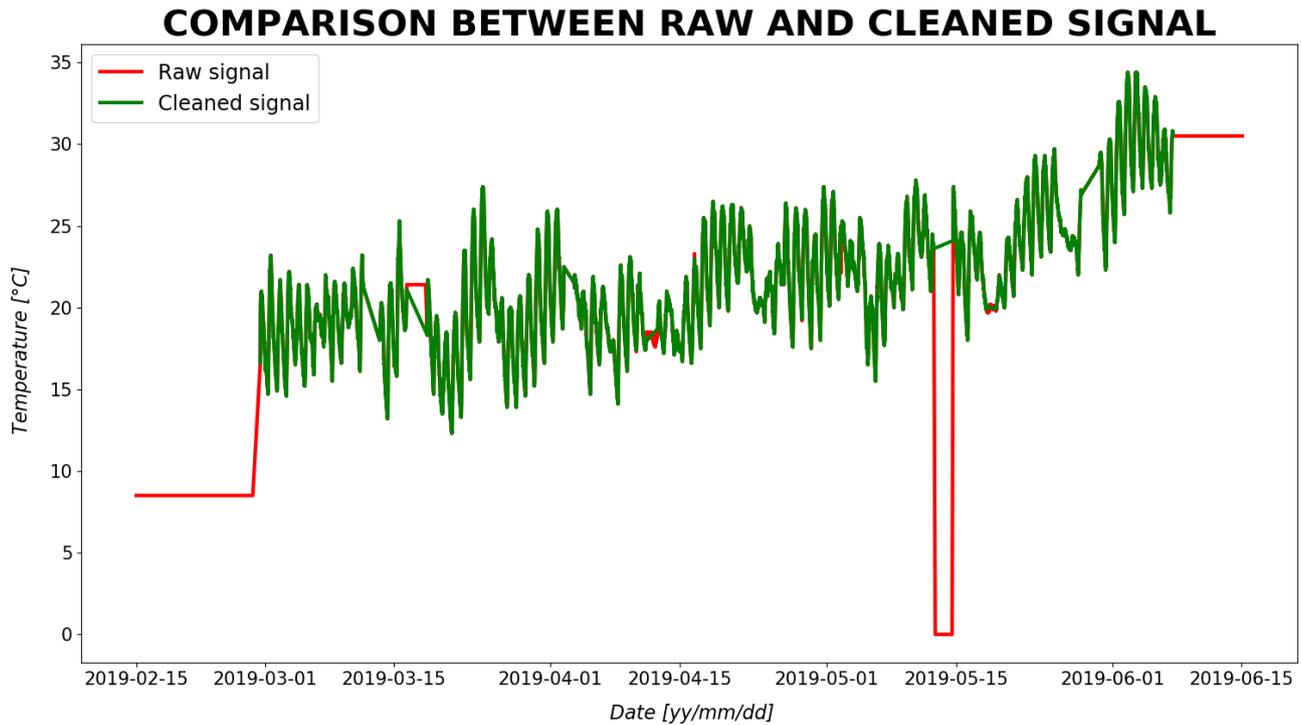


Figura 2.6 Confronto tra il segnale prima e dopo il processo di pulizia dai plateau

Al termine dell’esecuzione dell’algoritmo, l’utente avrà la possibilità di visionare i risultati dell’analisi e, se lo desidera, di modificare il parametro α fornito in output escludendo un percentile differente; in tal modo, l’analisi potrà essere affinata e ripetuta (eventualmente anche in maniera mirata per una data grandezza di un dato sensore) fino a raggiungere il risultato desiderato.

Nelle Tabelle 2.4, 2.5 e 2.6, è riportato un resoconto dei valori scartati dai segnali relativi a tutti gli strumenti installati sul ponte in studio: in particolare, sono specificate le lunghezze dei segnali prima della pulizia (nelle celle rosse), il numero di elementi scartati per ognuna delle grandezze e in totale (nelle celle bianche) e le lunghezze dei segnali dopo la pulizia (nelle celle verdi).

	C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5	C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5
lung. inizio	26121	26121	26122	26120	26121	26120	26118	26122	26119	26119
scarti rot. X	311	896	152	1088	209	430	228	778	347	183
scarti rot. Y	475	315	236	220	386	385	317	215	418	282
scarti temp	4366	2597	1752	461	2032	2826	3339	1564	1271	1646
scarti umid.	553	1829	4060	3667	3728	1124	1196	1013	2117	3649
scarti tot.	5705	5637	6200	5436	6355	4765	5080	3570	4153	5760
lung. fine	20416	20484	19922	20684	19766	21355	21038	22552	21966	20359

Tabella 2.4 Resoconto della pulizia dai plateau dei segnali relativi ai sensori delle travi 1 e 2

	C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5	C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5
lunghezza inizio	26120	26120	26117	26121	26122	26120	26122	26122	26121	26120
scarti rot. X	980	221	935	240	166	449	288	198	236	340
scarti rot. Y	289	172	152	162	206	444	185	377	244	297
scarti temp	2764	1275	1352	1286	1690	2743	1850	1563	1574	1188
scarti umid.	1564	3549	3404	4581	4148	1049	4366	3103	3873	4083
scarti tot.	5597	5217	5843	6269	6210	4685	6689	5241	5927	5908
lunghezza fine	20523	20903	20274	19852	19912	21435	19433	20881	20194	20212

Tabella 2.5 Resoconto della pulizia dai plateau dei segnali relativi ai sensori delle travi 3 e 4

	C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5	C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
lunghezza inizio	26121	26119	26117	26120	26120	26121	26120	26118	26119	26119
scarti rot. X	226	294	556	246	249	296	166	340	263	254
scarti rot. Y	197	244	834	319	263	325	248	386	423	319
scarti temp	2009	444	460	1649	1776	1563	525	1653	1826	6870
scarti umid.	2935	4189	4355	3079	2569	917	4145	3069	2941	0
scarti tot.	5367	5171	6205	5293	4857	3101	5084	5448	5453	7443
lunghezza fine	20754	20948	19912	20827	21263	23020	21036	20670	20666	18676

Tabella 2.6 Resoconto della pulizia dai plateau dei segnali relativi ai sensori delle travi 5 e 6

2.2 Correzione delle porzioni traslate

La seguente tipologia di errore non è effettivamente presente all'interno dei segnali misurati dagli strumenti installati sul ponte in studio tuttavia, potendo occorrere nella pratica comune, essa deve poter essere riconosciuta e corretta dal codice.

Le cause di tale anomalia possono essere di natura fisica (se il sensore viene in qualche modo toccato o mosso), elettrica (se la rete di alimentazione è soggetta un improvviso sbalzo di tensione) o dovuta ad anomalie del firmware di gestione. Questi disturbi portano allo spostamento (temporaneo o definitivo) dello 'zero' del sensore e dunque ad una traslazione rigida di intere porzioni di segnale.

Non essendo presente alcun errore di traslazione all'interno dei segnali in studio, al fine di studiare il fenomeno, è stato sporcato artificialmente il segnale (ripulito dai plateau) relativo alla rotazione X misurata dallo strumento C1.1.1 traslando manualmente alcune sue porzioni per ottenere infine l'andamento mostrato nel grafico in Figura 2.7.

Il codice di calcolo deve essere in grado di riconoscere tali porzioni e di correggerle riportando il segnale alla situazione in cui si trovava prima di essere modificato e fornendo all'utente le caratteristiche degli errori riscontrati (i riferimenti temporali relativi al primo e all'ultimo elemento della porzione traslata, il numero di elementi affetti da errore e l'ampiezza della traslazione).

La difficoltà nel creare un algoritmo che corregga in maniera automatica questa tipologia di errore è essenzialmente dovuta alla grande variabilità delle cause che scatenano il fenomeno. Infatti, a seconda della problematica insorta e della tipologia di sensore, le porzioni interessate da traslazione possono essere, singole o in serie, con uno sviluppo istantaneo o progressivo e possono avere lunghezze molto diverse. In alcuni casi, addirittura, il sensore non riesce a ripristinare il suo 'zero' corretto e continua a effettuare acquisizioni errate.

In particolare, gli errori di traslazioni riconosciuti dal codice sono stati suddivisi in tre famiglie, le quali verranno denominate come mostrato di seguito:

- **Traslazione di tipo A:** è l'errore 'standard' che consiste semplicemente in un'improvvisa traslazione dello 'zero' ad un certo istante t_{inizio} , la quale si mantiene costante per un certo numero di acquisizioni per poi, altrettanto improvvisamente, sparire all'istante t_{fine} .
- **Traslazione di tipo B:** questa tipologia di traslazione consiste in un'improvvisa traslazione dello 'zero' ad un certo istante t_{inizio} , la quale si mantiene costante per un certo numero di acquisizioni; la differenza dal caso precedente è data dal fatto che il sensore non risolve il problema in un unico step ma effettua una serie di traslazioni intermedie e dunque la prima porzione di segnale è seguita da altre porzioni traslate con ampiezza diversa.
- **Traslazione di tipo C:** questa tipologia di traslazione è quella che differisce maggiormente dalle altre poichè è caratterizzata da uno spostamento dello 'zero' che non avviene più istantaneamente ma suddiviso in salti singoli di ampiezza intermedia; questo fenomeno può avvenire sia all'inizio sia alla fine della porzione traslata.

Gli esempi di queste tipologie di errore sono riportati nel paragrafo 2.2.6, in cui è riportata una descrizione dettagliata del segnale di esempio mostrato in Figura 2.7 insieme ai risultati della sua analisi da parte dell'algoritmo spiegato nei paragrafi successivi.

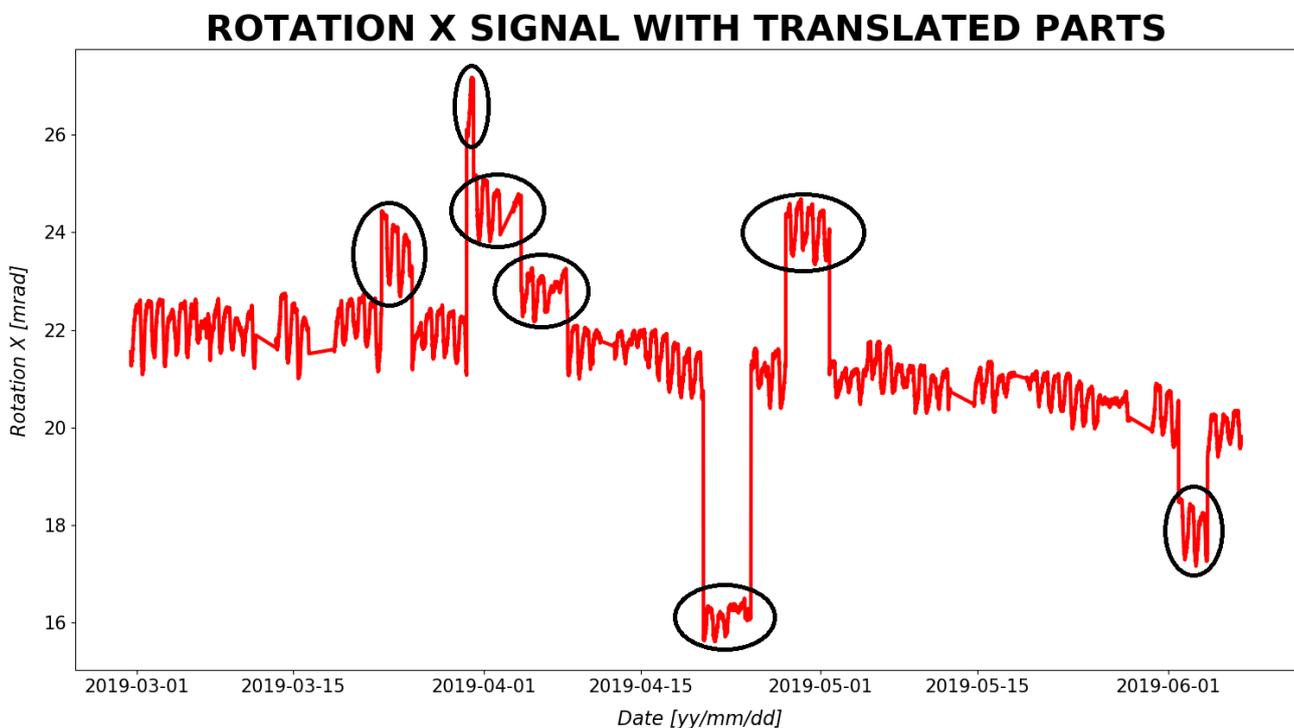


Figura 2.7 Errori di traslazione creati nel segnale di rotazione X dello strumento C1.1.1

2.2.1 Richiamo della routine esterna

La correzione degli errori di traslazione viene effettuata all'interno del modulo secondario *errori_di_traslazione.py* dalla funzione *rimuovi_traslazione*, la quale viene richiamata all'interno del modulo principale *main.py* mediante un ciclo di 4 iterazioni simile a quello utilizzato per le funzioni di riconoscimento e rimozione dei plateau. Per poter funzionare e fornire correttamente il risultato, tale funzione ha bisogno di ricevere in input i parametri riportati di seguito.

- **grandezza**: è il vettore (di lunghezza variabile a seconda del numero di plateau che sono stati precedentemente rimossi) relativo alla grandezza che viene analizzata al j-esimo giro (temperatura, umidità, rotazione X o rotazione Y).
- **tempo** e **data**: sono i vettori (aventi la stessa lunghezza del vettore *grandezza*) che contengono i riferimenti temporali delle misurazioni rispettivamente in formato Unix Timestamp e in formato gg/mm/aa hh.min.
- **Δt_{max}** : è il massimo salto temporale accettato all'interno del segnale; è necessario per tenere in considerazione il fatto che il segnale contiene dei buchi dovuti al precedente processo di cancellazione dei plateau.
- **errore_minimo**: è la traslazione minima (presa in valore assoluto) che l'algoritmo è in grado di individuare all'interno del segnale analizzato.
- **Grandezze per il file**: sono tutte le grandezze necessarie per il salvataggio dei risultati ottenuti all'interno dell'apposito file di riepilogo: tra queste, sono presenti il parametro *etichetta* (ovvero la stringa con il nome della grandezza ripulita), il parametro *udm* (ovvero la stringa con l'unità di misura della grandezza ripulita), i parametri *percorso_file* e *nome_file* (ovvero le stringhe che contengono il percorso in cui creare il file con i risultati e il nome del sensore per dare il nome a tale file).
- **Grandezze per il percentile**: sono tutte le grandezze che serviranno alla definizione del percentile relativo all'Equazione 2.6, le quali verranno dettagliatamente descritte all'interno del sottoparagrafo 2.2.5: tra queste, sono presenti le variabili numeriche *percentile*, *percentile_max* e *errori_costanti* e la stringa *percentile_corretto*.

Il diagramma di flusso riportato in Figura 2.8 descrive dettagliatamente l'algoritmo presente all'interno del modulo principale *main.py*: dopo aver importato il modulo secondario *errori_di_traslazione.py* e aver creato gli array che contengono i parametri di calcolo per ogni grandezza, ad ogni iterazione del ciclo, vengono estratti tutti gli elementi relativi al segnale da analizzare, i quali vengono passati in input alla funzione *rimuovi_traslazione*.

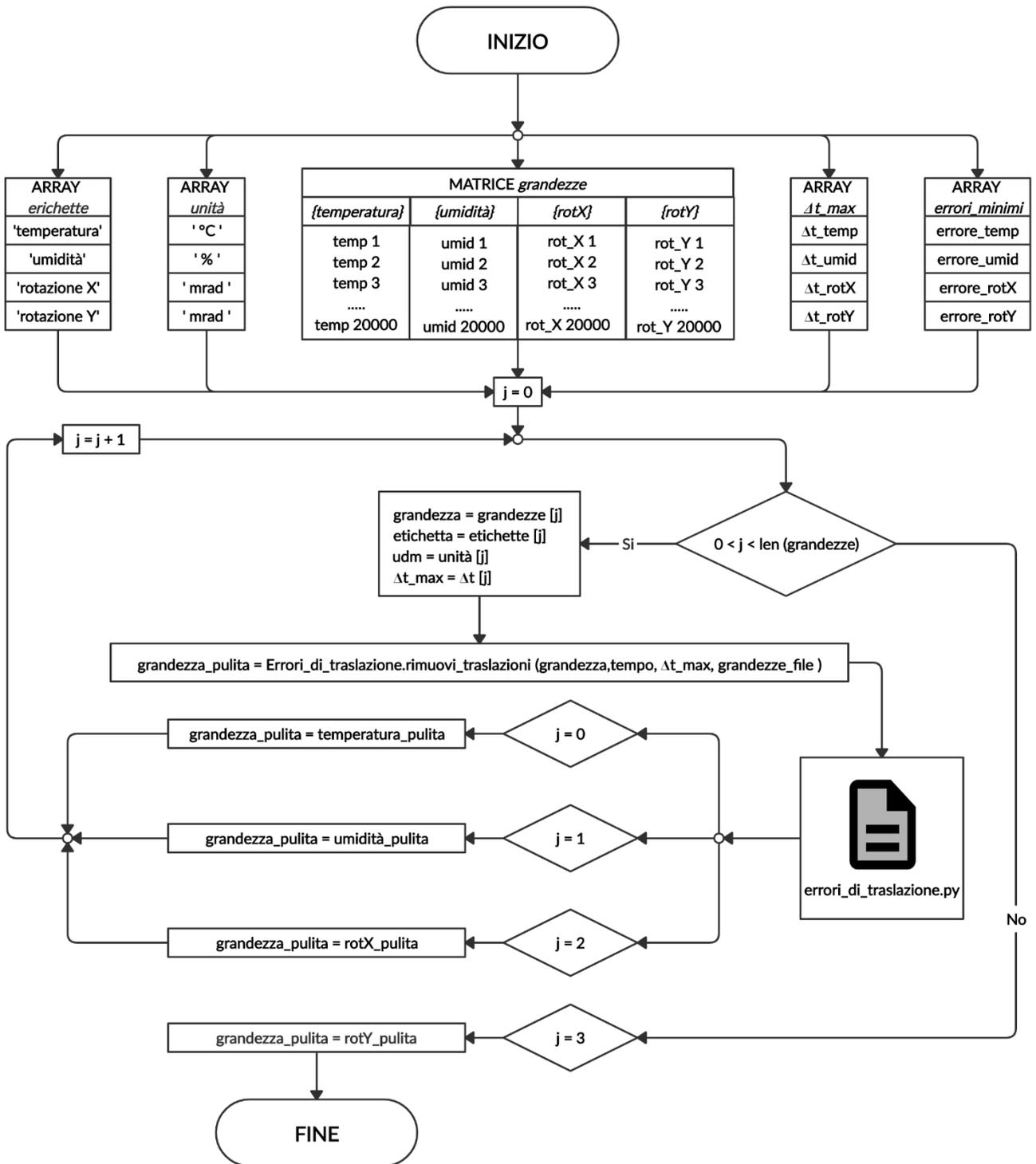


Figura 2.8 Algoritmo per il richiamo della funzione 'rimuovi_traslazione'

2.2.2 Scelta del parametro di controllo e definizione del limite

Dopo che la funzione *rimuovi_traslazione* riceve in input i parametri di calcolo, gli algoritmi di riconoscimento e correzione degli errori hanno effettivamente inizio.

Il problema della loro taratura è complicato dal fatto che i segnali sono molto diversi tra loro sia in termini di precisione sia in termini di forma; infatti è necessario tenere in conto che, come già visto nella pulizia dei plateau, i sensori montati nello strumento hanno sensibilità diverse (gli inclinometri sono più sensibili del termometro, il quale è più sensibile dell'igrometro). Inoltre, nonostante sia ovviamente possibile trovare una correlazione tra i sensori presenti su una stessa campata, essi, presi singolarmente, mostrano comportamenti molto diversi in quanto presentano delle oscillazioni giornaliere di diversa ampiezza e di diversa forma. Questa particolarità causa problemi in fase di automazione del processo di pulizia in quanto è necessario trovare un unico parametro di controllo che renda l'algoritmo sufficientemente robusto permettendogli di rilevare i valori anomali all'interno del segnale analizzato indipendentemente dalla grandezza misurata e dallo strumento.

La scelta più vantaggiosa ricade sullo scarto che si verifica tra due acquisizioni successive, il quale sarà ovviamente diverso tra le grandezze misurate (in quanto le variazioni giornaliere di temperatura, di umidità e di rotazione nelle direzioni X e Y saranno molto differenti), tra gli strumenti installati (in quanto la posizione del sensore influenza sia le condizioni termoigrometriche dell'atmosfera locale sia la rotazione della zona di impalcato monitorata) e, più in generale, tra le tipologie di strumento esistenti sul mercato (in quanto il tempo di campionamento influenza la risoluzione del segnale).

Tuttavia, se si esegue una statistica degli scarti tra tutte le coppie di elementi successivi all'interno del segnale calcolandone la media e lo scarto quadratico medio, è lecito ipotizzare che una certa misurazione è errata se il valore assoluto della variazione rispetto alla misurazione precedente è superiore ad un certo valore limite definito come mostrato nell'Equazione 2.6.

$$\Delta_{LIM} = \mu_{\Delta} + \alpha \cdot \sigma_{\Delta} \quad (2.6)$$

Dove μ_{Δ} e σ_{Δ} sono rispettivamente media e scarto quadratico medio della distribuzione di frequenze dei salti $\Delta_i = G_i - G_{i-1}$ tra due elementi del segnale relativo alla generica grandezza G mentre α è il coefficiente per la definizione del percentile di Gaussiana che andrà scartato.

Dunque, pur coinvolgendo grandezze diverse, il criterio utilizzato per individuare un valore errato è il medesimo utilizzato per la scelta della lunghezza massima dei plateau nel paragrafo precedente.

Tuttavia, la differenza è data dal fatto che, in questo caso, è molto complesso definire un percentile che permetta di riconoscere un valore effettivamente errato in maniera sufficientemente generale.

Infatti, come già specificato precedentemente, i segnali di output, pur essendo relativi ad una stessa grandezza, hanno oscillazioni giornaliere anche molto diverse tra loro e dunque, definendo un coefficiente α che funziona correttamente per un sensore, non si riescono ad ottenere dei risultati corretti per tutti gli altri. Questo risulta essere un problema in quanto, dall'altro lato, non è nemmeno possibile lasciare all'utente la scelta del percentile da escludere per ognuno degli strumenti installati e per ognuna delle grandezze misurate poiché, in prima battuta, probabilmente non lo conoscerà e, in ogni caso, verrebbe meno il vantaggio dell'automazione dell'analisi dei dati.

Dunque è necessario che l'algoritmo sia in grado di individuare in automatico un valore α tale per cui si riesca ad ottenere un risultato corretto.

In ogni caso, supponendo di conoscere il valore corretto del percentile escluso, la funzione *rimuovi_traslazione* analizza il segnale relativo alla grandezza passata in input dal blocco principale e ne esegue una statistica come descritto nell'algoritmo mostrato in Figura 2.9. Tale algoritmo crea un vettore inizialmente vuoto chiamato *salti* e lo riempie progressivamente con il valore assoluto degli scarti calcolati tra tutte le coppie di valori successivi del segnale. Al termine del ciclo, si otterrà dunque un vettore avente lunghezza pari alla lunghezza del segnale meno 1.

Infine, ipotizzando una distribuzione normale, si calcolano la media e lo scarto quadratico medio della distribuzione degli scarti e combinandoli come mostrato nell'equazione 2.6, si ottiene lo scarto limite. Come già spiegato, non essendo possibile definire a priori un percentile valido per ognuna delle grandezze misurate, è necessario attendere il completamento del processo di pulizia in quanto, osservando i risultati, sarà possibile trovare un criterio per una taratura robusta del parametro α .

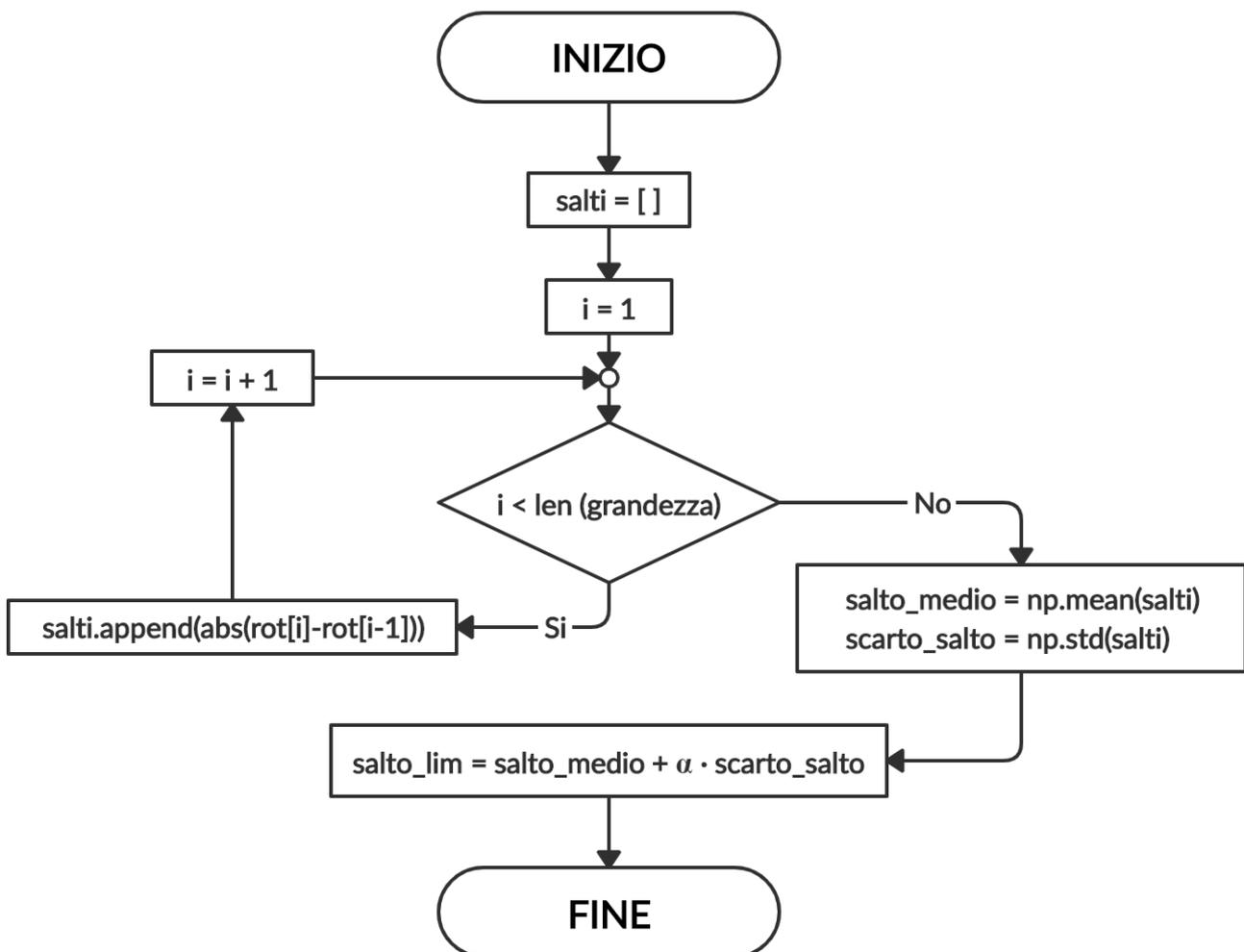


Figura 2.9 Algoritmo per la definizione del massimo scarto accettabile

2.2.3 Algoritmo di controllo dei cicli di pulizia

Nell'ipotesi di avere individuato un valore corretto per il parametro α , si conosce il massimo scarto accettabile tra due misurazioni consecutive; se tale valore viene superato, la seconda misurazione è errata e potrebbe costituire l'inizio di una traslazione che interessa gli elementi successivi.

Avendo definito il criterio, è dunque possibile iniziare la correzione degli elementi errati, la quale viene effettuata mediante una serie di cicli di pulizia di lunghezza decrescente. Il primo ciclo parte dal primo elemento e, nel caso di un mancato riscontro di errori, ha lunghezza pari alla lunghezza del segnale analizzato e si conclude con l'ultimo elemento. Se invece viene rilevato un dato traslato, il ciclo viene interrotto all'indice i relativo a tale elemento (il primo della potenziale porzione traslata) e si procede alla correzione della traslazione. Supponendo che la porzione traslata sia composta da n dati, al termine della correzione, ha inizio un nuovo ciclo che parte dall' $(i+n)$ -esimo elemento e che, a meno di ulteriori riscontri, si conclude nuovamente con l'ultimo elemento della serie.

In altre parole, la pulizia viene effettuata con un numero incognito di cicli che analizzano il segnale a partire dall'indice a cui è arrivata la pulizia al ciclo precedente per arrivare all'indice in cui viene rilevato un nuovo errore o all'indice a cui corrisponde l'ultimo elemento del segnale.

Per ottenere un'analisi strutturata in questo modo, è stato necessario definire le due variabili di controllo *indice_progressivo* e *flag*: la prima viene inizializzata al valore 1 e, al termine di ogni ciclo di pulizia, assume il valore relativo all'indice dell'ultimo elemento controllato fino ad arrivare all'ultimo elemento mentre la seconda è un parametro che viene inizializzato al valore 0 e, nei cicli successivi, mantiene valore 0 se non è stato controllato l'intero segnale e assume valore 1 quando l'ultimo elemento del vettore *grandezza* è stato analizzato dall'algoritmo di pulizia. In Figura 2.10, si riporta un diagramma di flusso che descrive dettagliatamente il meccanismo appena spiegato.

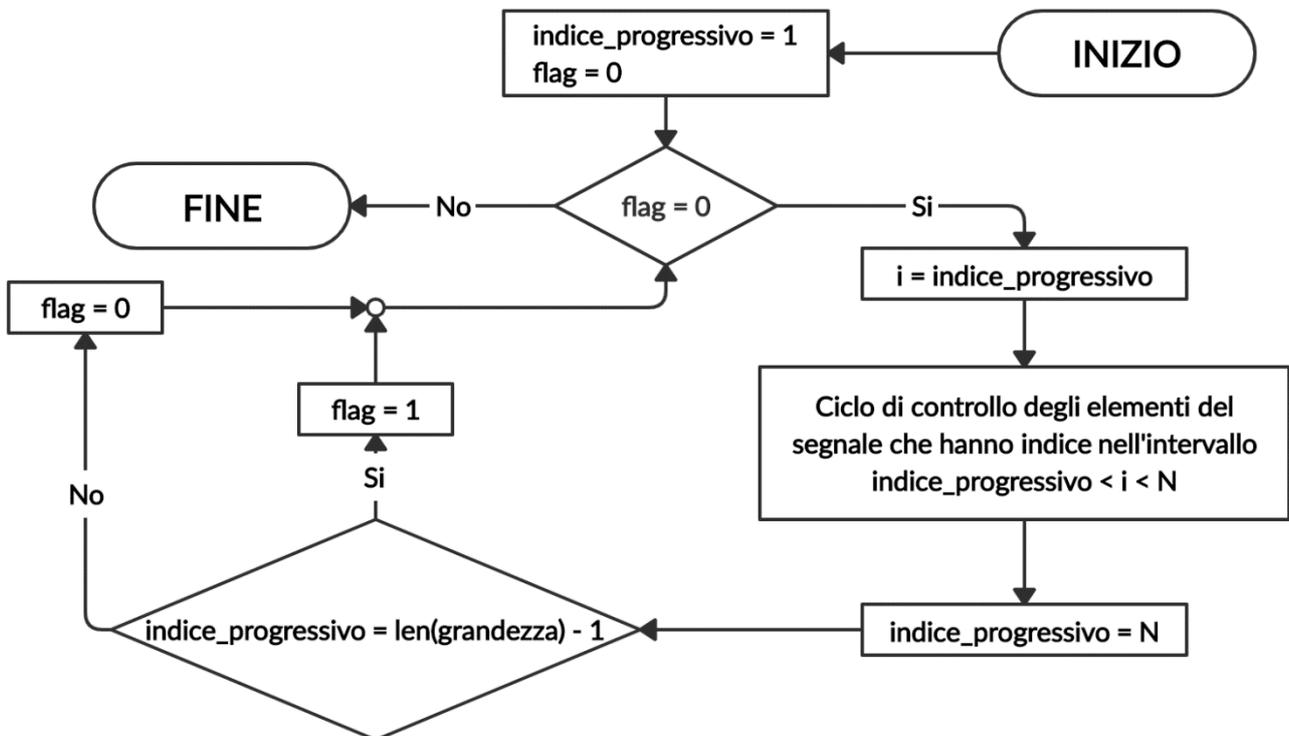


Figura 2.10 Algoritmo di controllo dei cicli di pulizia del segnale

2.2.4 Algoritmo di riconoscimento e pulizia

Con il meccanismo mostrato in Figura 2.10, vengono controllati i cicli di pulizia, i quali consistono in una prima fase di riconoscimento dei valori errati (e nello specifico del primo valore che potrebbe costituire l'inizio di una potenziale traslazione), in una seconda fase di effettiva pulizia della porzione di segnale successiva all'elemento trovato qualora essa sia effettivamente affetta da un errore di traslazione e in una fase finale di controllo e di segnalazione dell'errore rimosso.

Già nella fase iniziale di riconoscimento dei valori potenzialmente errati, è necessario tenere in considerazione l'insorgenza di due situazioni ambigue che potrebbero far erroneamente pensare all'inizio di una traslazione; l'algoritmo deve poter riconoscere immediatamente e automaticamente tali situazioni per evitare di manipolare una porzione di segnale che non ha bisogno di tale pulizia.

Nel primo caso, un singolo valore del segnale risulta essere errato ma i successivi tornano ad avere un andamento perfettamente plausibile; qualora l'algoritmo rilevi un comportamento di questo genere, esso rimuoverà l'anomalia per il singolo elemento ma non verrà conteggiato come errore. Infatti, nonostante sia possibile vedere lo scostamento di un valore singolo come un caso particolare di errore di traslazione di lunghezza unitaria, si è scelto di trattare la correzione di queste anomalie all'interno di un'altra routine poiché in questa fase, con questo algoritmo, non si riesce ad ottenere una correzione di tutti i picchi e sarebbe comunque necessario un algoritmo supplementare. Infatti, per poter eliminare tutti i picchi in questa routine, sarebbe necessario usare parametri meno stringenti che porterebbero al riconoscimento di errori di traslazione che nella realtà non ci sono.

Tuttavia, il riconoscimento di questi picchi è necessario per poter rimuovere le traslazioni di tipo C (definite insieme alle traslazioni di tipo A e di tipo B all'inizio del paragrafo 2.2).

La seconda problematica che può presentarsi nella ricerca degli errori di traslazione è dovuta al fatto che il segnale potrebbe essere stato già precedentemente manipolato per rimuovere le porzioni caratterizzate da plateau; in particolare, alcuni segnali hanno subito l'eliminazione di alcune loro parti e il segnale analizzato presenta dei 'buchi' ovvero degli intervalli temporali in cui non si hanno dati.

Se tali intervalli sono molto lunghi, può accadere che lo scarto tra l'ultimo valore prima dell'interruzione e il primo valore successivo all'interruzione superi il limite definito in precedenza. In queste circostanze, l'algoritmo deve essere in grado rilevare l'anomalia in maniera automatica non considerandola come un possibile errore di traslazione.

Per poter riconoscere il problema e non effettuare manipolazioni errate del segnale, l'algoritmo esegue un controllo sul vettore dei tempi (in formato Unix Timestamp) e, ogni volta che l'intervallo tra due acquisizioni successive supera il limite prestabilito, lo scarto tra le due misurazioni viene ignorato (anche se superiore allo scarto massimo accettabile) e si procede con l'analisi dei valori successivi. Nel caso in cui invece lo scarto temporale non superi il limite, l'algoritmo procede normalmente alla correzione dell'elemento che ha uno scostamento eccessivo dal precedente.

Di conseguenza, la pulizia del segnale dipende dal massimo intervallo temporale accettabile tra due misurazioni successive, il quale dipende a sua volta dalla presenza di plateau all'interno del segnale originario nonché dalla frequenza di campionamento del sensore in uso.

La soluzione migliore risulta essere quella di lasciare la scelta di tale parametro all'utente poiché solo quest'ultimo conosce la tipologia di sensore installata e il grado di pulizia dei segnali su cui lavora.

A questo scopo, come mostrato in Figura 2.11, è stata predisposta una sezione di *file di input utente.txt* per l'inserimento del massimo intervallo temporale accettato.

```

(5) CORREZIONE ERRORI DI TRASLAZIONE (5)

In questa sezione, viene richiesto di inserire per ognuna delle grandezze scritte, il massimo intervallo temporale, oltre il quale, il primo valore successivo non viene considerato come errato pur sorpassando il limite; lasciando uno spazio dopo il simbolo ':', inserire l'intervallo massimo in secondi in funzione del tempo di campionamento del sensore utilizzato. I valori inseriti sono riferiti ad un sensore che ha tempo di campionamento medio di 5.5 minuti: dunque da un'interruzione di 3 acquisizioni a salire, il valore successivo non viene considerato errato (5.5 minuti * 60 secondi * 3 acquisizioni = 990 secondi ≈ 1000 secondi).

massimo_salto_temporale_temperatura[s]: 1000
massimo_salto_temporale_umidità[s]: 1000
massimo_salto_temporale_rotazioneX[s]: 1000
massimo_salto_temporale_rotazioneY[s]: 1000

```

Figura 2.11 Prima parte del quinto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

Ha quindi inizio il primo ciclo di pulizia che analizza l'*i*-esimo elemento del vettore *grandezza* e ne calcola lo scarto (con il rispettivo segno) rispetto al precedente salvandolo nella variabile *salto*; successivamente, si procede confrontando il valore assoluto di tale scarto con il limite calcolato con l'algoritmo mostrato in Figura 2.9. Se il valore della variabile *salto* ricade all'interno del percentile selezionato oppure se l'intervallo temporale che intercorre tra le due misurazioni successive supera la tolleranza massima scelta dall'utente, l'elemento non viene modificato e si passa ad analizzare allo stesso modo gli elementi successivi (sovrascrivendo la variabile *salto* ad ogni iterazione *i*) finché non si giunge all'ultimo elemento del segnale. A questo punto, semplicemente, la variabile *indice_progressivo* assumerebbe il valore dell'indice di fine segnale e il ciclo verrebbe interrotto poiché la variabile di controllo *flag* presenterebbe il valore di uscita dall'algoritmo (vedi Figura 2.10). Viceversa, se il valore della variabile *salto* è maggiore del limite calcolato e, contemporaneamente, lo scarto temporale intercorso tra le misurazioni non è eccessivo, l'elemento analizzato è errato e ci si trova all'inizio di una porzione traslata (avente quantomeno lunghezza unitaria).

In questo caso, si entra nella fase di pulizia vera e propria che consiste in un ciclo annidato di indice *j* e di lunghezza inizialmente ignota (pari al numero di elementi che costituiscono la porzione di segnale affetta dall'errore di traslazione). A partire dal valore $j = 0$ (e dunque dall'elemento *i*-esimo riconosciuto come errato), si considera l' $(i+j)$ -esimo elemento e lo si corregge come mostrato nell'Equazione 2.7 sottraendo il valore della variabile *salto* finché il valore assoluto dello scarto tra l'elemento corretto e quello precedente rimane all'interno del percentile definito in precedenza.

$$grandezza[i + j] = grandezza[i + j] - salto \quad (2.7)$$

In altre parole, avendo rilevato che l'*i*-esimo elemento del segnale si discosta in maniera anomala dal precedente, l'algoritmo lo corregge ed esegue un controllo sul valore che assumerebbe l' $(i+j)$ -esimo elemento se venisse corretto con il medesimo scarto. Se lo scarto rispetto all'elemento precedente (che adesso risulta corretto) ricade all'interno del percentile definito dall'utente, la correzione viene effettivamente effettuata e si procede con lo stesso criterio all'analisi dell' $(i+j+1)$ -esimo elemento basandosi questa volta sulla correttezza dell' $(i+j)$ -esimo elemento.

Per evitare errori in questa fase di riconoscimento degli elementi della porzione traslata, è nuovamente necessario tenere in conto la variabile Δt_{max} poiché l'algoritmo si fonda unicamente sullo scarto tra due elementi successivi e un salto temporale eccessivo potrebbe portare alla fine anticipata del processo di pulizia anche se non è stata corretta l'intera porzione errata. Per questa ragione, alla fine della correzione dell'(i+j)-esima iterazione, prima di incrementare l'indice e analizzare l'elemento successivo, si controlla la (i+j+1)-esima iterazione e, se viene rilevato uno scostamento eccessivo tra le misurazioni, si esegue la correzione dell'elemento corrispondente.

In questo modo, l'algoritmo riesce a passare all'analisi dell'(i+j+2)-esimo elemento bypassando l'istruzione di controllo che porterebbe al troncamento della pulizia prima della fine effettiva.

Tenendo in conto la variabile Δt_{max} , se l'algoritmo rileva che la correzione di un certo elemento porta ad un valore che non rispetta il criterio di controllo e si discosta troppo dal precedente pur non essendo in presenza di un salto temporale che supera il limite imposto dall'utente, il ciclo di pulizia viene interrotto e si procede alla fase di controllo e salvataggio della porzione di segnale corretta.

Ogni volta che il processo di pulizia va a buon fine, viene incrementata la variabile *contatore*, la quale, ad ogni nuovo ciclo di pulizia, viene inizializzata in modo tale che, al termine, essa indichi la lunghezza della porzione di segnale che è stata appena corretta.

L'ultima fase del ciclo comincia con il controllo della lunghezza del tratto corretto: se la lunghezza è unitaria (ovvero la variabile *j* è ancora pari a 0), è stato semplicemente corretto un picco singolo e dunque si conclude il ciclo senza eseguire altre operazioni in quanto, come già spiegato in precedenza, il segnale verrà successivamente analizzato da una routine apposita deputata alla correzione di questi errori. Viceversa, se la porzione traslata è costituita da almeno due elementi, si salvano all'interno di appositi vettori vuoti (creati prima dell'inizio dell'algoritmo) le caratteristiche dell'errore appena corretto (i riferimenti temporali di inizio e fine in formato gg/mm/aa h:min, la lunghezza della porzione di segnale traslata e l'ampiezza della traslazione corretta).

Il ciclo viene infine concluso incrementando di 1 la variabile *errori* (inizialmente settata a 0) per tenere in conto dell'errore di traslazione rimosso e salvando l'indice dell'ultimo elemento analizzato nella variabile *indice_progressivo*; in questo modo, l'algoritmo di controllo mostrato in Figura 2.10 fa iniziare un nuovo ciclo dal primo valore non corretto o interrompe l'analisi (assegnando il valore 0 alla variabile *flag*) nel caso in cui siano stati analizzati tutti gli elementi del vettore *grandezza*.

Un algoritmo di controllo e pulizia con la struttura appena descritta permette la rimozione delle tre tipologie di errore descritte all'inizio del paragrafo 2.2 poiché esso riconosce e corregge i picchi singoli e le traslazioni di tipo A (ovvero quelli più semplici) singolarmente. Questo semplifica decisamente la correzione delle più complesse traslazioni di tipo B e di tipo C in quanto queste ultime possono essere viste come la combinazione di più traslazioni semplici: in particolare la traslazione di tipo B può essere vista come una serie più o meno lunga di traslazioni singole poste in serie mentre la traslazione di tipo C può essere vista come una serie di picchi singoli, seguiti da una traslazione singola, seguita a sua volta da un'altra serie di picchi singoli. Di conseguenza, l'algoritmo è eventualmente in grado di gestire anche una ipotetica traslazione di tipo D: essa deriverà dalla combinazione di una traslazione di tipo B con una traslazione di tipo C e sarà costituita da una serie di picchi singoli, seguiti da un certo numero di traslazioni singole, seguite a loro volta da un'altra serie di picchi singoli.

In Figura 2.12, si riporta un diagramma di flusso che illustra nel dettaglio un generico ciclo di pulizia che parte dall'elemento avente indice pari alla variabile *indice_progressivo* e termina con l'elemento finale di una porzione traslata o con l'ultima misurazione del segnale.

Si noti che all'interno dell'operazione di controllo degli scarti, è presente una condizione in più rispetto a quelle descritte precedentemente: la motivazione di questa scelta è dovuta alla taratura del percentile da escludere ed è dunque spiegata all'interno del paragrafo 2.2.5. In ogni caso, l'unico effetto di questa condizione aggiuntiva è quello di non valutare come errati tutti gli scarti che sono inferiori ad un certo valore minimo che verrà definito come mostrato nel paragrafo successivo.

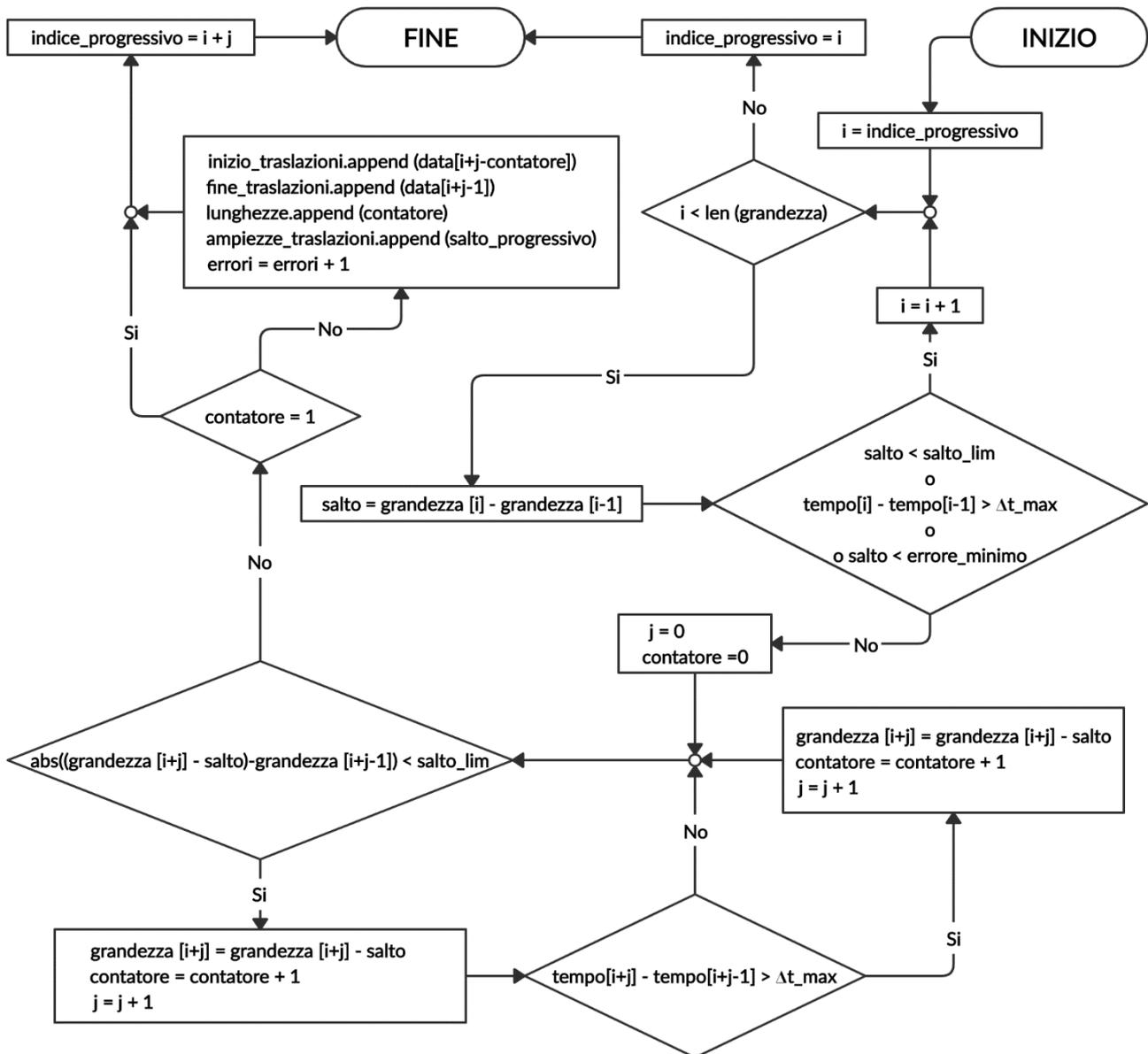


Figura 2.12 Algoritmo per il rilevamento e la pulizia degli errori di traslazione

2.2.5 Taratura del parametro α

L'accoppiamento degli algoritmi di controllo e pulizia mostrati nelle Figure 2.10 e 2.12 garantisce un buon risultato nel rilevamento e nella correzione degli errori di traslazione solamente se si sceglie un parametro α che porti all'esclusione del percentile corretto. Tuttavia, come specificato nel paragrafo 2.2.3, non esiste un percentile che permetta di ottenere i risultati corretti per tutte le grandezze e per tutti i sensori. Inoltre, la stessa problematica viene riscontrata pur facendo riferimento al medesimo segnale: infatti se, escludendo un certo percentile, si ottiene un segnale pulito correttamente, rianalizzando il segnale di output, verranno riscontrati altri errori in realtà inesistenti. Di conseguenza, è necessario implementare un metodo per scartare un percentile che permetta di ottenere il risultato corretto indipendentemente dalla quantità di errori presenti nel segnale e dal numero di volte che quest'ultimo viene analizzato.

Un possibile criterio di definizione del parametro α potrebbe essere l'assegnazione del valore in funzione della precisione del segnale, la quale viene valutata a partire da una statistica eseguita sulle misurazioni prima della pulizia. Infatti, supponendo che il segnale analizzato abbia una distribuzione di tipo Gaussiano, si può affermare che, quanto più la campana è stretta (ovvero quanto più è scarsa la tendenza delle misurazioni a distaccarsi dal valore medio), tanto più il segnale è preciso e necessita di un parametro α maggiore poiché, per individuare tutti gli outliers, è sufficiente scartare un percentile minore. Viceversa, se il segnale è più irregolare e presenta una variabilità più ampia, per individuare tutti gli elementi errati, è necessario scartare un percentile maggiore con il rischio però di considerare come errati elementi in realtà corretti. Per valutare la bontà di questo criterio, si fa riferimento al coefficiente di variazione, il quale permette di quantificare la precisione di una certa misurazione indipendentemente dai valori misurati.

$$\sigma_G^* = \left| \frac{\sigma_G}{\mu_G} \right| \cdot 100 \quad (2.8)$$

Dato che, come mostrato nell'equazione 2.8, il coefficiente di variazione relativo al segnale di una generica grandezza G , è semplicemente lo scarto quadratico σ_G medio normalizzato rispetto alla media μ_G , esso sarà tanto maggiore quanto più le misurazioni si distaccano dal valore medio.

Nelle Tabelle 2.7, 2.8 e 2.9, si riportano i coefficienti di variazione relativi ai segnali di tutte le grandezze misurate dagli strumenti installati sul ponte in studio.

	C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5	C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5
σ^*_{rotX}	3.32%	7.91%	7.91%	6.61%	6.02%	0.6%	1.62%	1.08%	0.5%	0.88%
σ^*_{rotY}	2.31%	1.04%	1.43%	0.71%	2.14%	0.42%	2.5%	2.4%	1.18%	0.48%
σ^*_{temp}	18.18%	22,00%	22.26%	21.9%	22.96%	20.8%	21.76%	20.71%	20.91%	21.6%
σ^*_{umid}	4.13%	3.98%	4.83%	4.31%	4.37%	4.02%	4.62%	3.95%	4.53%	3.97%

Tabella 2.7 Coefficienti di variazione per le grandezze relative ai sensori delle travi 1 e 2

	C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5	C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5
σ^*_{rotX}	0.49%	0.92%	0.88%	0.74%	0.84%	0.59%	1.11%	3.52%	0.32%	0.99%
σ^*_{rotY}	0.63%	1.41%	4.47%	2.07%	8.61%	0.84%	1.41%	0.95%	361.28%	2.01%
σ^*_{temp}	20.76%	21.14%	21.24%	20.79%	21.32%	19.53%	21.49%	20.8%	21.06%	21.19%
σ^*_{umid}	4.71%	3.81%	4.05%	4.07%	4.11%	4.22%	4.43%	4.42%	4.63%	4.26%

Tabella 2.8 Coefficienti di variazione per le grandezze relative ai sensori delle travi 3 e 4

	C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5	C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
σ^*_{rotX}	1.38%	0.49%	1.26%	0.43%	2.01%	0.48%	1.42%	0.81%	0.82%	1.27%
σ^*_{rotY}	1.3%	4.45%	1.66%	1.7%	3.15%	4.01%	0.43%	0.88%	2.53%	1.89%
σ^*_{temp}	18.8%	22.64%	20.83%	20.81%	20.29%	20.61%	20.7%	21.44%	22.93%	16.39%
σ^*_{umid}	4.21%	4.35%	5.29%	4.67%	4.37%	4.54%	5.59%	5.07%	4.79%	3.3%

Tabella 2.9 Coefficienti di variazione per le grandezze relative ai sensori delle travi 5 e 6

Dai risultati tabellati, si vede immediatamente che temperatura e umidità vengono misurate con una precisione simile tra tutti i sensori poiché hanno un coefficiente di variazione che varia rispettivamente tra 18% e 23% nel caso della temperatura e tra 3% e 5% nel caso dell'umidità. Viceversa, le rotazioni sono caratterizzate da una maggiore dispersione delle misurazioni poiché il range di variazione dei rispettivi coefficienti è decisamente più ampio (mediamente tra 0.5% e 9%) addirittura con un picco di 361.28% relativo alla rotazione Y del sensore C1.4.4 nonostante quest'ultimo non contenga nessun errore macroscopico.

Tale risultato è del tutto ragionevole in quanto l'inclinometro ha una sensibilità maggiore rispetto a termometro e igrometro. Inoltre, le misurazioni dell'igrometro e del termometro sono soggette a variazioni lente di carattere stagionale ma sono scarsamente influenzate da fenomeni locali in quanto, anche se i sensori possono effettuare misurazioni diverse in funzione delle condizioni del microclima locale (i sensori installati in zone d'ombra hanno output diversi da quelli colpiti dalla radiazione solare), globalmente, le oscillazioni termo-igrometriche giornaliere sono molto simili.

Di conseguenza, tarando il parametro α in funzione del coefficiente di variazione, si individua più facilmente un errore di traslazione in un segnale di temperatura o di umidità poiché, nei segnali di rotazione, esso è maggiormente nascosto dal rumore. Infatti, se si calcola il coefficiente di variazione per il segnale di rotazione mostrato in Figura 2.7, si ottiene il risultato mostrato di seguito.

$$\sigma^*_{rot} = \left| \frac{\sigma_{rot}}{\mu_{rot}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{1.85}{21.43} \right| \cdot 100 = 8.63\% \quad (2.9)$$

Confrontando il coefficiente di variazione calcolato nell'Equazione 2.9 con quelli contenuti all'interno delle prime due righe delle Tabelle 2.7, 2.8 e 2.9, si vede immediatamente che non vi è una grande differenza tra un segnale pulito e un segnale che contiene errori di traslazione. Infatti tale differenza è effettivamente netta e tangibile soltanto se si confronta un segnale senza errori caratterizzato da scarsissimo rumore con un segnale che contiene molte traslazioni di grande ampiezza.

Dal momento che non è quindi possibile definire preliminarmente il percentile corretto, si ricerca un parametro di taratura avendo noti i risultati dell'algoritmo: in particolare, si eseguono gli algoritmi di controllo e pulizia descritti nelle Figure 2.10 e 2.12 utilizzando un parametro α che viene fatto variare tra 2 e 8 con scarto di 0.5 escludendo percentili via via decrescenti.

In Tabella 2.10 si riporta il numero di errori riscontrati nell'analisi dei segnali relativi alla rotazione X misurata dagli strumenti installati sul ponte in studio; nell'ultima riga, si riporta invece il numero di errori riscontrati nell'analisi effettuata sul segnale sporcato artificialmente mostrato in Figura 2.7.

	$\alpha = 2$	$\alpha = 2.5$	$\alpha = 3$	$\alpha = 3.5$	$\alpha = 4$	$\alpha = 4.5$	$\alpha = 5$	$\alpha = 5.5$	$\alpha = 6$	$\alpha = 6.5$	$\alpha = 7$	$\alpha = 7.5$	$\alpha = 8$
C1.1.1	816	288	150	52	12	8	2	0	0	0	0	0	0
C1.1.2	264	211	175	128	105	47	58	42	36	26	24	24	15
C1.1.3	339	208	168	116	107	93	55	40	33	33	24	17	14
C1.1.4	311	200	138	99	92	78	51	51	32	11	12	15	3
C1.1.5	451	151	46	20	4	1	0	0	0	0	0	0	0
C1.2.1	778	259	160	102	38	27	9	8	4	3	1	0	0
C1.2.2	403	271	192	141	76	61	49	41	32	27	18	15	14
C1.2.3	438	251	157	120	120	76	45	32	33	32	14	16	10
C1.2.4	478	258	151	141	108	81	70	52	38	25	16	5	6
C1.2.5	631	242	77	26	8	1	1	0	0	0	0	0	0
C1.3.1	886	203	43	10	2	1	0	0	0	0	0	0	0
C1.3.2	589	240	133	67	46	23	15	12	8	5	4	2	1
C1.3.3	471	259	153	111	79	52	43	32	19	16	8	6	3
C1.3.4	576	265	179	99	50	22	20	12	11	8	3	0	0
C1.3.5	661	211	51	17	5	1	0	0	0	0	0	0	0
C1.4.1	887	261	133	31	16	10	1	0	0	0	0	0	0
C1.4.2	362	133	59	46	34	14	7	5	4	2	2	2	1
C1.4.3	574	253	134	86	53	29	21	12	7	2	2	2	2
C1.4.4	627	192	120	55	22	17	8	3	1	2	1	0	0
C1.4.5	298	75	16	14	6	2	2	1	0	0	0	0	0
C1.5.1	676	397	120	46	13	9	3	3	1	0	0	0	0
C1.5.2	542	268	178	98	88	75	55	30	32	7	7	2	4
C1.5.3	429	222	116	86	63	31	28	15	11	8	7	5	5
C1.5.4	388	274	180	131	77	64	52	31	21	13	8	9	5
C1.5.5	633	133	30	14	9	1	0	0	0	0	0	0	0
C1.6.1	563	285	84	47	20	12	1	2	1	1	0	0	0
C1.6.2	557	256	165	96	49	55	34	22	13	7	5	2	2
C1.6.3	373	248	149	124	86	80	48	38	28	31	17	4	5
C1.6.4	365	244	184	129	76	71	54	41	20	20	12	11	8
C1.6.5	508	265	92	43	15	5	4	1	0	0	0	0	0
ERRORE	17	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Tabella 2.10 Numero di errori rilevati dall'algoritmo in funzione del parametro α scelto

Osservando i risultati, si possono trarre immediatamente due considerazioni. Si vede che gli algoritmi di controllo e pulizia funzionano correttamente se si sceglie il corretto valore del parametro α ; infatti, al crescere di quest'ultimo (e dunque con l'ampliamento dell'intervallo di accettabilità), vi è la tendenza a rilevare un minor numero di errori di traslazione. Tuttavia, in alcuni casi, per valori di α elevati, si ha un aumento di errori rilevati rispetto al percentile escluso nel tentativo precedente: questo comportamento in controtendenza è giustificato dal fatto che, al variare di α , una o più porzioni traslate possono essere rilevate come un unico errore avente lunghezza L_{tot} o come una serie di errori aventi lunghezze L_i che, sommate, danno una lunghezza L_{tot} .

In secondo luogo, si vede chiaramente che, in assenza di errori di traslazione all'interno del segnale (come nel caso dei segnali relativi al ponte in studio), il numero di errori dipenda fortemente dal percentile escluso mentre, viceversa, l'analisi del segnale che contiene effettivamente delle porzioni traslate reali porta a un numero di errori che si mantiene costante da $\alpha = 2.5$ a $\alpha = 8$.

Le medesime considerazioni possono essere fatte se si esegue la stessa analisi sui segnali relativi alle altre 3 grandezze misurate ottenuti manipolando l'andamento originale con l'inserimento di porzioni traslate come è stato fatto per il segnale di rotazione X mostrato in Figura 2.7.

In Figura 2.13, è mostrato un grafico con il numero di errori riscontrati nell'analisi dei 4 segnali manipolati in funzione del percentile scelto, il quale è stato fatto variare tra 2.5 e 20 con scarto di 0.5.

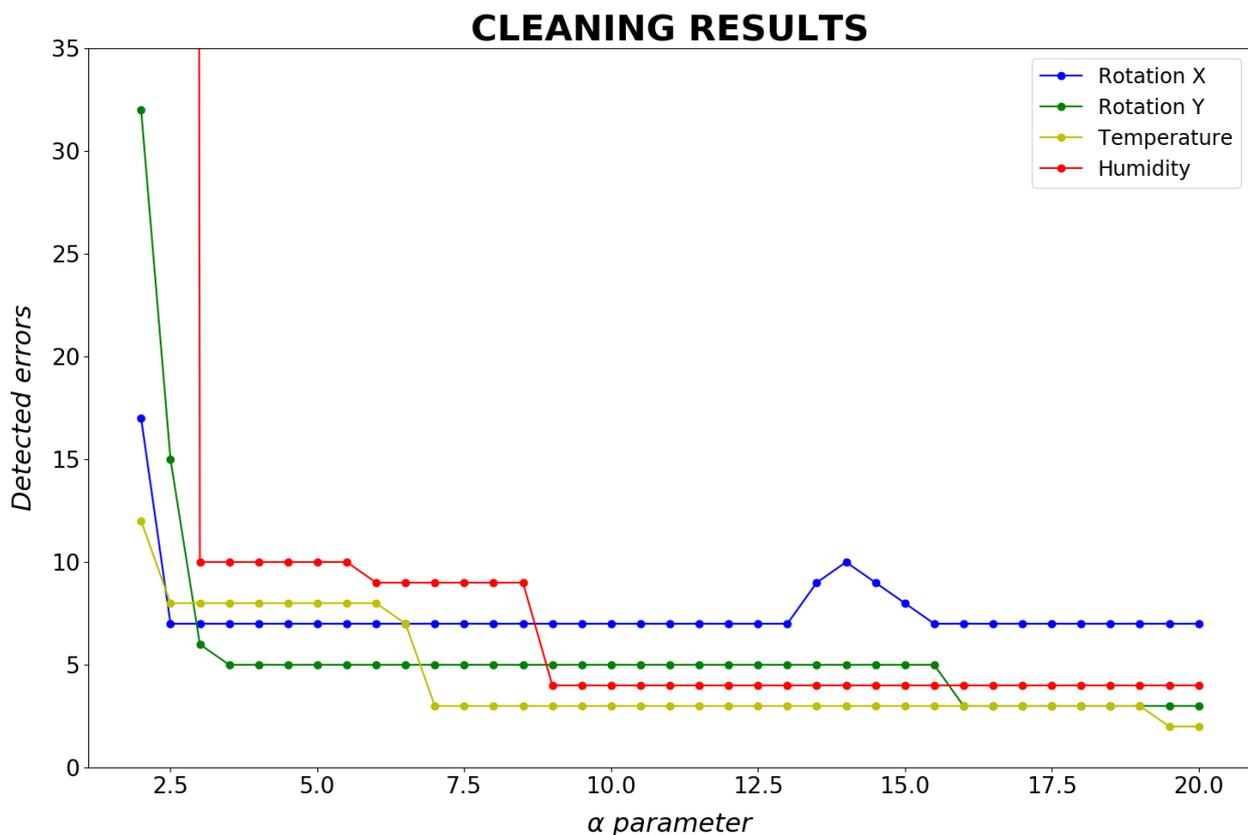


Figura 2.13 Numero di errori riscontrati nell'analisi in funzione del parametro α scelto

Osservando la Figura 2.13 si vede che, indipendentemente dalla grandezza analizzata, esso può essere suddiviso in tre regioni distintive per ognuna delle curve.

Per valori bassi di α , si ha una prima zona in cui il numero di errori dipende dal percentile scartato e vengono rilevati errori inesistenti poiché è stato scelto un intervallo di accettabilità troppo stretto.

Al termine di questa prima zona, se il segnale contiene effettivamente porzioni traslate, ne compare una seconda in cui il numero di errori trovati si mantiene costante indipendentemente dal percentile scartato: questo fenomeno è indice del fatto che gli errori rilevati sono effettivamente quelli presenti. Infine, se si considerano valori di α molto elevati, si entra in una zona in cui non si ha una tendenza ben definita. Infatti, in quest'ultima zona, si possono riscontare comportamenti molto diversi a seconda delle caratteristiche del segnale analizzato. Nel migliore dei casi il numero di errori è per lo più variabile e presenta di nuovo una dipendenza dal percentile scartato; tuttavia potrebbe anche capitare che, viceversa, esso si assesti su un valore costante caratterizzato da errori di traslazione, i quali hanno ampiezze minime e coinvolgono porzioni di segnale molto lunghe. Questa differenza di comportamento va presa in considerazione perché rappresenta un ulteriore ostacolo all'automazione del processo di pulizia.

In generale però le prime due regioni compaiono in tutte le curve graficate e l'unica differenza tra segnali relativi a grandezze differenti o tra segnali contenenti un diverso numero di errori consiste semplicemente appunto nella rispettiva ampiezza. Per questa ragione, è possibile tarare l'algoritmo di pulizia in maniera robusta eseguendo l'analisi per valori di α crescenti, ricercando il tratto di curva costante e interrompendo l'esecuzione una volta trovato. Per poter coprire in maniera soddisfacente la variabilità nell'ampiezza delle prime due regioni di grafico si lascia all'utente la scelta del valore iniziale e finale dell'intervallo in cui far variare il parametro α e del numero di output consecutivi uguali per l'interruzione dell'analisi.

Inoltre, per risolvere il problema della rilevazione di errori inesistenti per valori di α molto elevati, si utilizza il parametro già anticipato al termine del paragrafo 2.2.4 fissando un limite minimo al di sotto del quale la variabile *salto* non viene considerata come errata. In pratica, si tratta di aggiungere alle due condizioni già descritte una terza condizione che imponga di non correggere l'elemento corrente se il valore della variabile *salto* è inferiore a un valore limite definito a priori.

Effettivamente, più l'ampiezza di una traslazione è bassa, più diventa complicato capire se essa sia effettivamente dovuta ad un'anomalia nella misurazione o se invece l'acquisizione risulti corretta.

Dal momento che questo fenomeno non è controllabile a priori, si lascia all'utente la scelta dell'errore minimo rilevabile dall'algoritmo di pulizia. Ovviamente quest'ultimo non potrà conoscere a priori la combinazione ottimale dei 4 parametri che ha la possibilità modificare, ma questo è l'unico modo in cui è possibile tarare in generale gli algoritmi di rilevamento e pulizia delle porzioni di segnale traslate. Tuttavia, la parametrizzazione dell'algoritmo, per come è stata ideata, consente all'utente di avere una parte attiva nella pulizia dei propri segnali variando i parametri in modo da raggiungere la convergenza per via iterativa conoscendo, almeno in parte, i segnali con cui sta lavorando.

Questa caratteristica abbinata con la possibilità di effettuare, come mostrato nel Capitolo 1, l'analisi solo sui segnali scelti, conferisce all'algoritmo snellezza e praticità: infatti, dopo una prima analisi 'esplorativa', l'utente sarà già in grado di inserire i parametri che gli consentiranno di ottenere dei buoni risultati per la maggior parte dei suoi segnali. Successivamente, egli potrà scegliere di tenere tali risultati o di rieseguire l'analisi con vincoli più o meno restrittivi per ottenere una migliore pulizia.

Infine, l'utente potrà eseguire l'algoritmo soltanto sui segnali che hanno degli andamenti che creano problemi avendo la possibilità di analizzarli singolarmente e facendo variare 4 parametri fino al raggiungimento del grado di pulizia desiderato. Ovviamente, come mostrato nel paragrafo 2.4, al termine di ogni analisi, l'utente potrà visualizzare i risultati sia in termini numerici che in termini grafici per poter avere contezza del processo di convergenza.

In Figura 2.14, sono mostrate la seconda e la terza parte della sezione 5 di *File di input utente.txt*.

```
Inoltre, data l'iteratività dell'algoritmo di pulizia, si richiede di definire l'intervallo in cui far variare il
parametro  $\alpha$  per la ricerca del valore ottimale e il numero di risultati costanti che devono essere ottenuti per aver
raggiunto la convergenza. Inserire tali valori per ognuna delle grandezza lasciando uno spazio dopo il simbolo ':'.

Percentile_minimo_rotX_traslazioni: 2
Percentile_minimo_rotY_traslazioni: 2
Percentile_minimo_temperatura_traslazioni: 2
Percentile_minimo_umidità_traslazioni: 2

Percentile_massimo_rotX_traslazioni: 15
Percentile_massimo_rotY_traslazioni: 15
Percentile_massimo_temperatura_traslazioni: 15
Percentile_massimo_umidità_traslazioni: 15

Costanza_per_convergenza_rotX_traslazioni: 10
Costanza_per_convergenza_rotY_traslazioni: 10
Costanza_per_convergenza_temperatura_traslazioni: 10
Costanza_per_convergenza_umidità_traslazioni: 10

Infine, si richiede di impostare una soglia minima di riconoscimento degli errori per ognuna delle grandezze misurate;
dunque, in funzione della variabilità del segnale, si inseriscano i valori di traslazione (lasciando uno spazio dopo
il simbolo ':') al di sotto dei quali, l'errore non viene rilevato.

Sensibilità_traslazione_rotX[mrad]: 1
Sensibilità_traslazione_rotY[mrad]: 1
Sensibilità_traslazione_temperatura[°C]: 5
Sensibilità_traslazione_umidità[%]: 5
```

Figura 2.14 Seconda e terza parte del quinto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

Dopo aver acquisito da *File di input utente.txt* tutti i parametri di ingresso e aver passato quanto necessario al modulo secondario *errori_di_traslazione.py*, ha effettivamente inizio il processo di pulizia degli errori di traslazione, il quale viene controllato da un algoritmo che ha il compito di eseguire in automatico la taratura del parametro α .

Prima dell'inizio dell'analisi, viene creato un file di testo chiamato *file_temporaneo.csv* all'interno della directory in cui sono presenti i moduli in cui è suddiviso il codice; al suo interno vengono immediatamente salvati gli elementi contenuti all'interno del vettore *grandezza* con lo scopo di permettere una comoda reinizializzazione del segnale raw al termine di ogni tentativo di pulizia.

A questo punto, alle variabili già definite dall'utente (ovvero i percentili di partenza e di fine e il numero di output consecutivi uguali per il raggiungimento della convergenza) se ne affiancano 3 ulteriori: *errori_precedenti* (la quale, inizializzata al valore fuori scala -1, viene aggiornata alla fine di ogni tentativo e contiene il numero di errori riscontrati nel segnale), *contatore_errori* (la quale, inizializzata al valore 1, tiene il conto del numero di iterazioni consecutive che hanno riportato lo stesso output) e *percentile_corretto* (la quale, inizializzata a 'no', è una semplice stringa di controllo che serve a segnalare il raggiungimento della convergenza per permettere l'interruzione dell'analisi). Dopo aver definito e inizializzato tali variabili, l'algoritmo salva all'interno del vettore *grandezza* gli elementi acquisiti da *file_temporaneo.csv* e assegna un valore a tutte quelle variabili che devono essere reinizializzate al termine di ogni tentativo di pulizia.

Viene settata a 0 la variabile *errori* (che verrà incrementata di 1 dopo la correzione di ogni errore di traslazione) e vengono inizializzati i vettori vuoti che conterranno i parametri delle porzioni traslate: *inizi_traslazioni* e *fine_traslazioni* (nei quali verranno salvate le date relative al primo e all'ultimo elemento di ogni porzione traslata), *lunghezze* (nel quale verrà salvato il numero di misurazioni affette da ogni traslazione rilevata) e *ampiezze_traslazioni* (nel quale verrà salvata l'ampiezza di ogni traslazione rilevata). Infine, si inizializza a 0 la variabile *flag* che, come mostrato nel diagramma di flusso in Figura 2.10, serve a interrompere l'algoritmo al termine di ogni tentativo.

A questo punto, si definisce il limite assegnando il valore iniziale del parametro α e può effettivamente partire il tentativo di pulizia. Al termine di ogni iterazione dell'analisi, per prima cosa, si valuta la variabile *percentile_corretto* e, qualora abbia valore 'sì' (eventualità che si verifica se e solo se l'algoritmo ha raggiunto la convergenza), il ciclo viene interrotto restituendo il vettore *grandezza* ripulito utilizzando il parametro α dell'ultima iterazione.

In caso contrario si confronta la variabile *errori* con la variabile *errori_precedenti*: se hanno lo stesso valore, si incrementa di 1 la variabile *contatore_errori* altrimenti si riporta il contatore pari a 1 e si aggiorna la variabile *errori_precedenti* al valore relativo all'iterazione appena terminata.

Fatto ciò, i risultati relativi all'iterazione appena conclusa sono stati salvati e occorre verificare se si è raggiunta la convergenza o se è necessario procedere con l'iterazione successiva: a questo scopo, si confrontano le variabili *contatore_errori* e *errori_costanti* e, se esse risultano uguali, è stato effettivamente trovato il tratto costante di cui si è parlato in precedenza.

In questo caso, la variabile *percentile_corretto* viene aggiornata al valore 'sì' in modo da segnalare che l'iterazione successiva sarà l'ultima e, come mostrato nell'Equazione 2.10, si riporta il parametro α al primo valore relativo al tratto costante.

$$\alpha = \alpha - 0.5 \cdot (\text{errori_costanti} - 1) \quad (2.10)$$

Viceversa, in caso di mancata convergenza, si incrementa il parametro α di 0.5 e si prosegue con un nuovo tentativo (sicuramente non l'ultimo poiché la variabile *percentile_corretto* ha valore 'no').

Il ciclo di ricerca del percentile corretto prosegue in questo modo finché non viene raggiunta la convergenza oppure finché il parametro α non raggiunge il valore massimo stabilito dall'utente.

Al termine del ciclo, possono verificarsi tre diverse situazioni. Nel caso in cui non si sia raggiunta la convergenza (e dunque *percentile_corretto* abbia valore 'no') oppure nel caso si sia raggiunta ma gli errori rilevati risultano essere pari a 0, si salva il messaggio di avvenuta analisi con nessun errore rilevato e si acquisisce un'ultima volta la *grandezza raw* da *file_temporaneo.csv* così da poter restituire al blocco principale il segnale non modificato. Se invece si giunge a convergenza con un numero di errori rilevati diverso da 0, si salva il messaggio che riporta gli errori rilevati con le loro rispettive caratteristiche e si restituisce la *grandezza* modificata con l'ultima iterazione effettuata. Infine, si elimina *file_temporaneo.csv* e si esce dal blocco secondario *errori_di_traslazione.py* restituendo il vettore *grandezza* ripulito o invariato a seconda dell'esito dell'analisi.

In Figura 2.15 si riporta un diagramma di flusso che illustra dettagliatamente l'algoritmo di taratura del parametro α .

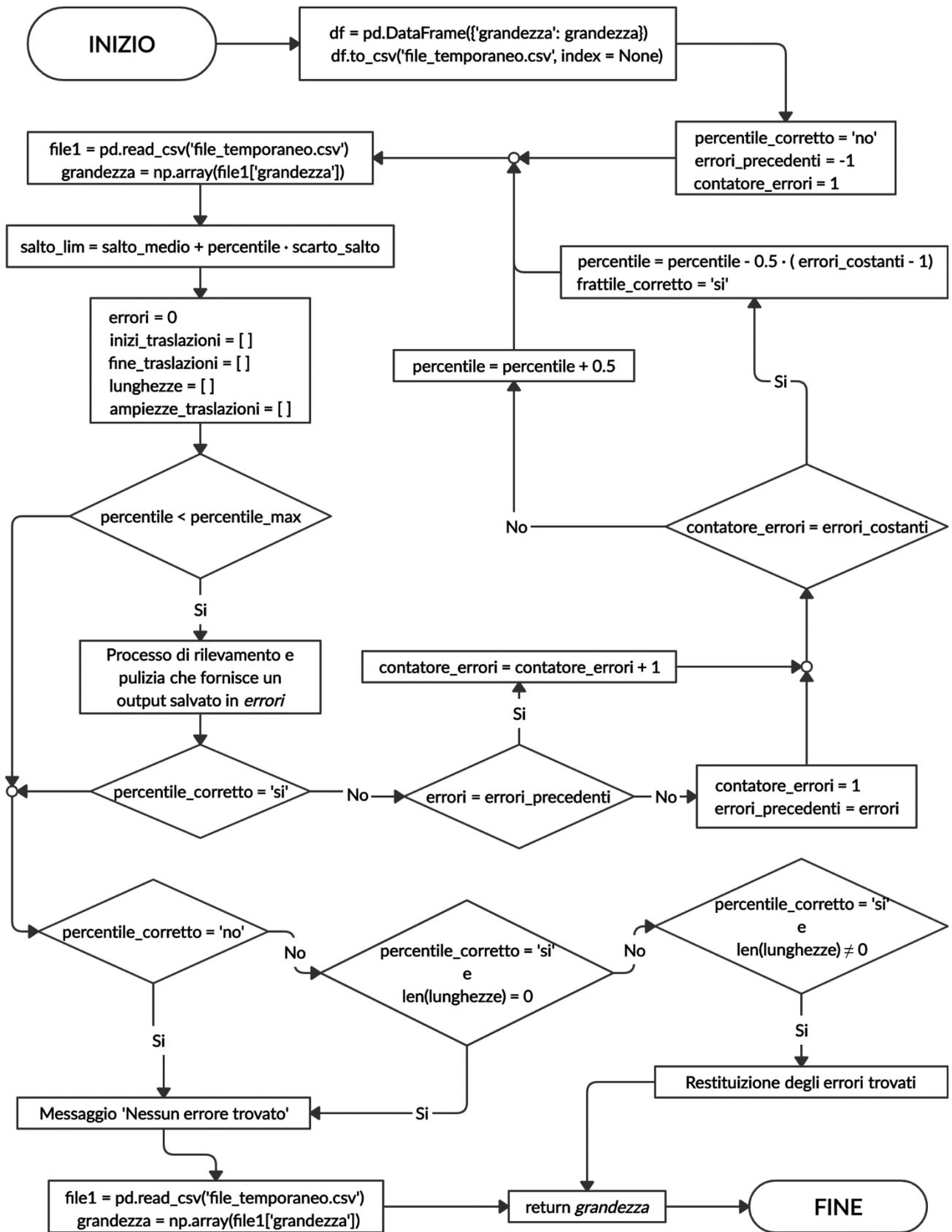


Figura 2.15 Algoritmo di ricerca del percentile corretto

2.2.6 Analisi del segnale di esempio

Dopo aver spiegato nel dettaglio gli algoritmi di rilevamento e pulizia degli errori di traslazione, si dedica l'ultimo sottoparagrafo alla descrizione e all'analisi del segnale di esempio mostrato in Figura 2.7. Come già specificato, tale segnale è stato ottenuto partendo dal segnale di rotazione X misurato dallo strumento C1.1.1 e modificandolo con l'inserimento di 5 errori di traslazione di varia natura con l'obiettivo di controllare l'efficacia dell'algoritmo di pulizia. Di seguito, si descrivono dettagliatamente tali errori di traslazione riportando tutte le rispettive caratteristiche che l'algoritmo deve essere in grado di riconoscere e di restituire (gli istanti di inizio e fine della porzione interessata dall'errore, il numero di elementi da cui quest'ultima è composta e il fattore di traslazione).

Inoltre, gli errori presenti nel segnale di esempio vengono anche mostrati nei grafici in Figura 2.16.

- **Traslazione 1:** questo errore è una traslazione singola di tipo A che coinvolge una porzione costituita da 688 elementi, la quale inizia con la misurazione acquisita in data 22 Marzo 2019 alle ore 20:45 e finisce con la misurazione acquisita in data 25 Marzo 2019 alle ore 14:01; il fattore di traslazione è pari a $k = +2$ mrad.
- **Traslazione 2:** questo errore è una traslazione singola di tipo C anticipata da 4 salti precedenti e corretta mediante 3 salti successivi, la quale coinvolge una porzione costituita da 1059 elementi che inizia con la misurazione acquisita in data 20 Aprile 2019 alle ore 13:47 e finisce con la misurazione acquisita in data 24 Aprile 2019 alle ore 19:13. Il fattore di traslazione è pari a $k = -5$ mrad.
- **Traslazione 3:** questo errore è una traslazione multipla di tipo B che coinvolge tre porzioni traslate consecutive. La prima porzione coinvolge 158 elementi, inizia con la misurazione acquisita in data 30 Marzo 2019 alle ore 10:51 e finisce con la misurazione acquisita in data 31 Marzo 2019 alle ore 1:33; il fattore di traslazione è pari a $k = +5$ mrad. La seconda porzione coinvolge 731 elementi, inizia con la misurazione acquisita in data 31 Marzo 2019 alle ore 1:39 e finisce con la misurazione acquisita in data 4 Aprile 2019 alle ore 7:31; il fattore di traslazione è pari a $k = +4$ mrad. La terza porzione coinvolge 1024 elementi, inizia con la misurazione acquisita in data 4 Aprile 2019 alle ore 7:36 e finisce con la misurazione acquisita in data 8 Aprile 2019 alle ore 11:07; il fattore di traslazione è pari a $k = +2$ mrad.
- **Traslazione 4:** questo errore è una traslazione singola di tipo A che coinvolge una porzione costituita da 969 elementi, la quale inizia con la misurazione acquisita in data 27 Aprile 2019 alle ore 21:52 e finisce con la misurazione acquisita in data 1 Maggio 2019 alle ore 19:30; il fattore di traslazione è pari a $k = +3$ mrad.
- **Traslazione 5:** questo errore è una traslazione singola di tipo A che coinvolge una porzione costituita da 580 elementi, la quale inizia con la misurazione acquisita in data 1 Giugno 2019 alle ore 22:56 e finisce con la misurazione acquisita in data 4 Giugno 2019 alle ore 12:35; il fattore di traslazione è pari a $k = -2$ mrad.

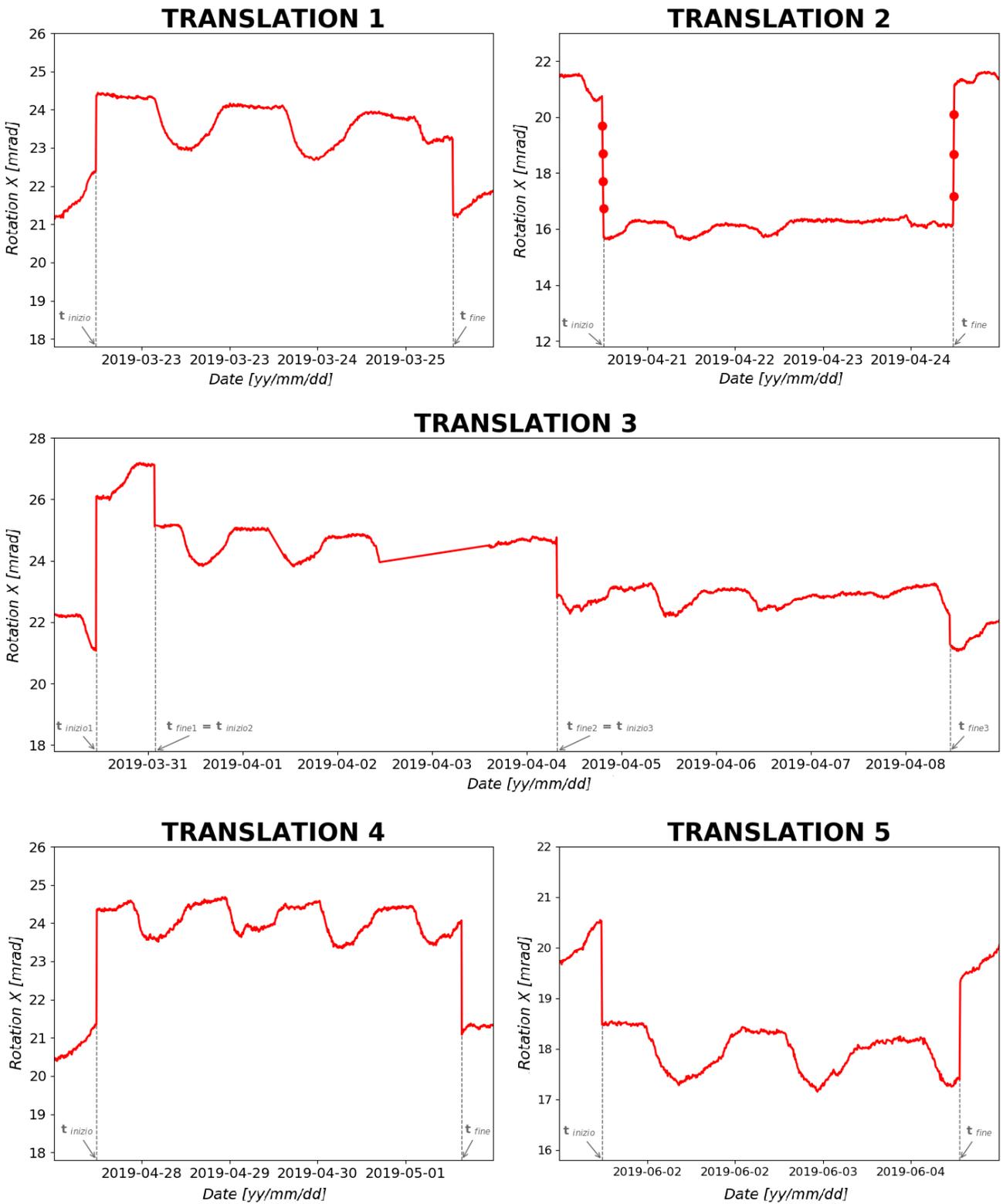


Figura 2.16 Errori di traslazioni presenti all'interno del segnale di esempio

Come mostrato in Figura 2.14, nel caso degli strumenti installati sul ponte in studio si inseriscono all'interno di *File di input utente.txt* i parametri di input in modo da eseguire l'analisi dei segnali facendo variare il parametro α all'interno dell'intervallo [2; 15], raggiungendo la convergenza con una serie di 10 output costanti e scartando dalla ricerca tutti gli errori aventi fattore di traslazione inferiore a 1 milliradiante; inoltre, il massimo intervallo temporale accettato viene fissato a 1000 secondi (ovvero, dato un tempo di campionamento medio di 5.5 minuti, ad un buco di 3 misurazioni). Eseguendo l'analisi, si raggiunge la convergenza con un valore di α pari a 2.5, viene restituito l'output mostrato in Figura 2.17 e si ottengono i risultati graficati in Figura 2.18.

```
Sono stati rilevati 7 errori di traslazione nel segnale analizzato.

ERRORE 1
Istante iniziale: 2019-03-22 20:45:44
Istante finale: 2019-03-25 14:01:38
Lunghezza tratto traslato: 688
Ampiezza traslazione : 1.98 mrad

ERRORE 2
Istante iniziale: 2019-03-30 10:51:31
Istante finale: 2019-03-31 01:33:43
Lunghezza tratto traslato: 158
Ampiezza traslazione : 5.02 mrad

ERRORE 3
Istante iniziale: 2019-03-31 01:39:12
Istante finale: 2019-04-04 07:31:01
Lunghezza tratto traslato: 731
Ampiezza traslazione : 3.02 mrad

ERRORE 4
Istante iniziale: 2019-04-04 07:36:46
Istante finale: 2019-04-08 11:07:00
Lunghezza tratto traslato: 1024
Ampiezza traslazione : 1.06 mrad

ERRORE 5
Istante iniziale: 2019-04-20 13:47:21
Istante finale: 2019-04-24 19:13:47
Lunghezza tratto traslato: 1059
Ampiezza traslazione : -5.05 mrad

ERRORE 6
Istante iniziale: 2019-04-27 21:52:18
Istante finale: 2019-05-01 19:30:18
Lunghezza tratto traslato: 969
Ampiezza traslazione : 2.99 mrad

ERRORE 7
Istante iniziale: 2019-06-01 22:56:23
Istante finale: 2019-06-04 12:35:47
Lunghezza tratto traslato: 580
Ampiezza traslazione : -2.05 mrad
```

Figura 2.17 Output dell'analisi del segnale di esempio

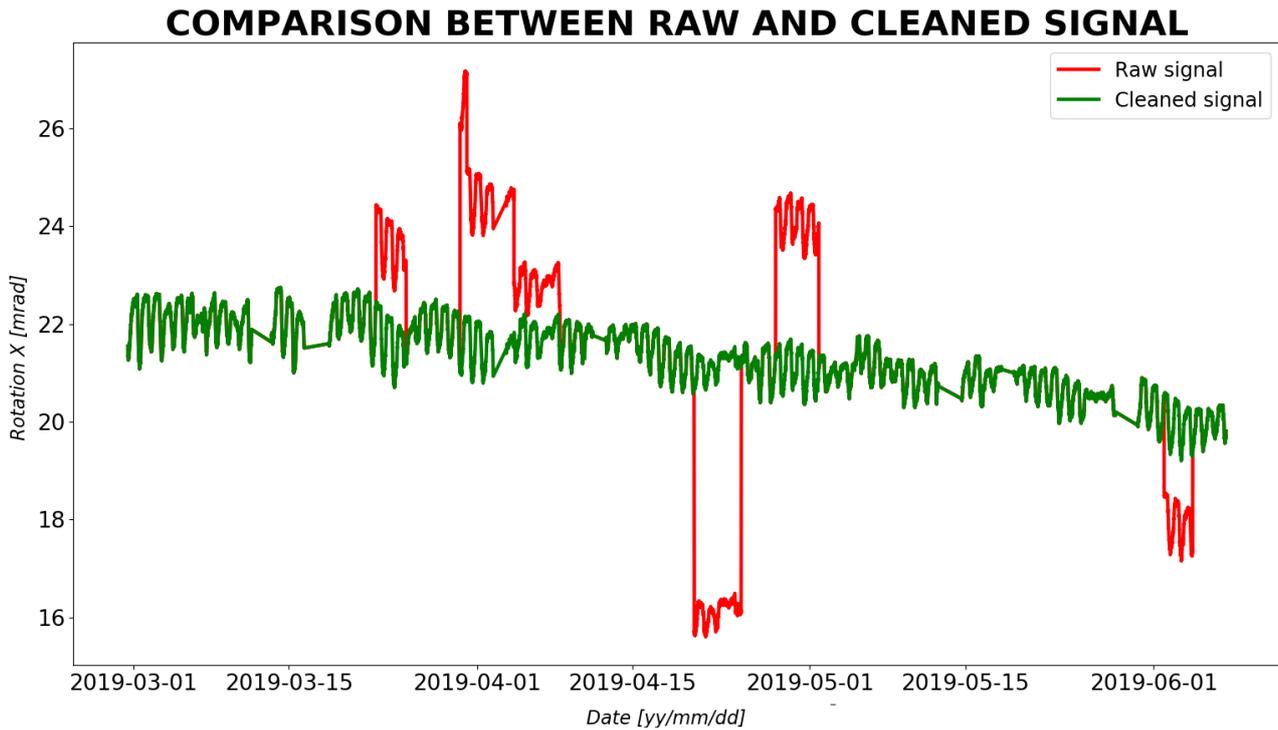


Figura 2.18 Confronto tra il segnale prima e dopo il processo di pulizia dagli errori di traslazione

2.3 Correzione dei picchi

Al termine dell'esecuzione degli algoritmi di pulizia dei segnali dalle porzioni costanti e traslate, si ottengono delle curve visibilmente più corrette; l'unica anomalia residua è la presenza di picchi ovvero di misurazioni che si distaccano dalla media per poi tornarvi all'acquisizione successiva come mostrato in Figura 2.19.

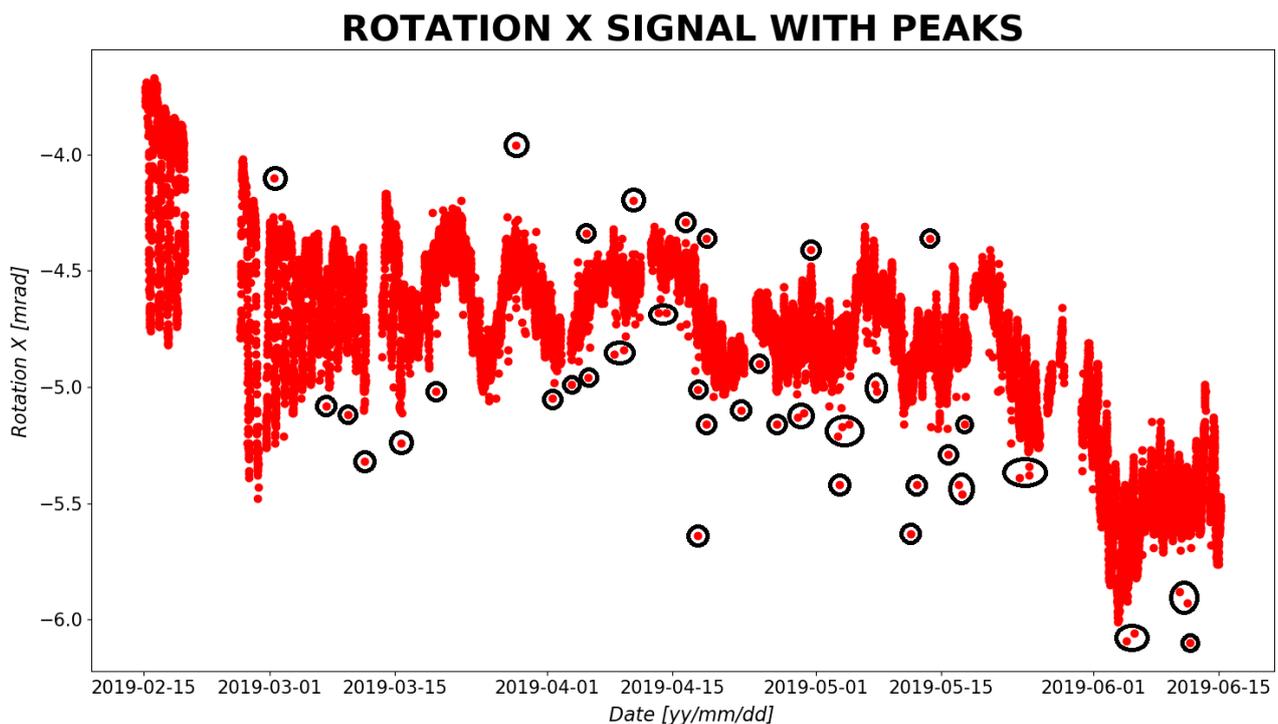


Figura 2.19 Picchi presenti nel segnale di temperatura del sensore C1.1.2

Le cause di questa tipologia di errore sono analoghe a quelle che solitamente provocano gli errori di traslazione con la differenza che, nel caso dei picchi, la problematica sparisce o viene risolta in un tempo inferiore al periodo di campionamento del sensore.

Infatti, come specificato nel paragrafo 2.2, il picco singolo può essere visto come un errore di traslazione che interessa una porzione unitaria di segnale; tuttavia, non tutti i picchi vengono rimossi insieme agli errori di traslazione poiché l'utente non ha la possibilità di spingere l'analisi ottimizzando i parametri senza inficiare i buoni risultati ottenuti nella rimozione degli errori di traslazione. Addirittura, nel caso in cui non ne venga rilevata la presenza, il segnale contiene ancora tutti i picchi presenti prima dell'esecuzione dell'algoritmo poiché, non raggiungendo la convergenza, l'algoritmo di rimozione degli errori di traslazione restituisce il segnale invariato.

Al fine di fornire all'utente una maggiore possibilità di manipolazione del segnale, si è deciso di effettuare una doppia correzione dei picchi analizzando per due volte il segnale utilizzando due criteri di riconoscimento differenti. Tuttavia, anche in questo caso, è necessario considerare la variabilità dei segnali che possono essere passati in input e dunque l'impossibilità di prevedere a priori la soluzione migliore per la pulizia. Quindi, oltre alla solita taratura del limite, l'utente ha la possibilità di scegliere se eseguire entrambi o soltanto uno dei due algoritmi.

Ovviamente, come nel caso degli errori di traslazione e dei plateau, sarà poi possibile osservare il risultato della pulizia e modificare i parametri di input e la scelta dell'esecuzione degli algoritmi per poter rendere l'analisi più precisa o più mirata per i segnali che ne hanno eventualmente necessità.

2.3.1 Richiamo della routine esterna

Come nei casi visti nei paragrafi 2.1 e 2.2, anche la pulizia dai picchi viene effettuata da una funzione all'interno di un blocco secondario; dunque, per prima cosa, si dovranno acquisire e passare in input tutti i parametri necessari al funzionamento degli algoritmi di pulizia. In particolare, la funzione che esegue la correzione dei picchi presenti si chiama *rimuovi_picchi*, è definita all'interno del blocco secondario *Picchi.py* e riceve in input i parametri di input mostrati di seguito, mediante il medesimo algoritmo utilizzato per gli errori di traslazione e mostrato in Figura 2.8.

- **grandezza**: è il vettore (in uscita dagli algoritmi per gli errori di traslazione) in cui sono salvati gli elementi del segnale relativo alla grandezza che contiene i picchi che verranno eliminati alla j-esima iterazione del ciclo (temperatura, umidità o rotazioni).
- **tempo**: è il vettore (di lunghezza pari al vettore *grandezza*) che contiene i riferimenti temporali delle misurazioni in formato Unix Timestamp; esso servirà nuovamente a valutare gli intervalli temporali che intercorrono tra le misurazioni.
- **algoritmo_1** e **algoritmo_2**: sono le due stringhe di controllo che governano l'esecuzione dei due algoritmi di pulizia della grandezza relativa alla j-esimo iterazione del ciclo in funzione delle scelte dell'utente; esse possono avere valore 'sì' o 'no'.

- **Δt_{max}** : è il massimo intervallo temporale accettato all'interno del segnale; questa variabile tiene in conto i buchi nel segnale dovuti alla precedente cancellazione dei plateau.
- **valori_mediati**: è il numero di elementi di cui effettuare la media mobile necessaria al controllo del segnale da parte del secondo algoritmo.
- **percentile_1** e **percentile_2**: sono le due variabili che contengono i percentili scartati dall'utente per il controllo del segnale da parte dei due algoritmi.

Come mostrato in Figura 2.20, si crea una sesta parte di *File di input utente.txt* nella quale verrà richiesto, per ognuna delle grandezze misurate dai sensori, quale algoritmo di pulizia si vuole eseguire, su quanti elementi di segnale deve essere effettuata la media mobile per il secondo algoritmo e quali percentili devono essere scartati.

```

(6) CORREZIONE PICCHI (6)

Sono dati i seguenti due algoritmi di rilevazione dei picchi:
1-Algoritmo degli scarti
2-Algoritmo della media mobile

Si richiede di segnalare quale algoritmo si deve eseguire per ognuna delle grandezze in gioco inserendo (lasciando uno
spazio dal simbolo ':' e lasciando la parola 'fine' dopo nudo spazio) un 'si' o un 'no' dopo le voci riportate di seguito.

Algoritmo_1_rotX: sì fine
Algoritmo_1_rotY: sì fine
Algoritmo_1_temperatura: sì fine
Algoritmo_1_umidità: sì fine

Algoritmo_2_rotX: sì fine
Algoritmo_2_rotY: sì fine
Algoritmo_2_temperatura: sì fine
Algoritmo_2_umidità: sì fine

Al fine di tarare gli algoritmi 1 e 2, date le etichette scritte sotto e relative ai parametri da inserire, modificare
lasciando un unico spazio dopo il simbolo ':' e inserire il valore desiderato; si ricorda che si sta facendo
riferimento al parametro  $\alpha$  presente nella seguente formulazione:


$$\mu = \sigma + \alpha \cdot \text{sqm}$$


Di seguito sono riportati alcuni percentili noti ma è possibile inserire il valore che si desidera:

68,3 % = P{  $\mu - 1,00 \sigma < X < \mu + 1,00 \sigma$  }
95,0 % = P{  $\mu - 1,96 \sigma < X < \mu + 1,96 \sigma$  }
95,5 % = P{  $\mu - 2,00 \sigma < X < \mu + 2,00 \sigma$  }
99,0 % = P{  $\mu - 2,58 \sigma < X < \mu + 2,58 \sigma$  }
99,7 % = P{  $\mu - 3,00 \sigma < X < \mu + 3,00 \sigma$  }

Percentile_rotX_algoritmo_1: 4
Percentile_rotY_algoritmo_1: 4
Percentile_temperatura_algoritmo_1: 4
Percentile_umidità_algoritmo_1: 4

Percentile_rotX_algoritmo_2: 4
Percentile_rotY_algoritmo_2: 4
Percentile_temperatura_algoritmo_2: 4
Percentile_umidità_algoritmo_2: 4

Infine, per completare la taratura dell'algoritmo 2, si richiede di indicare il numero di elementi di cui si vuole
effettuare la media mobile; come al solito, inserire il valore desiderato lasciando un unico spazio dopo il simbolo ':'.

numero_valori_mediati_rotX: 100
numero_valori_mediati_rotY: 100
numero_valori_mediati_temperatura: 100
numero_valori_mediati_umidità: 100

```

Figura 2.20 Sesto gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

2.3.2 Algoritmo 1

Il primo algoritmo presente all'interno della funzione *rimuovi_picchi* è una semplice estensione dell'algoritmo di rimozione degli errori di traslazione poiché il criterio per valutare la correttezza del generico elemento del segnale è il medesimo. Infatti esso consiste nel correggere tutti gli elementi del segnale che presentano uno scarto eccessivo rispetto al valore precedente con la restrizione che l'elemento successivo torni a essere accettabile poiché, viceversa, non si potrebbe parlare di picco. Dunque, preliminarmente, viene eseguita una statistica sugli scarti tra tutte le coppie di elementi successivi degli scarti come mostrato per gli errori di traslazione in Figura 2.9 e, a partire dalla media e dallo scarto quadratico medio calcolati e dal valore del parametro α scelto dall'utente, si definisce lo scarto limite come scritto nell'Equazione 2.6.

A questo punto può partire l'algoritmo di pulizia il quale consiste essenzialmente in un ciclo che spazza il segnale per tutta la sua lunghezza, calcolando per il generico i -esimo elemento i due scarti *salto_precedente* e *salto_successivo* come mostrato nelle Equazioni 2.11 e 2.12.

$$\text{salto_precedente} = \text{grandezza}[i] - \text{grandezza}[i-1] \quad (2.11)$$

$$\text{salto_successivo} = \text{grandezza}[i+1] - \text{grandezza}[i-1] \quad (2.12)$$

L' i -esimo elemento del segnale è considerato un picco da correggere se e solo se la variabile *salto_precedente* supera il limite calcolato e la variabile *salto_successivo* non lo supera. Tuttavia, come nel caso degli errori di traslazione, il criterio di controllo è semplicemente fondato sullo scarto tra due elementi successivi del vettore *grandezza* e non è quindi sufficientemente robusto nei confronti delle interruzioni dovute alla rimozione di tutti gli elementi che erano parte di un plateau. Per rendere tale criterio completamente efficace è sufficiente avere l'accortezza di tralasciare il picco se l'intervallo temporale tra le misurazioni i e $i-1$ risulta superiore a quello indicato dall'utente.

Se tutte queste condizioni vengono soddisfatte, ci si trova effettivamente in presenza di un picco e l' i -esimo elemento viene dunque corretto come mostrato nell'Equazione 2.13.

$$\text{grandezza}[i] = \frac{\text{grandezza}[i-1] + \text{grandezza}[i+1]}{2} \quad (2.13)$$

Ogni volta che un elemento viene corretto, si incrementa la variabile *picchi* (inizializzata pari a zero) e, al termine del ciclo, essa conterrà il numero di outliers rilevati all'interno del segnale analizzato.

Ovviamente, il valore dell' i -esimo elemento dopo la correzione non può essere quello che avrebbe assunto qualora non fosse avvenuto il disturbo poiché quest'ultimo è impossibile da ricostruire.

Tuttavia, nel monitoraggio dei movimenti della struttura (nel caso specifico in termini di rotazione) non è tanto importante il valore assoluto che la grandezza assume in un dato istante quanto invece il suo confronto con i valori precedenti e successivi per valutare se sono avvenuti movimenti anomali. Infatti, a differenza del caso dei tratti di plateau, nei quali si ha un gran numero di misurazioni sbagliate incognite e l'unico rimedio possibile è l'eliminazione degli elementi che non hanno nessuna valenza, nel caso dei picchi, si ha un unico elemento che si discosta da un andamento medio il quale, dopo la correzione degli errori di traslazione, dovrebbe coincidere per i valori precedenti e successivi.

L'ipotesi di far assumere a tale elemento un valore medio tra il precedente e il successivo può essere buona anche se non sarà l'unica e, a seconda del caso specifico, nemmeno la migliore.

In Figura 2.21, si riporta un diagramma di flusso che descrive nel dettaglio il primo algoritmo di pulizia.

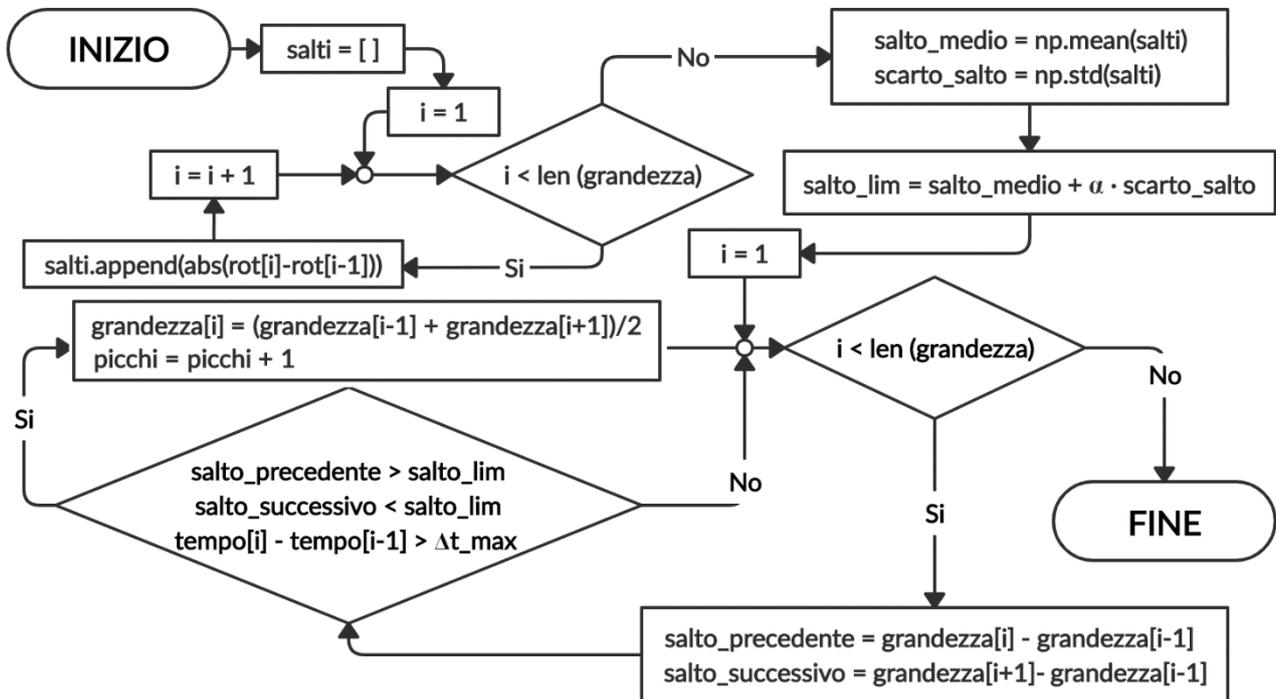


Figura 2.21 Algoritmo 1 di pulizia dei picchi

2.3.3 Algoritmo 2

Il secondo algoritmo presente all'interno della funzione *rimuovi_picchi* è meno sensibile agli effetti locali presenti all'interno del segnale poiché la verifica del valore errato non è fondata sullo scarto rispetto al valore precedente ma sullo scarto rispetto alla media di un certo numero di valori precedenti a scelta dell'utente.

Infatti, mediando su una porzione di segnale, si smorza l'effetto di eventuali valori che si discostano, anche in maniera non eccessivamente marcata, dall'andamento medio consentendo eventualmente di utilizzare un parametro α minore (e dunque imponendo un vincolo più stringente) e di trascurare l'effetto dell'interruzione dei segnali dovuto alla precedente rimozione dei plateau.

Una volta acquisito e salvato nella variabile n_val il numero di elementi del segnale da includere nella media mobile, si esegue un'analisi preliminare calcolando e salvando all'interno del vettore *scarti*, a partire dal primo elemento preceduto da n_val elementi, lo scarto tra l' i -esimo elemento e la media degli n_val elementi precedenti. Al termine, si calcolano la media e lo scarto quadratico medio di tale distribuzione e li si combina come mostrato nell'Equazione 2.6 definendo così lo scarto limite.

Successivamente, si verifica la presenza dei picchi con questo nuovo criterio correggendo gli elementi del segnale tali che il loro scarto rispetto alla media mobile sia maggiore del limite definito e tali che il rispettivo elemento successivo abbia uno scarto che sia invece inferiore al medesimo limite.

Se l'*i*-esimo elemento del segnale rispetta entrambe le condizioni, esso verrà corretto coerentemente con l'algoritmo 1 come mostrato nell'equazione 2.13; come nel caso precedente, ad ogni correzione effettuata, si incrementa il contatore *picchi*, il quale, a seconda della scelta dell'utente, parte avendo inizialmente valore pari a 0 oppure pari al numero di picchi trovati dall'algoritmo 1.

Infine, quando le ultime iterazioni del ciclo vengono completate e si giunge a fine segnale, si esegue lo stesso algoritmo di pulizia analizzando in ordine inverso i primi *n_val* elementi del segnale (precedentemente saltati) e calcolando in questo caso la media mobile sugli *n_val* elementi successivi, i quali, qualora fossero stati errati, ora risultano corretti. Ovviamente, per i primi *n_val* elementi, gli scarti *salto_precedente* e *salto_successivo* hanno segno opposto rispetto al calcolo riportato nell'Equazione 2.13 poiché l'algoritmo li sta analizzando in ordine inverso. In questo modo, il segnale verrà corretto nella sua interezza. In Figura 2.27, si riporta il diagramma di flusso che descrive nel dettaglio il secondo algoritmo di pulizia.

Al termine della pulizia, si salverà sul file di resoconto della pulizia il numero di picchi riscontrati e corretti per ognuna delle grandezze analizzate segnalando, per ogni segnale, quali algoritmi sono stati eseguiti o, nel caso non sia stata effettuata l'analisi (eventualità possibile nel caso in cui l'utente assegni valore 'no' alle variabili *algoritmo_1* e *algoritmo_2*), il messaggio di mancata pulizia. Nelle Tabelle 2.11, 2.12 e 2.13, si riportano i risultati della pulizia per i segnali relativi al ponte in studio.

	C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5	C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5
Rotazione X	9	163	129	111	10	40	79	109	105	5
Rotazione Y	45	17	32	18	42	58	17	16	27	49
Temperatura	2	0	6	13	12	6	32	4	16	23
Umidità	5	6	7	6	6	13	9	6	16	14

Tabella 2.11 Picchi rilevati e corretti all'interno dei segnali relativi ai sensori delle travi 1 e 2

	C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5	C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5
Rotazione X	3	44	77	49	5	20	37	48	38	8
Rotazione Y	67	40	9	17	27	72	16	38	25	24
Temperatura	7	9	14	7	29	10	6	35	23	45
Umidità	20	15	14	9	7	38	8	17	12	13

Tabella 2.12 Picchi rilevati e corretti all'interno dei segnali relativi ai sensori delle travi 3 e 4

	C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5	C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
Rotazione X	17	88	62	89	2	17	67	109	78	51
Rotazione Y	22	10	18	10	7	35	13	16	26	6
Temperatura	43	11	18	20	43	0	0	35	28	2
Umidità	24	14	15	24	18	20	31	39	28	5

Tabella 2.13 Picchi rilevati e corretti all'interno dei segnali relativi ai sensori delle travi 5 e 6

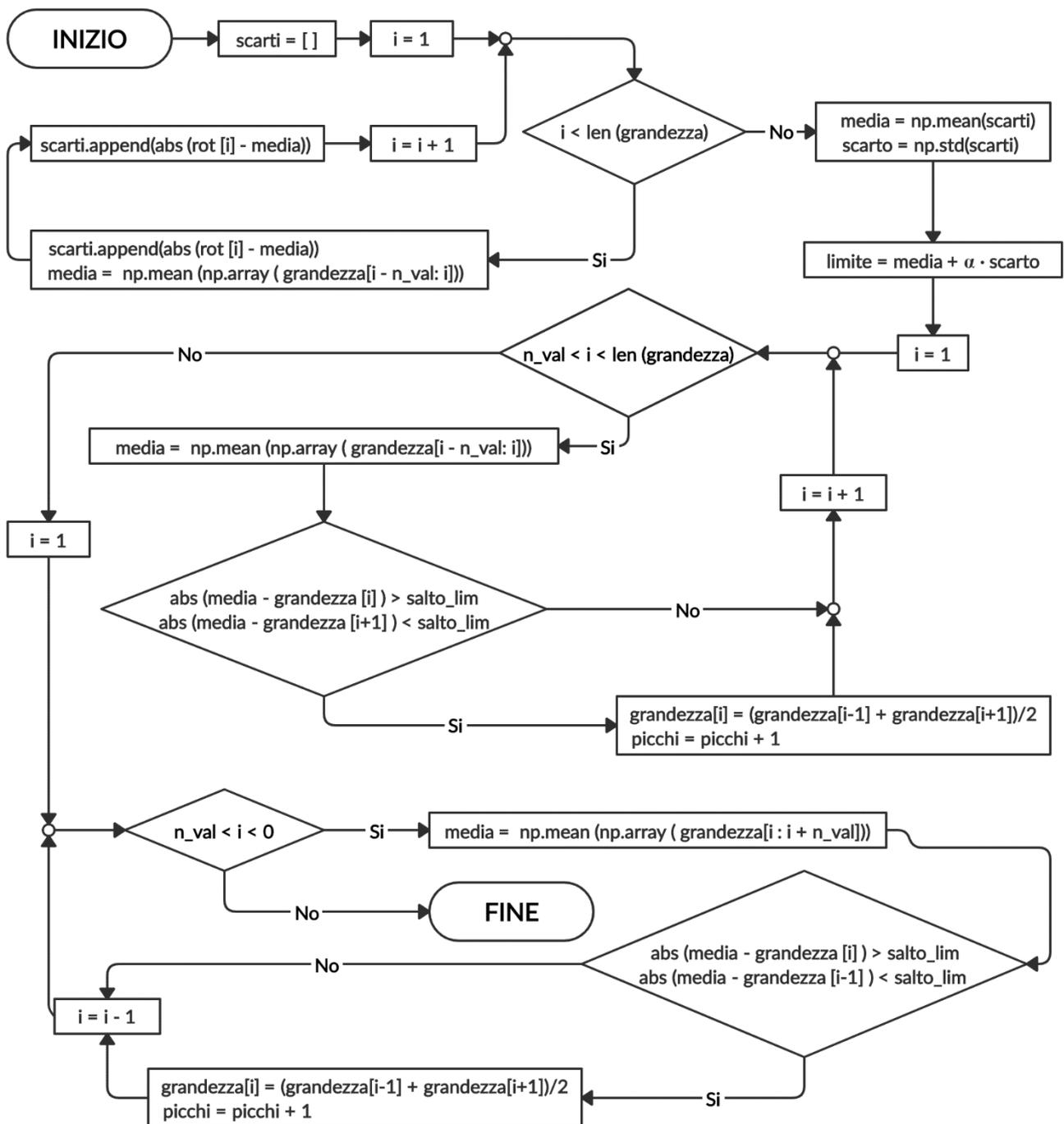


Figura 2.22 Algoritmo 2 di pulizia dei picchi

Anche per l'algoritmo 2, valgono le stesse considerazioni fatte per l'algoritmo 1: la correzione degli elementi errati mediante la media tra l'elemento precedente e l'elemento successivo, anche se non completamente precisa, può considerarsi una buona ipotesi e consente di ottenere dei buoni risultati. In Figura 2.23, si riporta un grafico che pone il segnale di rotazione X misurato dallo strumento C1.1.2 a confronto con se stesso al termine dell'esecuzione di entrambi gli algoritmi di pulizia tarati, come mostrato in Figura 2.20, in entrambi i casi con un parametro α pari a 4.

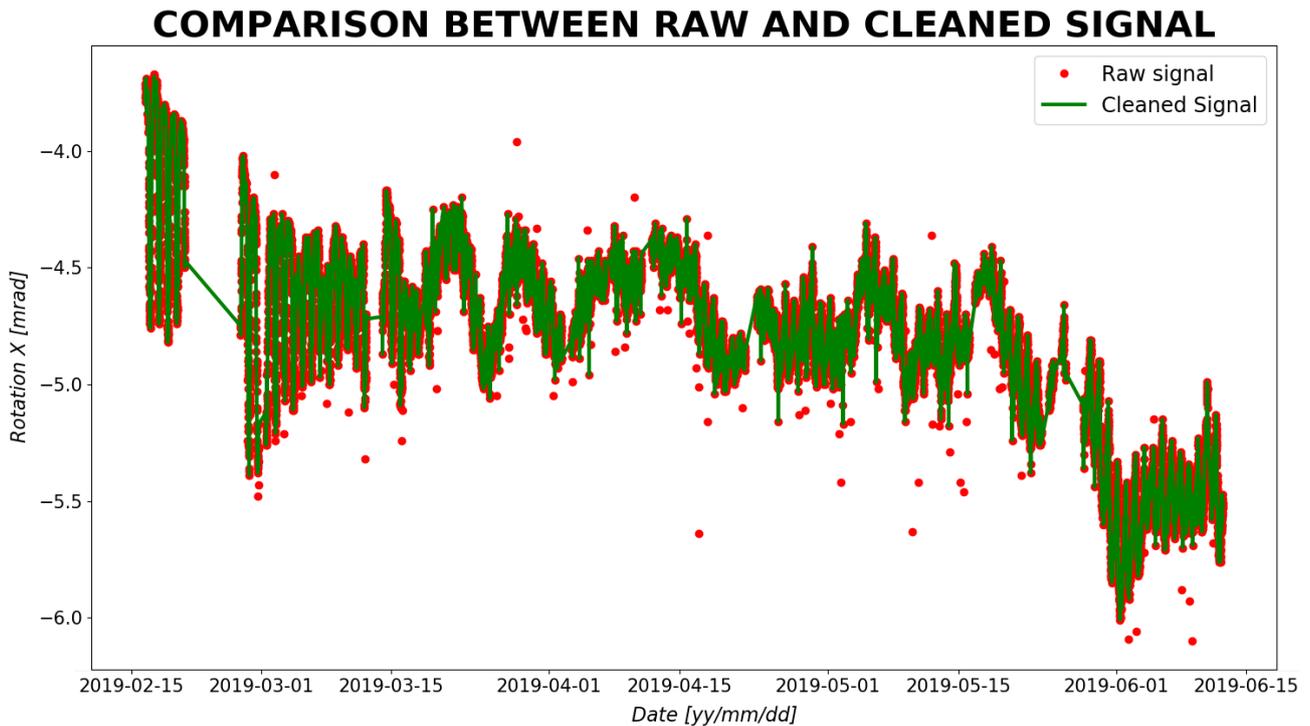


Figura 2.23 Confronto tra il segnale prima e dopo il processo di pulizia dai picchi

2.4 Salvataggio e visualizzazione dei risultati

Il codice di calcolo deve consentire all'utente di visualizzare i risultati dopo ogni operazione di pulizia nonché al termine di tutti gli algoritmi; infatti, data la forte dipendenza dai parametri di input, l'utente deve avere la possibilità di controllare l'effetto dei parametri scelti su ogni algoritmo di pulizia e, una volta effettuata la corretta taratura, dovrà poter maneggiare agevolmente il segnale corretto.

A questo scopo, il codice prevede il salvataggio e la visualizzazione sia dei risultati parziali sia dei risultati finali in forma grafica e in forma numerica.

2.4.1 Confronto tra grafici

Il codice crea alcune directory per il salvataggio dei grafici a partire dall'acquisizione dei percorsi delle cartelle che contengono i file csv di partenza; in questo modo, ognuno dei sensori segnalati all'interno di *file di input utente.txt* avrà tali cartelle dedicate.

All'interno della cartella relativa ad ogni sensore, viene creata una sottocartella chiamata *nome del sensore_Immagine di output* in cui saranno salvati tutti i grafici relativi a tale sensore. In particolare, nella fase di pulizia, vengono create due ulteriori sottocartelle che si chiamano rispettivamente 0) *Confronto segnali per taratura parametri* e 1) *Dati Ripuliti*.

Nella prima cartella, sono inseriti i risultati parziali ovvero quei grafici che, tramite la sovrapposizione del segnale prima e dopo l'esecuzione degli algoritmi, consentono all'utente di visualizzare l'effetto della scelta dei parametri sulla pulizia del segnale; tali grafici vengono salvati al termine di ogni algoritmo di pulizia e sono dunque divisi nelle tre sottocartelle: 1) *Correzione PLATEAU*, 2) *Correzione ERRORI DI TRASLAZIONE* e 3) *Correzione PICCHI*.

Qualora lo desideri, l'utente ha la possibilità di definire la scala dell'asse delle ascisse; in questo modo, se necessario, è possibile visualizzare su tali grafici un eventuale arco temporale di interesse.

A questo scopo, all'interno di *File di input utente.txt* è stata predisposta una sezione aggiuntiva nella quale inserire, come mostrato in Figura 2.24, i riferimenti temporali iniziale e finale dell'intervallo desiderato in Formato Unix Timestamp.

```
(7) VISUALIZZAZIONE RISULTATI PARZIALI (7)

Il codice di calcolo prevede il salvataggio di un grafico di confronto per ognuna delle grandezze al termine dei singoli algoritmi di pulizia; in questa sezione, si richiede di inserire in formato Unix Timestamp (secondi), l'istante iniziale e l'istante finale dell'arco temporale che si vuole graficare nel caso ci sia la necessità di visualizzare una particolare zona di grafico. Si inserisca come al solito il parametro richiesto dopo ogni etichetta lasciando uno spazio dopo il simbolo ':'; qualora questo non fosse necessario e si volesse visualizzare l'intero periodo di monitoraggio, si inserisca il riferimento temporale della prima e dell'ultima misura effettuata. Di seguito, è riportato una data di esempio espressa in formato Unix timestamp utilizzando i secondi.
(04/01/2001 16:15 --> 978621300 secondi)

Inizio_ascisse_plateau: 1550188813
Fine_ascisse_plateau: 1560556681

Inizio_ascisse_errori_di_traslazione: 1550188813
Fine_ascisse_errori_di_traslazione: 1560556681

Inizio_ascisse_picchi: 1550485200 1550188813
Fine_ascisse_picchi: 1559650800 1560556681
```

Figura 2.24 Settimo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

Nelle Figure 2.25, 2.26 sono invece mostrati due esempi dei grafici di confronto dopo l'esecuzione di ogni singolo algoritmo di pulizia; non viene riportato il grafico di confronto per gli errori di traslazione poiché i segnali relativi al ponte in studio ne sono privi.

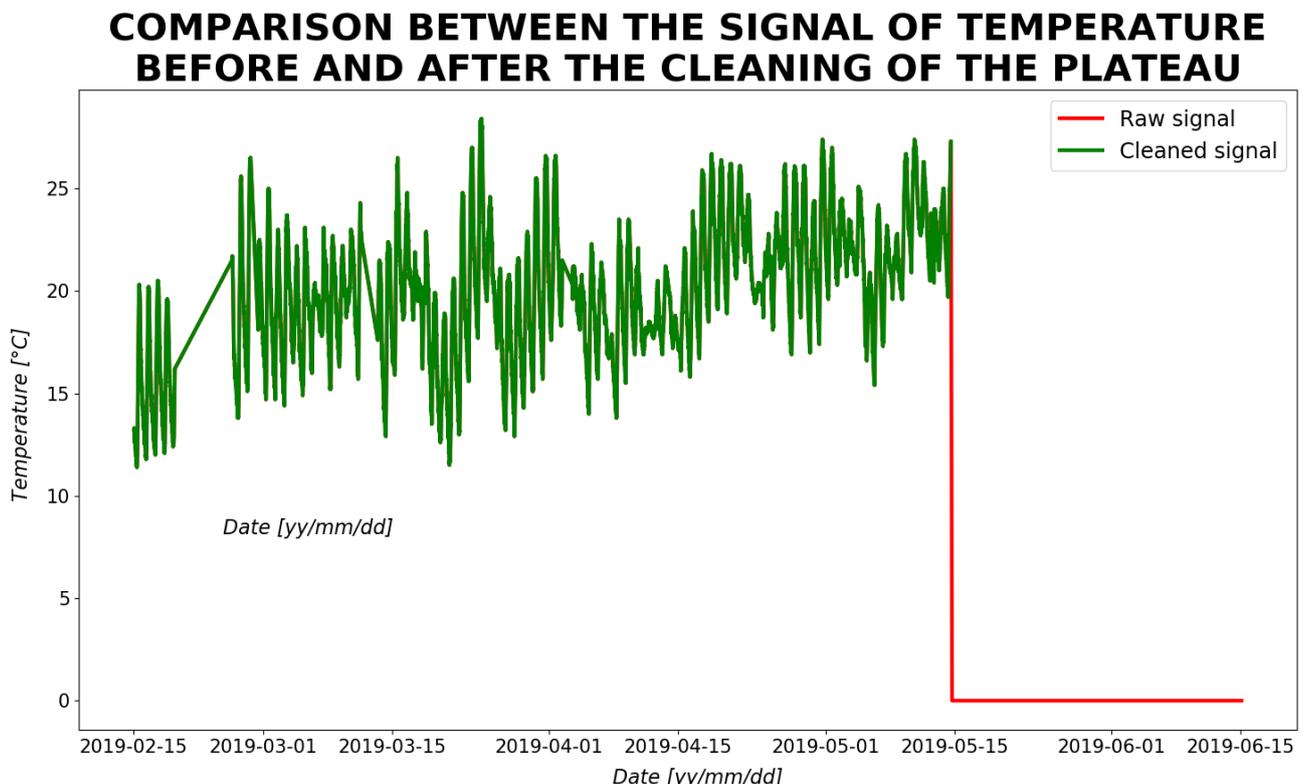


Figura 2.25 Segnale di temperatura del sensore C1.6.5 prima e dopo la pulizia dei plateau

COMPARISON BETWEEN THE SIGNAL OF HUMIDITY BEFORE AND AFTER THE CLEANING OF THE PEAKS

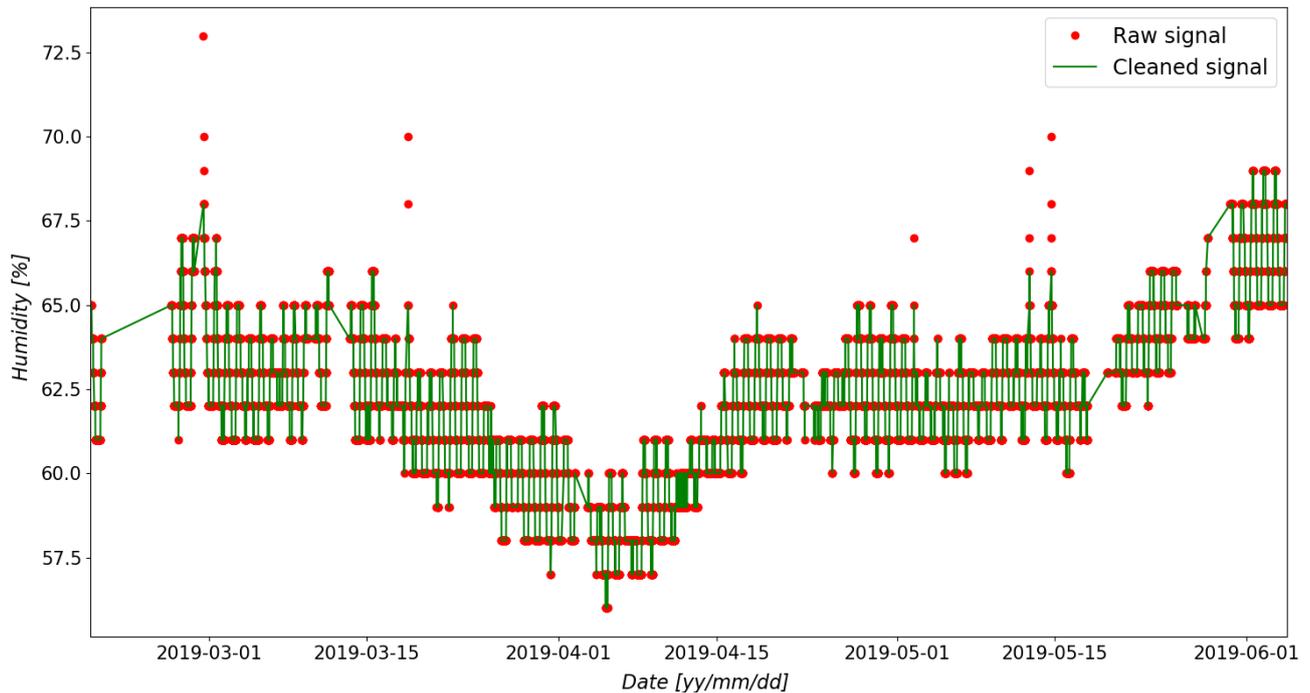


Figura 2.26 Segnale di umidità del sensore C1.2.1 prima e dopo la pulizia dei picchi

Dopo aver tarato correttamente tutti i parametri degli algoritmi di pulizia, l'utente ha la possibilità di visualizzare i risultati finali all'interno della cartella 1) *Dati Ripuliti*. Quest'ultima è destinata proprio al salvataggio dei grafici che mostrano a confronto i dati prima e dopo l'esecuzione di tutti gli algoritmi di pulizia e contiene i segnali relativi alle 4 grandezze misurate sul ponte in studio.

Per questi grafici, l'utente ha la possibilità di scegliere i parametri di formattazione per la resa grafica: in particolare, si potranno decidere le dimensioni del grafico, del titolo, delle etichette degli assi e dei valori numerici degli assi, lo spessore di linea della curva e soprattutto l'inizio e la fine dell'asse delle ascisse (che permettono nuovamente all'utente di stabilire la finestra temporale che vuole visualizzare). A questo scopo si è predisposta una sezione di *File di input utente.txt* per l'inserimento di tali parametri come mostrato in Figura 2.27. Inoltre, in Figura 2.28 è mostrato il grafico finale relativo alla rotazione X del sensore C1.1.2.

```
(3) PARAMETRI PER GRAFICI (3)

Dati i parametri scritti di seguito, lasciare un unico spazio dopo il simbolo ':' e inserire il valore desiderato; in ogni caso, si suggerisce di lasciare i valori già presenti in quanto già ben ottimizzati.

Altezza_grafico: 15
Larghezza_grafico: 30
Dimensione_titolo: 30
Dimensioni_etichette_assi: 22
Distanza_etichette_da_asse: 12
Dimensioni_valori_numerici_assi: 19
Spessore_di_linea_della_curva: 2
Inizio_ascisse_tipoA: 1550000000
Fine_ascisse_tipoA: 1560745495
Inizio_ascisse_tipoB: 1550471000
Fine_ascisse_tipoB: 1559655000
```

Figura 2.27 Terzo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

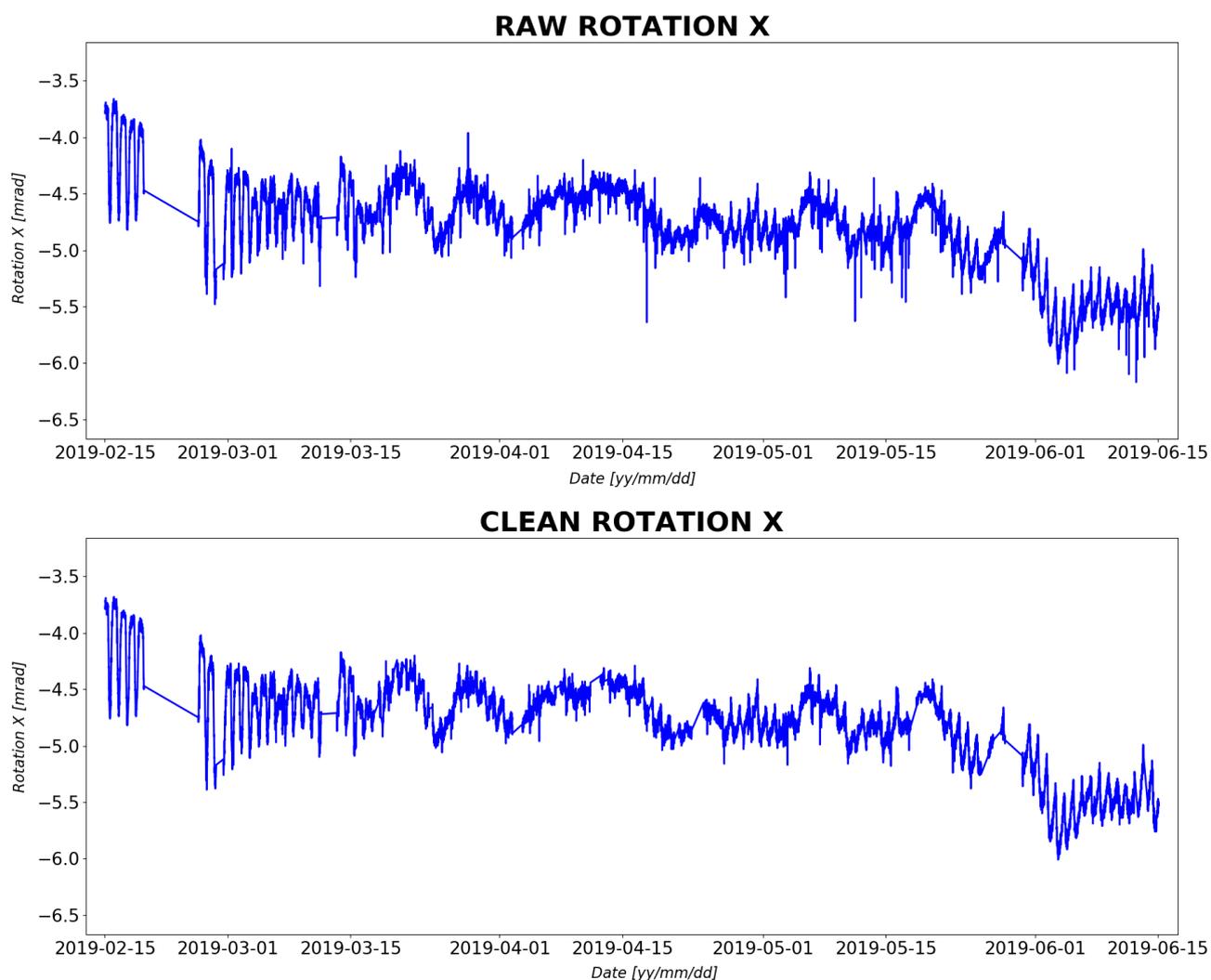


Figura 2.28 Confronto finale tra il segnale di rotazione X del sensore C1.1.2 prima e dopo la pulizia

2.4.2 File di testo

Al termine dell'analisi, il codice di calcolo prevede il salvataggio dei risultati anche in forma numerica: in particolare, per ognuno dei sensori analizzati, verranno salvati due tipi di file di testo posizionati rispettivamente nelle cartelle in cui sono presenti i file da cui è avvenuta l'acquisizione iniziale.

La prima tipologia di file ha formato csv, layout identico al file di output dello strumento e riporta i segnali dopo ognuna delle modifiche effettuate. Dunque, in particolare, il codice creerà all'interno della directory dedicata ad ogni sensore una sottocartella chiamata *nome_sensore_Segnali modificati*, la quale, al termine degli algoritmi di pulizia conterrà i seguenti 4 file di testo: 0) *nome_sensore_raw.csv* (che conterrà un file identico a quello di input con la differenza di avere il riferimento temporale in secondi), 1) *nome_sensore_pulito da plateau.csv* (che conterrà i segnali dopo la rimozione delle porzioni di segnale costanti), 2) *nome_sensore_pulito da plateau e errori di traslazione.csv* (che conterrà i segnali dopo la rimozione delle porzioni di segnale costanti e traslate) e 2) *nome_sensore_pulito da plateau, errori di traslazione e picchi.csv* (che conterrà i segnali dopo il termine del processo di correzione degli errori).

Questo salvataggio ha lo scopo di controllo dei risultati poichè permetterà all'utente di poter estrarre e utilizzare esternamente i segnali misurati dopo ogni singola modifica. Inoltre, la possibilità di avere i segnali dopo ogni fase in un'unica directory faciliterà la loro acquisizione nell'ultima parte del codice. Il secondo tipo di file si chiama *resoconto pulizia sensore_nome sensore.txt* e contiene un riepilogo di tutte le modifiche effettuate durante la pulizia: in particolare, per ognuna delle grandezze misurate, sono riportati il numero di elementi rimossi dal segnale perché parte dei plateau nonché la lunghezza del segnale prima e dopo la rimozione, gli errori di traslazioni riscontrati e corretti con le rispettive caratteristiche (istanti iniziale e finale, ampiezza di traslazione e lunghezza della porzione) e il numero di picchi corretti (con l'indicazione di quali algoritmi sono stati eseguiti). Tale file è invece salvato direttamente all'interno della cartella relativa al sensore. In Figura 2.29, si riporta il file di riepilogo di pulizia relativo al sensore C1.1.1. Dato che i segnali relativi al ponte in studio sono privi di errori di traslazione, nella sezione dedicata, sarà riportato soltanto il messaggio di mancata correzione; un esempio di output relativo a un segnale che contiene errori di traslazione è invece riportato nel paragrafo 2.2 in Figura 2.17.

```
--> Lunghezza dei segnali raw: 26121

RIMOZIONE DEI PLATEAU
Valori rimossi in temperatura: 4366
Valori rimossi in umidità: 553
Valori rimossi in rotazione X: 311
Valori rimossi in rotazione Y: 475

--> Lunghezza dei segnali dopo la rimozione dei plateau: 20416

CORREZIONE DEGLI ERRORI DI TRASLAZIONE
Trovati e corretti 0 errori di traslazione in temperatura
Trovati e corretti 0 errori di traslazione in umidità
Trovati e corretti 0 errori di traslazione in rotazione X
Trovati e corretti 0 errori di traslazione in rotazione Y

CORREZIONE DEI PICCHI
Trovati e corretti 2 picchi in temperatura eseguendo gli algoritmi 1 e 2
Trovati e corretti 5 picchi in umidità eseguendo gli algoritmi 1 e 2
Trovati e corretti 9 picchi in rotazione X eseguendo gli algoritmi 1 e 2
Trovati e corretti 45 picchi in rotazione Y eseguendo gli algoritmi 1 e 2
```

Figura 2.29 File 'resoconto pulizia sensore C1.1.1'

Capitolo 3

Analisi dei segnali

Al termine dell'esecuzione degli algoritmi di pulizia, i segnali di output degli strumenti hanno raggiunto un buon grado di pulizia ed è dunque possibile procedere con la loro analisi.

In particolare, in questo capitolo, vengono descritti gli algoritmi che hanno lo scopo di rimuovere, ove presente, l'influenza delle condizioni atmosferiche sui segnali di rotazione misurati dagli inclinometri. Infatti, le variazioni termo-igrometriche locali possono influenzare la misurazione sia a causa della deriva dei sensori sia a causa delle deformazioni indotte sull'impalcato.

E' quindi necessario smorzare tali effetti per ottenere di segnali di rotazione affetti il meno possibile da questi fenomeni, che non devono creare allarme.

3.1 Rimozione delle derive strumentali

Gli algoritmi di svincolamento dagli effetti delle condizioni termo-igrometriche consistono in una serie di operazioni statistiche sui segnali di output dei sensori inclinometrici, le quali vengono effettuate da alcune funzioni presenti all'interno del modulo secondario *Statistica.py*.

In particolare, sono definite le funzioni *calcoli_rotazioni* (per ricavare le serie di medie mobili relative ai segnali di rotazione X e di rotazione Y in tutte le fasi dell'algoritmo), *calcoli_temp_umidA* (per ricavare le serie di medie mobili relative ai segnali di temperatura e di umidità), *correlazione* (per calcolare i coefficienti di correlazione tra le serie di rotazione e le serie di temperatura o di umidità), *deriva_istantanea* (per calcolare il parametro di deriva termica o igrometrica istantanea per la correzione dei segnali di rotazione X e Y) e *deriva_differita* (per calcolare il parametro di deriva termica o igrometrica differita per la correzione dei segnali di rotazione X e Y).

3.1.1 Medie mobili sulle rotazioni grezze

La funzione *calcoli_rotazioni*, contenuta nel modulo secondario *Statistica.py*, riceve in input il segnale di cui calcola le serie di medie mobili e il numero di elementi su cui effettuare tali medie mobili.

In generale, il numero di elementi da mediare non è un valore fisso ma varia da strumento a strumento poiché dipende dal tempo di campionamento; si farà quindi riferimento ad un intervallo di tempo che può cambiare a seconda della strumentazione con la quale si effettua il monitoraggio.

Al fine di generalizzare il processo, come mostrato in Figura 3.1, si richiede all'utente di inserire all'interno di *File di input utente.txt* gli intervalli di tempo su cui effettuare le medie mobili.

```

(8) DATI PER MEDIE MOBILI (8)

In questa sezione, si richiede di inserire i dati relativi al calcolo delle medie mobili e, in particolare, i 3
intervalli su cui andare a effettuarla e il tempo di campionamento dello strumento in secondi (il quale deve essere
un sottomultiplo degli intervalli inseriti).

intervallo1[s]: 8400
intervallo2[s]: 10800
intervallo3[s]: 13200
tempo_campionamento[s]: 300

```

Figura 3.1 Immagine dell'ottavo gruppo di dati di 'File di input utente.txt'

Nel caso in studio, i sensori hanno un tempo di campionamento di circa 5 minuti e si è scelto di effettuare la media mobile su tre intervalli di tempo pari rispettivamente a 2 ore e 20 minuti, 3 ore e 3 ore e 40 minuti ottenendo dunque tre diverse serie da quella di partenza. Tali intervalli temporali, inseriti in secondi, vengono trasformati nel numero di elementi dividendo per il tempo di campionamento e poi passati alla funzione *calcoli_rotazioni* nella quale, per il generico elemento i del segnale, viene calcolato, per ognuno degli intervalli inseriti dall'utente, il numero di elementi precedenti e il numero di elementi successivi che vengono inclusi nella media.

Di seguito, si riporta il calcolo del numero di elementi da mediare precedenti (n_{sx}) e successivi (n_{dx}) al generico elemento di segnale in funzione dell'intervallo Δt e del tempo di campionamento t_c inseriti dall'utente nel file di input. In particolare, se il numero totale di elementi da mediare è pari, si fa riferimento alle Equazioni 3.1 e 3.2 mentre, se dispari, si fa riferimento alle Equazioni 3.3 e 3.4.

$$n_{sx}^{pari} = \frac{n_{tot}^{pari}}{2} = \frac{\Delta t}{2t_c} \quad (3.1)$$

$$n_{dx}^{pari} = \frac{n_{tot}^{pari}}{2} + 1 = \frac{\Delta t}{2t_c} + 1 \quad (3.2)$$

$$n_{sx}^{dispari} = \frac{n_{tot}^{dispari}}{2} - 0.5 = \frac{\Delta t}{2t_c} - 0.5 \quad (3.3)$$

$$n_{dx}^{dispari} = \frac{n_{tot}^{dispari}}{2} + 0.5 = \frac{\Delta t}{2t_c} + 0.5 \quad (3.4)$$

Partendo dai tre intervalli inseriti, le medie mobili vengono effettuate rispettivamente su 29, 37 e 45 elementi centrando la media mobile sull' i -esimo elemento e includendo rispettivamente 14, 18 e 22 misurazioni precedenti e 15, 19 e 23 misurazioni successive. Dopo aver definito il numero di elementi su cui effettuare le medie mobili, la funzione *calcoli_rotazioni* calcola le tre serie di medie mobili ($mr1$, $mr2$ e $mr3$) e poi, eseguendo la differenza tra il segnale di partenza e il segnale costituito dalle medie mobili sul secondo intervallo scelto, calcola una quarta serie di rotazione ($diff_mr2$).

Per far sì che tali segnali abbiano uguale lunghezza, si effettua il calcolo delle medie mobili a partire dal primo elemento a essere preceduto da n_{sx} elementi e si inseriscono a inizio segnale n_{sx} elementi di tipo Nan (acronimo di 'Not A Number') così da poter immediatamente di conoscere i valori da non considerare nel calcolo all'interno dei passaggi successivi.

Al termine dei calcoli, la funzione restituisce al blocco principale *main.py* le 4 serie $mr1$, $mr2$, $mr3$ e $diff_mr2$ insieme a media (rot_med) e scarto quadratico medio (sqm) del segnale originale e allo scarto quadratico medio sqm_diff del segnale $diff_mr2$.

3.1.2 Medie mobili su temperatura e umidità

Di seguito, vengono eseguite le medesime operazioni per i segnali di temperatura e umidità attraverso la funzione *calcoli_temp_umidA*.

In particolare, a partire dalla serie di temperatura o umidità fornita in input dal modulo principale *main.py*, si ricavano 28 segnali calcolando dapprima le 4 serie di medie mobili rispettivamente su 60 (*mt12* o *mu12*), 80 (*mt16* o *mu16*), 100 (*mt20* o *mu20*) e 120 (*mt24* o *mu24*) minuti antecedenti l'istante relativo alla generica misurazione considerata (ovvero, nel caso in studio, avendo un tempo di campionamento di 5 minuti, su un numero di elementi pari rispettivamente a 12, 16, 20 e 24). Infine, si ricavano le 24 serie rimanenti (*mt24_r1* o *mu24_r1*, *mt24_r2* o *mu24_r2*, *mt24_r3* o *mu24_r3*, ..., *mt24_r22* o *mu24_r22*, *mt24_r23* o *mu24_r23*, *mt24_r24* o *mu24_r24*) eseguendo una media su 120 minuti precedenti (24 valori) con un ritardo variabile da 1 a 24 ore con salto di 1 ora. Nelle Equazioni 3.5, 3.6, 3.7, a partire da un segnale di temperatura *temp*, si riporta il calcolo per le 3 serie senza ritardo mentre nell'Equazione 3.8, si riporta il calcolo della generica serie ottenuta mediando su 120 minuti con un generico ritardo di *n* ore rispetto all'*i*-esimo elemento del segnale (per *n* è pari a 0, si ottiene la quarta serie senza ritardo *mt24*).

$$mt12_i = \frac{\sum_{k=-12}^{-1} temp[i-k]}{12} \quad (3.5)$$

$$mt16_i = \frac{\sum_{k=-16}^{-1} temp[i-k]}{16} \quad (3.6)$$

$$mt20_i = \frac{\sum_{k=-20}^{-1} temp[i-k]}{20} \quad (3.7)$$

$$mt24-rn_i = \frac{\sum_{k=-24}^{-1} temp[i-k-n]}{24} \quad (3.8)$$

Analogamente al calcolo delle serie di rotazione, tali formulazioni vengono applicate a partire dal primo elemento preceduto da *k+n* elementi dove *k* è il numero elementi coinvolti nella media mobile e *n* sono le ore di ritardo. Al fine di ottenere lunghezze uguali, mediante la funzione *concatenate* si unisce il vettore risultante da tale calcolo con un vettore contenente *k+n* elementi Nan.

Come si può intuire dal nome della funzione, esistono due funzioni diverse a seconda della tipologia di strumento installata sul ponte da monitorare poiché, in funzione del tempo di campionamento del sensore, si dovrà effettuare una media su un diverso numero di elementi. Inoltre, nel caso dei sensori installati sul ponte in studio, tali operazioni devono essere eseguite sia per la temperatura sia per l'umidità per rimuovere l'influenza di entrambe le grandezze.

Dopo aver effettuato il calcolo, la funzione *calcoli_temp_umidA* restituisce al modulo principale *main.py* le 28 serie ricavate dal segnale relativo alla grandezza rispetto al quale l'algoritmo deve effettuare la scorrelazione.

3.1.3 Calcolo dei coefficienti di correlazione

Si procede quindi a valutare le correlazioni esistenti tra i 4 segnali di rotazione (1 istantaneo e 3 mediati) e i 29 segnali di temperatura e di umidità (1 istantaneo e 28 mediati).

In particolare, si esegue il calcolo del coefficiente di correlazione lineare di Pearson ρ_{xy} che, come mostrato nell'Equazione 3.9, date due qualsiasi variabili statistiche x e y , è espresso come il rapporto tra la covarianza σ_{xy} tra le due variabili e il prodotto delle rispettive deviazioni standard σ_x e σ_y .

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} = \frac{\sum (x - x_M) \cdot (y - y_M)}{\sqrt{\sum (x - x_M)^2 \cdot \sum (y - y_M)^2}} \quad (3.9)$$

Dove x_M e y_M sono i valori medi delle distribuzioni statistiche delle variabili x e y .

Considerando una delle serie calcolate per i segnali di rotazione X (o Y) e una delle serie calcolate per i segnali di temperatura (o di umidità), il coefficiente di correlazione indica se è presente tra esse una relazione di linearità. In particolare, esso può assumere valori compresi nell'intervallo $[-1; 1]$ dove il valore $+1$ corrisponde alla perfetta correlazione lineare positiva ($y = kx$), il valore 0 corrisponde alla totale assenza di correlazione lineare (ovvero le due serie sono totalmente indipendenti l'una dall'altra) e il valore -1 corrisponde alla perfetta correlazione lineare negativa ($y = -kx$).

In questa prima fase di analisi delle rotazioni grezze, sono stati calcolati i coefficienti di correlazione tra le 4 serie di rotazione X o Y (il segnale delle rotazioni istantanee *rot* e i segnali *mr1*, *mr2*, *mr3* delle stesse rotazioni con le medie mobili centrate su 29, 37 e 45 elementi) e le 5 serie di temperatura o di umidità (il segnale istantaneo *temp* o *umid* e i segnali della medesima grandezza ottenuti eseguendo le medie mobili su 60, 80, 100 e 120 minuti precedenti ogni i -esima acquisizione).

Il calcolo dei coefficienti di correlazione viene effettuato dalla funzione *correlazione* presente all'interno del modulo secondario *statistica.py*. Nelle Tabelle 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 sono riportati i coefficienti di correlazione calcolati tra i 4 segnali di rotazioni X e Y e i 5 segnali di temperatura e di umidità misurati per tutti i sensori installati sulla campata monitorata.

Dai risultati riportati nelle tabelle, si vede che i coefficienti di correlazione sono perlopiù negativi e che vi è una correlazione decisamente elevata tra le serie di rotazione e le serie di temperatura e una correlazione media o bassa tra le serie di rotazione e le serie di umidità per tutti i sensori analizzati.

Tale comportamento indica che le misurazioni sono fortemente influenzate dalle variazioni termiche e scarsamente influenzate dalle variazioni igrometriche. Probabilmente, il medesimo fenomeno sarebbe presente anche su scala stagionale ma, avendo a disposizione soltanto i dati del monitoraggio su 4 mesi, è possibile unicamente supporlo in virtù del grande effetto delle oscillazioni giornaliere.

Questa correlazione si mantiene simile per tutte le serie di rotazione anche se si può notare una leggera tendenza a crescere aumentando l'intervallo di tempo su cui si eseguono le medie mobili poiché la dipendenza è forte e risulta essere più marcata rimuovendo gli effetti istantanei del traffico. Inoltre, è chiaramente visibile la tendenza dei coefficienti di correlazione ad assumere valori più elevati in valore assoluto nel caso delle correlazioni con le serie delle temperature istantanee. Questo risultato suggerisce che l'influenza delle variazioni termiche sia prevalentemente dovuta all'effetto sulla strumentazione piuttosto che ad un effetto sulla struttura.

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.1.1	rotX	-0.914	-0.887	-0.877	-0.867	-0.858	-0.194	-0.123	-0.101	-0.080	-0.060
	mr1X	-0.914	-0.889	-0.880	-0.871	-0.862	-0.193	-0.125	-0.105	-0.084	-0.064
	mr2X	-0.914	-0.890	-0.881	-0.873	-0.864	-0.192	-0.126	-0.106	-0.086	-0.067
	mr3X	-0.913	-0.890	-0.882	-0.874	-0.865	-0.192	-0.128	-0.108	-0.088	-0.070
C1.1.2	rotX	-0.891	-0.889	-0.887	-0.886	-0.884	0.140	0.161	0.164	0.166	0.167
	mr1X	-0.895	-0.894	-0.893	-0.892	-0.890	0.141	0.161	0.164	0.167	0.169
	mr2X	-0.894	-0.894	-0.894	-0.892	-0.891	0.139	0.158	0.162	0.165	0.167
	mr3X	-0.894	-0.894	-0.894	-0.893	-0.892	0.136	0.155	0.159	0.162	0.164
C1.1.3	rotX	-0.928	-0.912	-0.907	-0.902	-0.897	0.224	0.273	0.284	0.293	0.300
	mr1X	-0.929	-0.917	-0.913	-0.908	-0.904	0.243	0.285	0.296	0.305	0.313
	mr2X	-0.929	-0.918	-0.914	-0.910	-0.905	0.246	0.286	0.297	0.306	0.314
	mr3X	-0.928	-0.918	-0.914	-0.910	-0.906	0.248	0.287	0.297	0.306	0.314
C1.1.4	rotX	-0.436	-0.384	-0.365	-0.346	-0.326	-0.610	-0.573	-0.558	-0.541	-0.525
	mr1X	-0.437	-0.390	-0.372	-0.354	-0.335	-0.620	-0.588	-0.574	-0.559	-0.543
	mr2X	-0.434	-0.390	-0.373	-0.355	-0.336	-0.618	-0.588	-0.575	-0.561	-0.546
	mr3X	-0.432	-0.388	-0.372	-0.355	-0.337	-0.616	-0.588	-0.576	-0.563	-0.549
C1.1.5	rotX	-0.988	-0.977	-0.973	-0.967	-0.962	-0.225	-0.182	-0.176	-0.172	-0.170
	mr1X	-0.984	-0.978	-0.975	-0.970	-0.965	-0.237	-0.208	-0.202	-0.197	-0.194
	mr2X	-0.982	-0.977	-0.974	-0.970	-0.966	-0.244	-0.217	-0.212	-0.207	-0.204
	mr3X	-0.979	-0.976	-0.973	-0.970	-0.966	-0.252	-0.227	-0.222	-0.217	-0.214
C1.2.1	rotX	-0.982	-0.976	-0.973	-0.970	-0.966	-0.003	0.010	0.012	0.012	0.012
	mr1X	-0.983	-0.978	-0.976	-0.973	-0.969	-0.008	0.004	0.006	0.008	0.008
	mr2X	-0.982	-0.978	-0.976	-0.973	-0.969	-0.011	0.001	0.003	0.004	0.005
	mr3X	-0.981	-0.977	-0.975	-0.972	-0.969	-0.015	-0.003	-0.001	0.001	0.002
C1.2.2	rotX	-0.944	-0.917	-0.907	-0.896	-0.885	-0.317	-0.259	-0.240	-0.220	-0.200
	mr1X	-0.946	-0.922	-0.913	-0.903	-0.892	-0.312	-0.260	-0.242	-0.223	-0.203
	mr2X	-0.947	-0.924	-0.915	-0.905	-0.895	-0.309	-0.259	-0.241	-0.222	-0.203
	mr3X	-0.948	-0.926	-0.917	-0.908	-0.898	-0.306	-0.257	-0.240	-0.222	-0.203
C1.2.3	rotX	-0.937	-0.908	-0.896	-0.884	-0.871	-0.509	-0.462	-0.445	-0.428	-0.410
	mr1X	-0.942	-0.915	-0.904	-0.893	-0.881	-0.520	-0.477	-0.461	-0.444	-0.426
	mr2X	-0.943	-0.917	-0.907	-0.896	-0.884	-0.521	-0.479	-0.464	-0.447	-0.430
	mr3X	-0.945	-0.920	-0.910	-0.899	-0.888	-0.521	-0.481	-0.466	-0.450	-0.433
C1.2.4	rotX	-0.773	-0.730	-0.714	-0.697	-0.679	-0.595	-0.552	-0.536	-0.519	-0.501
	mr1X	-0.781	-0.742	-0.727	-0.711	-0.694	-0.607	-0.569	-0.554	-0.538	-0.521
	mr2X	-0.784	-0.747	-0.732	-0.716	-0.700	-0.609	-0.573	-0.558	-0.542	-0.526
	mr3X	-0.787	-0.751	-0.737	-0.722	-0.706	-0.610	-0.576	-0.562	-0.547	-0.531
C1.2.5	rotX	-0.672	-0.643	-0.630	-0.617	-0.602	-0.469	-0.461	-0.455	-0.447	-0.439
	mr1X	-0.673	-0.650	-0.639	-0.626	-0.612	-0.470	-0.466	-0.460	-0.454	-0.446
	mr2X	-0.673	-0.652	-0.642	-0.630	-0.616	-0.469	-0.466	-0.461	-0.455	-0.448
	mr3X	-0.674	-0.654	-0.644	-0.633	-0.620	-0.468	-0.466	-0.462	-0.456	-0.450

Tabella 3.1 Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 1 e 2

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.3.1	rotX	-0.945	-0.918	-0.908	-0.898	-0.888	-0.283	-0.216	-0.195	-0.173	-0.151
	mr1X	-0.950	-0.926	-0.917	-0.908	-0.898	-0.289	-0.227	-0.205	-0.183	-0.161
	mr2X	-0.952	-0.928	-0.920	-0.911	-0.902	-0.287	-0.226	-0.206	-0.184	-0.163
	mr3X	-0.953	-0.930	-0.922	-0.914	-0.905	-0.284	-0.226	-0.206	-0.185	-0.164
C1.3.2	rotX	-0.939	-0.908	-0.897	-0.884	-0.872	-0.449	-0.396	-0.379	-0.362	-0.344
	mr1X	-0.941	-0.914	-0.903	-0.891	-0.879	-0.457	-0.409	-0.392	-0.375	-0.358
	mr2X	-0.942	-0.915	-0.905	-0.894	-0.882	-0.458	-0.411	-0.394	-0.378	-0.361
	mr3X	-0.942	-0.917	-0.907	-0.896	-0.885	-0.457	-0.412	-0.397	-0.381	-0.364
C1.3.3	rotX	-0.911	-0.877	-0.865	-0.851	-0.836	-0.693	-0.660	-0.646	-0.632	-0.617
	mr1X	-0.915	-0.887	-0.875	-0.863	-0.849	-0.703	-0.676	-0.664	-0.651	-0.637
	mr2X	-0.917	-0.890	-0.879	-0.867	-0.854	-0.703	-0.679	-0.667	-0.655	-0.642
	mr3X	-0.918	-0.893	-0.883	-0.871	-0.859	-0.702	-0.680	-0.669	-0.658	-0.646
C1.3.4	rotX	-0.985	-0.974	-0.970	-0.965	-0.960	-0.265	-0.227	-0.221	-0.216	-0.212
	mr1X	-0.985	-0.980	-0.976	-0.972	-0.967	-0.289	-0.273	-0.267	-0.261	-0.257
	mr2X	-0.984	-0.980	-0.976	-0.973	-0.968	-0.293	-0.280	-0.275	-0.270	-0.265
	mr3X	-0.983	-0.979	-0.976	-0.973	-0.969	-0.297	-0.286	-0.282	-0.278	-0.273
C1.3.5	rotX	-0.966	-0.939	-0.929	-0.918	-0.908	-0.327	-0.252	-0.230	-0.208	-0.187
	mr1X	-0.968	-0.946	-0.937	-0.928	-0.918	-0.334	-0.271	-0.249	-0.227	-0.205
	mr2X	-0.968	-0.948	-0.940	-0.931	-0.922	-0.335	-0.274	-0.253	-0.232	-0.210
	mr3X	-0.968	-0.949	-0.942	-0.934	-0.925	-0.336	-0.277	-0.257	-0.237	-0.216
C1.4.1	rotX	-0.949	-0.939	-0.935	-0.931	-0.926	0.275	0.303	0.309	0.314	0.318
	mr1X	-0.950	-0.942	-0.939	-0.935	-0.931	0.290	0.315	0.321	0.326	0.330
	mr2X	-0.950	-0.942	-0.939	-0.936	-0.932	0.293	0.317	0.323	0.328	0.332
	mr3X	-0.949	-0.942	-0.939	-0.936	-0.933	0.295	0.319	0.325	0.329	0.333
C1.4.2	rotX	-0.926	-0.944	-0.948	-0.951	-0.954	0.462	0.442	0.428	0.412	0.395
	mr1X	-0.925	-0.943	-0.947	-0.951	-0.954	0.500	0.469	0.455	0.439	0.423
	mr2X	-0.924	-0.941	-0.946	-0.949	-0.952	0.505	0.475	0.461	0.447	0.431
	mr3X	-0.923	-0.939	-0.944	-0.947	-0.951	0.509	0.481	0.468	0.453	0.439
C1.4.3	rotX	-0.726	-0.722	-0.720	-0.719	-0.718	0.174	0.179	0.179	0.180	0.181
	mr1X	-0.723	-0.720	-0.719	-0.718	-0.718	0.176	0.179	0.180	0.180	0.181
	mr2X	-0.722	-0.719	-0.719	-0.718	-0.717	0.176	0.179	0.180	0.181	0.181
	mr3X	-0.720	-0.718	-0.718	-0.717	-0.716	0.177	0.179	0.180	0.181	0.182
C1.4.4	rotX	-0.948	-0.931	-0.923	-0.915	-0.905	-0.440	-0.430	-0.425	-0.419	-0.413
	mr1X	-0.955	-0.943	-0.936	-0.928	-0.920	-0.475	-0.474	-0.470	-0.464	-0.457
	mr2X	-0.956	-0.945	-0.939	-0.931	-0.923	-0.475	-0.475	-0.471	-0.466	-0.459
	mr3X	-0.957	-0.947	-0.941	-0.934	-0.927	-0.473	-0.474	-0.471	-0.466	-0.461
C1.4.5	rotX	-0.963	-0.975	-0.977	-0.979	-0.980	0.251	0.225	0.211	0.197	0.182
	mr1X	-0.961	-0.975	-0.978	-0.980	-0.981	0.280	0.240	0.226	0.211	0.196
	mr2X	-0.961	-0.974	-0.977	-0.979	-0.980	0.283	0.244	0.229	0.215	0.200
	mr3X	-0.959	-0.972	-0.975	-0.978	-0.979	0.286	0.247	0.233	0.219	0.204

Tabella 3.2 Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 3 e 4

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.5.1	rotX	-0.954	-0.949	-0.947	-0.945	-0.943	0.598	0.620	0.622	0.623	0.623
	mr1X	-0.951	-0.949	-0.948	-0.946	-0.944	0.612	0.629	0.632	0.633	0.634
	mr2X	-0.950	-0.948	-0.947	-0.946	-0.944	0.613	0.629	0.632	0.633	0.634
	mr3X	-0.948	-0.947	-0.946	-0.945	-0.943	0.614	0.629	0.631	0.633	0.634
C1.5.2	rotX	-0.969	-0.949	-0.941	-0.931	-0.921	-0.227	-0.192	-0.182	-0.170	-0.159
	mr1X	-0.972	-0.956	-0.949	-0.940	-0.931	-0.238	-0.209	-0.198	-0.186	-0.174
	mr2X	-0.972	-0.957	-0.950	-0.942	-0.934	-0.235	-0.208	-0.197	-0.186	-0.174
	mr3X	-0.972	-0.958	-0.952	-0.944	-0.936	-0.231	-0.205	-0.195	-0.185	-0.173
C1.5.3	rotX	-0.947	-0.932	-0.925	-0.917	-0.909	0.020	0.035	0.039	0.043	0.047
	mr1X	-0.949	-0.937	-0.931	-0.924	-0.917	0.028	0.038	0.042	0.046	0.050
	mr2X	-0.949	-0.938	-0.933	-0.926	-0.919	0.030	0.040	0.044	0.047	0.051
	mr3X	-0.949	-0.939	-0.934	-0.928	-0.922	0.033	0.043	0.046	0.049	0.053
C1.5.4	rotX	-0.867	-0.832	-0.821	-0.810	-0.799	-0.192	-0.139	-0.126	-0.114	-0.102
	mr1X	-0.877	-0.846	-0.836	-0.826	-0.815	-0.197	-0.153	-0.139	-0.126	-0.114
	mr2X	-0.878	-0.849	-0.839	-0.829	-0.819	-0.197	-0.156	-0.143	-0.131	-0.119
	mr3X	-0.878	-0.852	-0.842	-0.833	-0.823	-0.198	-0.159	-0.147	-0.135	-0.123
C1.5.5	rotX	-0.965	-0.945	-0.937	-0.929	-0.920	-0.142	-0.099	-0.086	-0.072	-0.058
	mr1X	-0.966	-0.949	-0.942	-0.934	-0.925	-0.133	-0.098	-0.085	-0.071	-0.058
	mr2X	-0.966	-0.950	-0.943	-0.935	-0.927	-0.129	-0.095	-0.083	-0.070	-0.057
	mr3X	-0.966	-0.951	-0.944	-0.937	-0.929	-0.124	-0.092	-0.080	-0.067	-0.055
C1.6.1	rotX	-0.915	-0.897	-0.889	-0.880	-0.871	-0.331	-0.326	-0.325	-0.323	-0.321
	mr1X	-0.918	-0.903	-0.896	-0.888	-0.879	-0.337	-0.336	-0.335	-0.333	-0.331
	mr2X	-0.918	-0.904	-0.897	-0.890	-0.881	-0.336	-0.336	-0.335	-0.334	-0.332
	mr3X	-0.918	-0.905	-0.898	-0.891	-0.883	-0.335	-0.336	-0.335	-0.334	-0.332
C1.6.2	rotX	-0.808	-0.745	-0.723	-0.701	-0.679	-0.583	-0.556	-0.544	-0.531	-0.516
	mr1X	-0.815	-0.759	-0.739	-0.718	-0.696	-0.599	-0.579	-0.568	-0.556	-0.542
	mr2X	-0.818	-0.764	-0.745	-0.724	-0.703	-0.603	-0.585	-0.575	-0.563	-0.550
	mr3X	-0.821	-0.769	-0.750	-0.731	-0.710	-0.607	-0.590	-0.580	-0.569	-0.557
C1.6.3	rotX	-0.955	-0.944	-0.938	-0.932	-0.925	0.058	0.063	0.064	0.064	0.064
	mr1X	-0.954	-0.948	-0.943	-0.937	-0.931	0.061	0.064	0.064	0.065	0.065
	mr2X	-0.953	-0.948	-0.943	-0.938	-0.932	0.060	0.064	0.064	0.064	0.064
	mr3X	-0.952	-0.947	-0.943	-0.938	-0.933	0.060	0.063	0.064	0.064	0.064
C1.6.4	rotX	-0.983	-0.982	-0.980	-0.976	-0.973	0.160	0.159	0.154	0.147	0.140
	mr1X	-0.981	-0.983	-0.981	-0.979	-0.975	0.166	0.161	0.156	0.150	0.143
	mr2X	-0.979	-0.982	-0.981	-0.978	-0.975	0.164	0.157	0.153	0.147	0.141
	mr3X	-0.977	-0.980	-0.979	-0.977	-0.975	0.160	0.153	0.149	0.144	0.138
C1.6.5	rotX	-0.929	-0.953	-0.958	-0.961	-0.962	0.173	0.126	0.108	0.091	0.074
	mr1X	-0.929	-0.954	-0.959	-0.962	-0.964	0.175	0.128	0.112	0.095	0.078
	mr2X	-0.929	-0.953	-0.958	-0.962	-0.964	0.172	0.127	0.112	0.095	0.079
	mr3X	-0.928	-0.952	-0.957	-0.961	-0.963	0.168	0.126	0.111	0.095	0.080

Tabella 3.3 Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 5 e 6

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.1.1	rotY	-0.918	-0.889	-0.878	-0.867	-0.855	-0.482	-0.436	-0.419	-0.401	-0.383
	mr1Y	-0.925	-0.899	-0.889	-0.878	-0.866	-0.496	-0.451	-0.435	-0.417	-0.399
	mr2Y	-0.926	-0.901	-0.891	-0.881	-0.870	-0.494	-0.451	-0.435	-0.418	-0.400
	mr3Y	-0.927	-0.903	-0.893	-0.883	-0.873	-0.492	-0.449	-0.434	-0.417	-0.400
C1.1.2	rotY	-0.981	-0.973	-0.969	-0.964	-0.959	0.044	0.061	0.064	0.068	0.071
	mr1Y	-0.983	-0.977	-0.974	-0.970	-0.965	0.050	0.065	0.069	0.073	0.077
	mr2Y	-0.982	-0.977	-0.974	-0.970	-0.966	0.050	0.065	0.069	0.073	0.076
	mr3Y	-0.981	-0.977	-0.974	-0.970	-0.966	0.050	0.064	0.068	0.072	0.075
C1.1.3	rotY	-0.969	-0.966	-0.964	-0.962	-0.960	0.436	0.424	0.416	0.407	0.397
	mr1Y	-0.969	-0.971	-0.970	-0.969	-0.966	0.476	0.464	0.456	0.447	0.437
	mr2Y	-0.967	-0.970	-0.969	-0.968	-0.966	0.476	0.464	0.457	0.448	0.438
	mr3Y	-0.965	-0.968	-0.968	-0.967	-0.966	0.474	0.463	0.456	0.448	0.438
C1.1.4	rotY	-0.931	-0.913	-0.905	-0.897	-0.888	-0.357	-0.347	-0.343	-0.338	-0.332
	mr1Y	-0.938	-0.926	-0.919	-0.912	-0.904	-0.375	-0.370	-0.366	-0.362	-0.357
	mr2Y	-0.938	-0.927	-0.922	-0.915	-0.907	-0.372	-0.369	-0.366	-0.362	-0.358
	mr3Y	-0.939	-0.928	-0.923	-0.917	-0.910	-0.368	-0.367	-0.364	-0.361	-0.357
C1.1.5	rotY	-0.917	-0.915	-0.915	-0.914	-0.912	0.608	0.624	0.623	0.621	0.617
	mr1Y	-0.912	-0.914	-0.914	-0.914	-0.913	0.615	0.627	0.627	0.625	0.623
	mr2Y	-0.910	-0.912	-0.913	-0.912	-0.912	0.614	0.625	0.625	0.624	0.622
	mr3Y	-0.907	-0.910	-0.911	-0.911	-0.910	0.612	0.622	0.622	0.621	0.620
C1.2.1	rotY	-0.867	-0.852	-0.846	-0.841	-0.835	-0.104	-0.080	-0.073	-0.067	-0.061
	mr1Y	-0.882	-0.868	-0.863	-0.858	-0.853	-0.115	-0.090	-0.083	-0.076	-0.069
	mr2Y	-0.882	-0.869	-0.865	-0.859	-0.854	-0.117	-0.092	-0.085	-0.078	-0.071
	mr3Y	-0.882	-0.870	-0.865	-0.861	-0.856	-0.119	-0.095	-0.087	-0.080	-0.074
C1.2.2	rotY	-0.993	-0.981	-0.975	-0.969	-0.963	-0.146	-0.116	-0.103	-0.089	-0.074
	mr1Y	-0.993	-0.984	-0.979	-0.974	-0.968	-0.149	-0.116	-0.103	-0.089	-0.074
	mr2Y	-0.993	-0.984	-0.980	-0.975	-0.969	-0.146	-0.113	-0.099	-0.085	-0.070
	mr3Y	-0.992	-0.984	-0.980	-0.975	-0.970	-0.141	-0.108	-0.095	-0.081	-0.066
C1.2.3	rotY	-0.959	-0.937	-0.929	-0.920	-0.911	-0.229	-0.184	-0.170	-0.157	-0.144
	mr1Y	-0.964	-0.946	-0.939	-0.931	-0.922	-0.247	-0.203	-0.189	-0.175	-0.162
	mr2Y	-0.964	-0.947	-0.940	-0.932	-0.924	-0.247	-0.205	-0.191	-0.178	-0.164
	mr3Y	-0.964	-0.948	-0.941	-0.934	-0.926	-0.246	-0.206	-0.193	-0.180	-0.167
C1.2.4	rotY	-0.972	-0.960	-0.955	-0.949	-0.943	-0.191	-0.186	-0.184	-0.182	-0.180
	mr1Y	-0.976	-0.969	-0.965	-0.960	-0.954	-0.219	-0.213	-0.211	-0.209	-0.206
	mr2Y	-0.976	-0.970	-0.966	-0.961	-0.956	-0.221	-0.216	-0.214	-0.211	-0.209
	mr3Y	-0.975	-0.970	-0.966	-0.962	-0.957	-0.223	-0.218	-0.216	-0.214	-0.211
C1.2.5	rotY	-0.947	-0.953	-0.952	-0.951	-0.949	0.037	0.012	0.001	-0.010	-0.020
	mr1Y	-0.953	-0.962	-0.962	-0.962	-0.961	0.055	0.014	0.002	-0.010	-0.021
	mr2Y	-0.952	-0.962	-0.963	-0.963	-0.962	0.058	0.016	0.003	-0.009	-0.020
	mr3Y	-0.952	-0.962	-0.963	-0.963	-0.962	0.060	0.018	0.005	-0.007	-0.018

Tabella 3.4 Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 1 e 2

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.3.1	rotY	-0.944	-0.921	-0.912	-0.903	-0.893	-0.365	-0.331	-0.317	-0.303	-0.288
	mr1Y	-0.951	-0.930	-0.922	-0.914	-0.904	-0.386	-0.351	-0.338	-0.323	-0.308
	mr2Y	-0.952	-0.932	-0.925	-0.916	-0.907	-0.384	-0.350	-0.337	-0.323	-0.308
	mr3Y	-0.953	-0.934	-0.927	-0.919	-0.910	-0.382	-0.349	-0.336	-0.323	-0.308
C1.3.2	rotY	-0.970	-0.950	-0.943	-0.935	-0.927	-0.026	0.032	0.048	0.064	0.078
	mr1Y	-0.969	-0.953	-0.946	-0.939	-0.931	-0.028	0.029	0.045	0.061	0.075
	mr2Y	-0.968	-0.953	-0.946	-0.940	-0.932	-0.029	0.027	0.043	0.058	0.072
	mr3Y	-0.966	-0.952	-0.946	-0.940	-0.933	-0.030	0.024	0.040	0.054	0.068
C1.3.3	rotY	-0.977	-0.949	-0.939	-0.928	-0.916	-0.276	-0.194	-0.168	-0.142	-0.116
	mr1Y	-0.979	-0.957	-0.948	-0.938	-0.927	-0.287	-0.209	-0.182	-0.155	-0.129
	mr2Y	-0.979	-0.959	-0.950	-0.941	-0.930	-0.285	-0.210	-0.184	-0.158	-0.131
	mr3Y	-0.979	-0.960	-0.952	-0.943	-0.934	-0.282	-0.210	-0.185	-0.159	-0.134
C1.3.4	rotY	-0.991	-0.974	-0.968	-0.961	-0.955	-0.120	-0.109	-0.103	-0.097	-0.091
	mr1Y	-0.991	-0.983	-0.978	-0.973	-0.966	-0.142	-0.127	-0.121	-0.115	-0.109
	mr2Y	-0.990	-0.984	-0.980	-0.975	-0.969	-0.140	-0.127	-0.122	-0.116	-0.110
	mr3Y	-0.989	-0.984	-0.980	-0.976	-0.971	-0.137	-0.126	-0.122	-0.116	-0.111
C1.3.5	rotY	-0.990	-0.978	-0.973	-0.968	-0.962	-0.004	0.001	0.002	0.003	0.005
	mr1Y	-0.989	-0.984	-0.980	-0.975	-0.970	0.004	0.004	0.004	0.006	0.007
	mr2Y	-0.988	-0.984	-0.980	-0.976	-0.971	0.007	0.006	0.006	0.007	0.008
	mr3Y	-0.986	-0.983	-0.980	-0.977	-0.972	0.010	0.008	0.008	0.009	0.010
C1.4.1	rotY	-0.950	-0.938	-0.933	-0.927	-0.921	-0.112	-0.092	-0.085	-0.078	-0.071
	mr1Y	-0.955	-0.946	-0.941	-0.936	-0.930	-0.117	-0.097	-0.090	-0.083	-0.076
	mr2Y	-0.956	-0.947	-0.943	-0.938	-0.932	-0.116	-0.097	-0.090	-0.083	-0.076
	mr3Y	-0.956	-0.948	-0.944	-0.939	-0.934	-0.115	-0.096	-0.090	-0.083	-0.076
C1.4.2	rotY	-0.986	-0.973	-0.967	-0.962	-0.955	0.327	0.363	0.371	0.379	0.385
	mr1Y	-0.983	-0.976	-0.972	-0.967	-0.961	0.351	0.389	0.398	0.406	0.414
	mr2Y	-0.981	-0.975	-0.971	-0.967	-0.962	0.351	0.388	0.398	0.406	0.414
	mr3Y	-0.979	-0.974	-0.970	-0.966	-0.962	0.351	0.388	0.397	0.405	0.413
C1.4.3	rotY	-0.925	-0.897	-0.887	-0.877	-0.867	0.269	0.310	0.324	0.337	0.350
	mr1Y	-0.926	-0.907	-0.898	-0.889	-0.879	0.287	0.328	0.341	0.354	0.367
	mr2Y	-0.926	-0.908	-0.900	-0.891	-0.882	0.293	0.332	0.345	0.357	0.370
	mr3Y	-0.924	-0.908	-0.901	-0.893	-0.884	0.298	0.336	0.348	0.360	0.372
C1.4.4	rotY	-0.986	-0.983	-0.980	-0.976	-0.972	0.219	0.181	0.170	0.160	0.149
	mr1Y	-0.987	-0.989	-0.987	-0.984	-0.980	0.246	0.207	0.195	0.184	0.172
	mr2Y	-0.987	-0.988	-0.987	-0.984	-0.981	0.248	0.210	0.198	0.187	0.176
	mr3Y	-0.985	-0.988	-0.987	-0.985	-0.982	0.249	0.213	0.201	0.190	0.179
C1.4.5	rotY	-0.964	-0.972	-0.974	-0.975	-0.976	0.534	0.506	0.493	0.479	0.465
	mr1Y	-0.961	-0.973	-0.975	-0.977	-0.978	0.564	0.533	0.520	0.506	0.492
	mr2Y	-0.959	-0.972	-0.974	-0.976	-0.977	0.568	0.539	0.526	0.513	0.499
	mr3Y	-0.958	-0.970	-0.973	-0.975	-0.976	0.573	0.544	0.532	0.520	0.506

Tabella 3.5 Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 3 e 4

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.5.1	rotY	-0.991	-0.978	-0.973	-0.968	-0.962	-0.128	-0.088	-0.076	-0.065	-0.055
	mr1Y	-0.990	-0.982	-0.978	-0.972	-0.967	-0.135	-0.097	-0.086	-0.074	-0.063
	mr2Y	-0.990	-0.982	-0.978	-0.973	-0.968	-0.135	-0.098	-0.087	-0.075	-0.064
	mr3Y	-0.989	-0.982	-0.978	-0.974	-0.969	-0.134	-0.099	-0.088	-0.077	-0.066
C1.5.2	rotY	-0.987	-0.966	-0.958	-0.949	-0.939	-0.331	-0.284	-0.267	-0.249	-0.231
	mr1Y	-0.987	-0.973	-0.965	-0.957	-0.948	-0.355	-0.308	-0.291	-0.273	-0.254
	mr2Y	-0.987	-0.973	-0.967	-0.959	-0.950	-0.355	-0.309	-0.292	-0.275	-0.256
	mr3Y	-0.987	-0.974	-0.968	-0.961	-0.953	-0.354	-0.310	-0.293	-0.276	-0.259
C1.5.3	rotY	-0.956	-0.940	-0.933	-0.926	-0.917	0.075	0.067	0.066	0.067	0.067
	mr1Y	-0.960	-0.951	-0.945	-0.939	-0.931	0.082	0.077	0.077	0.076	0.077
	mr2Y	-0.960	-0.952	-0.947	-0.941	-0.934	0.086	0.081	0.080	0.080	0.080
	mr3Y	-0.960	-0.953	-0.949	-0.944	-0.937	0.090	0.085	0.084	0.084	0.084
C1.5.4	rotY	-0.965	-0.973	-0.975	-0.975	-0.976	0.384	0.359	0.348	0.336	0.322
	mr1Y	-0.963	-0.975	-0.976	-0.978	-0.978	0.388	0.367	0.356	0.344	0.331
	mr2Y	-0.962	-0.973	-0.975	-0.977	-0.978	0.386	0.365	0.355	0.344	0.330
	mr3Y	-0.960	-0.971	-0.974	-0.975	-0.976	0.383	0.363	0.353	0.342	0.329
C1.5.5	rotY	-0.989	-0.985	-0.983	-0.980	-0.976	0.352	0.343	0.339	0.335	0.330
	mr1Y	-0.987	-0.987	-0.985	-0.983	-0.979	0.377	0.364	0.360	0.356	0.352
	mr2Y	-0.986	-0.987	-0.985	-0.983	-0.980	0.380	0.367	0.363	0.359	0.355
	mr3Y	-0.985	-0.986	-0.985	-0.983	-0.980	0.382	0.370	0.366	0.362	0.358
C1.6.1	rotY	-0.934	-0.936	-0.935	-0.934	-0.932	0.056	0.051	0.048	0.045	0.042
	mr1Y	-0.935	-0.938	-0.937	-0.936	-0.934	0.054	0.050	0.047	0.045	0.042
	mr2Y	-0.933	-0.937	-0.936	-0.935	-0.933	0.052	0.048	0.046	0.043	0.041
	mr3Y	-0.931	-0.935	-0.935	-0.934	-0.932	0.050	0.046	0.044	0.042	0.039
C1.6.2	rotY	-0.924	-0.891	-0.879	-0.866	-0.853	-0.328	-0.296	-0.285	-0.273	-0.261
	mr1Y	-0.934	-0.906	-0.895	-0.883	-0.870	-0.364	-0.331	-0.319	-0.307	-0.294
	mr2Y	-0.934	-0.907	-0.897	-0.885	-0.873	-0.364	-0.333	-0.321	-0.309	-0.297
	mr3Y	-0.934	-0.908	-0.898	-0.888	-0.876	-0.364	-0.334	-0.322	-0.311	-0.299
C1.6.3	rotY	-0.968	-0.957	-0.952	-0.946	-0.940	0.064	0.088	0.094	0.099	0.103
	mr1Y	-0.967	-0.960	-0.956	-0.951	-0.945	0.066	0.091	0.097	0.102	0.107
	mr2Y	-0.965	-0.959	-0.955	-0.951	-0.945	0.064	0.089	0.095	0.100	0.105
	mr3Y	-0.962	-0.957	-0.954	-0.950	-0.945	0.062	0.086	0.092	0.097	0.102
C1.6.4	rotY	-0.985	-0.972	-0.967	-0.960	-0.953	-0.103	-0.074	-0.066	-0.060	-0.054
	mr1Y	-0.984	-0.976	-0.971	-0.965	-0.958	-0.119	-0.089	-0.081	-0.074	-0.067
	mr2Y	-0.982	-0.975	-0.970	-0.965	-0.959	-0.123	-0.093	-0.085	-0.078	-0.071
	mr3Y	-0.980	-0.973	-0.969	-0.964	-0.959	-0.126	-0.098	-0.090	-0.083	-0.076
C1.6.5	rotY	-0.931	-0.952	-0.956	-0.959	-0.961	0.294	0.272	0.261	0.250	0.239
	mr1Y	-0.928	-0.951	-0.956	-0.959	-0.961	0.299	0.279	0.270	0.260	0.249
	mr2Y	-0.926	-0.949	-0.954	-0.958	-0.960	0.297	0.279	0.270	0.260	0.250
	mr3Y	-0.923	-0.946	-0.951	-0.955	-0.958	0.293	0.277	0.269	0.260	0.251

Tabella 3.6 Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità grezze per i sensori delle travi 5 e 6

3.1.4 Calcolo della deriva istantanea

Dopo aver valutato i coefficienti di correlazione tra le serie di rotazione e di temperatura, è possibile procedere con la correzione del segnale di rotazione per rimuovere l'effetto della temperatura o dell'umidità. In particolare, nell'ipotesi di svincolamento dalla temperatura, il generico elemento i del vettore che contiene il segnale di rotazione rot viene corretto come mostrato nell'Equazione 3.10.

$$rot_k[i] = rot_{raw}[i] + D \cdot (temp[i] - temp_0) \quad (3.10)$$

Dove rot_k è il vettore che contiene il segnale di rotazione corretto, rot_{raw} è il vettore che contiene il segnale di rotazione grezzo, $temp$ è il vettore che contiene il segnale di temperatura, D è il valore della deriva termica istantanea e $temp_0$ è il valore di temperatura misurato a ponte scarico. Ovviamente la stessa formulazione è valida anche per la rimozione dell'effetto dell'umidità utilizzando però il vettore $umid$ e il parametro a ponte scarico $umid_0$.

Il valore di temperatura a ponte scarico cambia ovviamente da sensore a sensore ed è un dato di input che l'utente deve fornire all'algoritmo prima dell'esecuzione. Nel caso in studio, non si hanno a disposizione i dati a ponte scarico delle grandezze misurate dagli strumenti e perciò questi ultimi vengono ricavati eseguendo una media sull'intera lunghezza del segnale ipotizzando in tal modo di eliminare dal segnale gli effetti istantanei del traffico (nel caso dei segnali di rotazione) e tutti gli sbalzi termici e igrometrici (nel caso dei segnali di rotazione e umidità) spalmandoli sull'intero segnale.

Per fornire in input all'algoritmo le misurazioni a ponte scarico, si utilizza il file di testo `dati_iniziali_A.csv` definito nel paragrafo 1.1.2 e di cui si porta un'immagine in Figura 3.2.

```

sensore,rotX [mrad],rotY [mrad],temp[°C],umid[%]
C1.1.1,21.3341,-9.9905,21.7,64.6
C1.1.2,-4.7855,-29.4408,21.7,63.2
C1.1.3,-5.9520,-19.9109,21.5,66.9
C1.1.4,3.3652,-30.0608,22.1,63.6
C1.1.5,14.1315,-28.1965,21.9,57.4
C1.2.1,59.7417,-29.0179,22.0,62.5
C1.2.2,48.4338,-22.4792,21.9,49.6

```

Figura 3.2 Immagine del file di testo 'dati_iniziali_A.csv'

Il codice eliminerà per prima l'influenza della temperatura e, al termine, procederà con l'umidità.

Il valore delle derivate termica (o igrometrica) istantanea non è noto a priori ma viene calcolato tramite un processo iterativo di ottimizzazione finalizzato alla minimizzazione del coefficiente di correlazione tra il segnale delle rotazioni corrette e il segnale di temperatura (o di umidità) istantaneo per selezionare, tra tutti, il parametro di deriva a cui corrisponde il coefficiente di correlazione minimo.

L'algoritmo di minimizzazione del coefficiente di correlazione è fondato sul metodo della bisezione: si inizia il processo considerando un intervallo di valori $[a, b]$ in cui far variare i valori della deriva termica istantanea D_a e D_b e calcolando in funzione degli estremi a e b le serie di rotazione corrette e i valori dei rispettivi coefficienti di correlazione ρ_a e ρ_b rispetto alla temperatura (o all'umidità) istantanea. Successivamente si assume il valore della deriva termica (o igrometrica) istantanea D_c

come la media c tra i due estremi dell'intervallo di partenza e si calcolano la serie delle rotazioni corrette e il corrispondente coefficiente di correlazione ρ_c rispetto alla temperatura istantanea.

A questo punto si riduce l'intervallo di variazione della deriva termica istantanea pari a $[a, c]$ se ρ_a è minore di ρ_b e pari a $[c, b]$ se ρ_b è minore di ρ_a e si ripete il processo continuando a iterare e assumendo come valore di deriva termica istantanea il valore medio degli intervalli successivi di ampiezza via via decrescente ottenuti in funzione dell'iterazione precedente imponendo come estremi il valore medio e l'estremo a cui corrispondeva un coefficiente di correlazione minore.

Gli estremi iniziali a e b dell'intervallo di partenza, nonché ovviamente la precisione che si deve raggiungere per ottenere la convergenza, sono variabili a seconda del caso in studio poiché dipendono dalla tipologia di strumento e dalle decisioni di chi esegue l'analisi. Per questa ragione, tali parametri devono essere preliminarmente definiti dall'utente.

In Figura 3.3, si riporta un'immagine della sezione di *File di input utente.txt* dedicata all'inserimento dei parametri di deriva. Si noti che viene richiesto di definire i medesimi parametri anche per la deriva differita di cui tuttavia si parlerà nei paragrafi dedicati alla seconda correzione del segnale.

```

(9) DATI PER IL CALCOLO DELLE DERIVE E DEL COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE (9)

In questa sezione, si richiede di inserire gli estremi dell'intervallo in cui ricercare l'ottimizzazione dei valore
delle derive istantanea e differita e la precisione necessaria per la corvengenza.

estremo_sinistro_intervallo_deriva_istantanea[mrad/°C]: -0.2
estremo_destro_intervallo_deriva_istantanea[mrad/°C]: 0.2
massimo_errrore_deriva_istantanea[mrad/°C]: 0.00005
estremo_sinistro_intervallo_deriva_differita[mrad/°C]: -0.2
estremo_destro_intervallo_deriva_differita[mrad/°C]: 0.2
massimo_errrore_deriva_differita[mrad/°C]: 0.00005
indice_posizione_iniziale_dell'intervallo_di_correlazione: 320

```

Figura 3.3 Immagine del nono gruppo di dati di 'File di input utente.txt'

Una volta acquisiti i parametri inseriti dall'utente, ha inizio il calcolo al termine del quale la funzione *deriva_istantanea* presente all'interno del modulo secondario *statistica.py* restituisce al blocco principale *main.py* il valore di deriva termica istantanea. Dopo aver completato l'intero processo di pulizia delle rotazioni dal segnale di temperatura, l'algoritmo ripete queste operazioni anche per il segnale di umidità.

Nelle Tabelle 3.7, 3.8 e 3.9, si riportano i valori ottimizzati delle derive istantanee, sia termiche sia igrometriche, calcolate per i segnali di rotazione X e di rotazione Y di tutti gli strumenti.

Non si dispone della scheda tecnica della strumentazione utilizzata, in quanto si tratta di prototipi non ancora ufficialmente in commercio. Non è quindi possibile confrontare i risultati ottenuti dal calcolo con i valori di deriva dichiarati dalla casa produttrice.

	C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5	C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5
$D_{rotX,temp}$ [mrad/°C]	-0.163	-0.070	-0.090	-0.020	-0.168	-0.077	-0.157	-0.127	-0.058	-0.082
$D_{rotY,temp}$ [mrad/°C]	-0.053	-0.063	-0.057	-0.041	-0.109	-0.023	-0.117	-0.046	-0.045	-0.042
$D_{rotX,temp}$ [mrad/%]	-0.020	0.003	0.001	-0.038	-0.016	-0.004	-0.031	-0.034	-0.040	-0.062
$D_{rotX,temp}$ [mrad/%]	-0.016	0.000	0.005	-0.010	0.044	-0.005	-0.004	-0.005	-0.004	0.001

Tabella 3.7 Derive termiche e igrometriche per i segnali di rotazione X e Y relativi agli strumenti sulle travi 1 e 2

	C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5	C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5
$D_{rotX,temp}$ [mrad/°C]	-0.072	-0.126	-0.112	-0.089	-0.127	-0.097	-0.113	-0.200	-0.047	-0.130
$D_{rotY,temp}$ [mrad/°C]	-0.056	-0.103	-0.088	-0.088	-0.107	-0.044	-0.084	-0.053	-0.069	-0.102
$D_{rotX,temp}$ [mrad/%]	-0.012	-0.036	-0.052	-0.008	-0.019	0.002	0.021	0.132	-0.010	-0.001
$D_{rotX,temp}$ [mrad/%]	-0.012	-0.001	-0.008	-0.002	0.000	-0.003	0.007	0.007	0.004	0.010

Tabella 3.8 Derive termiche e igrometriche per i segnali di rotazione X e Y relativi agli strumenti sulle travi 3 e 4

	C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5	C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
$D_{rotX,temp}$ [mrad/°C]	-0.171	-0.060	-0.165	-0.046	-0.187	-0.065	-0.080	-0.100	-0.102	-0.136
$D_{rotY,temp}$ [mrad/°C]	-0.112	-0.099	-0.064	-0.096	-0.119	-0.050	-0.033	-0.056	-0.069	-0.127
$D_{rotX,temp}$ [mrad/%]	0.035	-0.006	0.002	-0.010	-0.011	-0.015	-0.046	-0.001	-0.002	0.008
$D_{rotX,temp}$ [mrad/%]	-0.002	-0.009	0.003	0.018	0.010	0.002	-0.008	-0.003	-0.004	0.016

Tabella 3.9 Derive termiche e igrometriche per i segnali di rotazione X e Y relativi agli strumenti sulle travi 5 e 6

3.1.5 Seconda correzione dei segnali

Applicando la formulazione riportata nell'Equazione 3.10 inserendo le derive termiche e igrometriche istantanee riportate nelle Tabelle 3.3, 3.4 e 3.5, i segnali presenti nei vettori $rotX$ e $rotY$ vengono svincolati dalle oscillazioni termo-igrometriche istantanee e diventano $rotkX$ e $rotkY$.

I segnali ottenuti risultano molto meno volatili dei segnali grezzi in quanto, se si calcola il rispettivo scarto quadratico medio, si può osservare una diminuzione media del 65% e dunque una decisa riduzione della variabilità.

Successivamente, si procede a calcolare anche per i segnali corretti le medesime grandezze calcolate per i segnali grezzi: le serie di medie mobili su 2 ore e 20 minuti, 3 ore e 3 ore e 40 minuti, centrate sull'i-esimo elemento generico e che coinvolgono 29 ($mr1$), 37 ($mr2$) e 45 ($mr3$) elementi di segnale. Invece, le 28 serie di temperatura (o di umidità) calcolate in precedenza applicando le formulazioni riportate nelle Equazioni 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 sono salvate all'interno dei vettori $mt12$ (o $mu12$), $mt16$ (o $mu16$), $mt20$ (o $mu20$), $mt24$ (o $mu24$) e $mt24_{rn}$ (o $mu24_{rn}$) e sono ancora valide in quanto soltanto i segnali di rotazione hanno subito delle modifiche.

Analogamente a quanto fatto per i segnali delle rotazioni grezze, si sono calcolati, utilizzando la formulazione mostrata nell'Equazione 3.9, i coefficienti di correlazione tra le 4 serie corrette di rotazione (istantanea e con medie mobili sui 3 intervalli) e tra le 28 serie di temperatura (o di umidità). Nelle Tabelle 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15, si riportano i coefficienti di correlazione calcolati tra i 4 segnali di rotazioni X e Y corretti e i 4 segnali di temperatura e umidità senza ritardo (serie istantanee e con le medie mobili sui 4 diversi intervalli temporali). Nelle figure 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7, si riportano i grafici che mostrano, in ordinate, il coefficiente di correlazione tra le serie di rotazione X e Y mediate su 180 minuti ($mr2X$) e le generiche serie di temperatura e umidità mediate sui 120 minuti precedenti con ritardo n ($mt24-rn$) e, in ascisse, lo stesso ritardo n .

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.1.1	rotX	0.000	0.054	0.070	0.084	-0.002	0.000	0.070	0.090	0.110	0.000
	mr1X	-0.002	0.051	0.066	0.080	-0.004	0.000	0.068	0.088	0.108	0.000
	mr2X	-0.003	0.049	0.064	0.077	-0.005	0.000	0.067	0.086	0.105	0.000
	mr3X	-0.004	0.046	0.060	0.074	-0.007	0.000	0.065	0.084	0.103	0.000
C1.1.2	rotX	0.001	-0.008	-0.013	-0.020	-0.008	0.000	0.024	0.028	0.031	-0.002
	mr1X	-0.008	-0.017	-0.022	-0.028	-0.016	-0.002	0.018	0.023	0.027	-0.006
	mr2X	-0.014	-0.022	-0.027	-0.033	-0.021	-0.005	0.015	0.020	0.024	-0.009
	mr3X	-0.020	-0.028	-0.033	-0.038	-0.027	-0.008	0.011	0.016	0.020	-0.012
C1.1.3	rotX	0.000	0.019	0.022	0.022	-0.017	0.000	0.054	0.067	0.077	0.008
	mr1X	-0.018	0.006	0.009	0.010	-0.028	0.008	0.052	0.064	0.075	0.007
	mr2X	-0.025	-0.003	0.001	0.003	-0.035	0.008	0.050	0.061	0.072	0.007
	mr3X	-0.034	-0.012	-0.009	-0.007	-0.043	0.007	0.047	0.058	0.069	0.006
C1.1.4	rotX	0.000	0.054	0.073	0.092	0.014	0.001	0.034	0.048	0.063	0.003
	mr1X	0.015	0.064	0.082	0.101	0.026	0.003	0.042	0.056	0.069	0.012
	mr2X	0.023	0.071	0.088	0.105	0.033	0.009	0.046	0.059	0.072	0.016
	mr3X	0.032	0.078	0.094	0.111	0.041	0.015	0.050	0.063	0.075	0.022
C1.1.5	rotX	0.001	-0.001	-0.005	-0.011	-0.020	0.001	0.039	0.044	0.047	-0.004
	mr1X	-0.021	-0.017	-0.019	-0.024	-0.034	-0.004	0.026	0.031	0.035	-0.013
	mr2X	-0.030	-0.026	-0.028	-0.032	-0.041	-0.010	0.018	0.023	0.027	-0.018
	mr3X	-0.041	-0.036	-0.038	-0.041	-0.051	-0.017	0.009	0.014	0.018	-0.025
C1.2.1	rotX	0.003	0.005	0.004	0.002	-0.007	0.001	0.014	0.015	0.016	-0.003
	mr1X	-0.007	-0.003	-0.003	-0.005	-0.014	-0.003	0.008	0.011	0.012	-0.008
	mr2X	-0.012	-0.007	-0.008	-0.009	-0.018	-0.007	0.005	0.007	0.009	-0.011
	mr3X	-0.018	-0.013	-0.013	-0.014	-0.023	-0.011	0.001	0.003	0.005	-0.014
C1.2.2	rotX	0.001	0.065	0.086	0.107	0.005	0.000	0.056	0.075	0.094	0.008
	mr1X	0.005	0.070	0.090	0.111	0.009	0.008	0.062	0.081	0.099	0.015
	mr2X	0.008	0.072	0.092	0.113	0.012	0.013	0.066	0.084	0.102	0.019
	mr3X	0.012	0.075	0.095	0.115	0.016	0.018	0.070	0.088	0.106	0.025
C1.2.3	rotX	0.001	0.068	0.091	0.114	0.009	0.001	0.048	0.065	0.082	0.007
	mr1X	0.009	0.077	0.099	0.122	0.017	0.007	0.056	0.073	0.091	0.015
	mr2X	0.015	0.082	0.104	0.126	0.022	0.013	0.061	0.078	0.095	0.020
	mr3X	0.021	0.087	0.109	0.132	0.028	0.020	0.067	0.083	0.099	0.027
C1.2.4	rotX	0.001	0.059	0.079	0.100	0.013	0.000	0.043	0.060	0.077	0.005
	mr1X	0.013	0.069	0.089	0.110	0.024	0.005	0.052	0.069	0.086	0.015
	mr2X	0.020	0.075	0.095	0.115	0.031	0.012	0.057	0.073	0.090	0.021
	mr3X	0.029	0.083	0.102	0.121	0.039	0.020	0.063	0.079	0.095	0.028
C1.2.5	rotX	0.000	0.030	0.042	0.056	0.015	0.000	0.000	0.004	0.010	0.002
	mr1X	0.016	0.042	0.054	0.067	0.029	0.002	0.008	0.012	0.018	0.011
	mr2X	0.025	0.050	0.061	0.074	0.037	0.008	0.013	0.017	0.022	0.016
	mr3X	0.035	0.060	0.070	0.082	0.047	0.014	0.019	0.023	0.028	0.022

Tabella 3.10 Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 1 e 2

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.3.1	rotX	0.000	0.067	0.087	0.107	0.002	0.000	0.065	0.086	0.107	0.009
	mr1X	0.002	0.070	0.091	0.111	0.004	0.009	0.074	0.095	0.116	0.017
	mr2X	0.004	0.071	0.091	0.111	0.006	0.015	0.077	0.098	0.119	0.023
	mr3X	0.006	0.071	0.091	0.111	0.008	0.022	0.082	0.102	0.122	0.029
C1.3.2	rotX	0.001	0.066	0.087	0.108	-0.001	0.000	0.051	0.068	0.084	-0.001
	mr1X	-0.001	0.068	0.090	0.111	0.002	-0.001	0.054	0.070	0.087	0.003
	mr2X	0.001	0.069	0.091	0.112	0.004	0.002	0.055	0.071	0.088	0.005
	mr3X	0.004	0.071	0.092	0.113	0.007	0.005	0.056	0.072	0.088	0.008
C1.3.3	rotX	0.001	0.061	0.081	0.102	0.012	0.000	0.030	0.043	0.056	0.002
	mr1X	0.012	0.069	0.089	0.110	0.022	0.002	0.037	0.049	0.062	0.010
	mr2X	0.019	0.075	0.094	0.114	0.029	0.007	0.041	0.053	0.065	0.015
	mr3X	0.027	0.081	0.100	0.119	0.036	0.014	0.045	0.056	0.068	0.020
C1.3.4	rotX	0.002	0.010	0.009	0.008	-0.015	0.000	0.035	0.040	0.043	0.014
	mr1X	-0.018	-0.003	-0.001	-0.001	-0.024	0.017	0.035	0.039	0.044	0.018
	mr2X	-0.023	-0.010	-0.007	-0.006	-0.028	0.019	0.034	0.038	0.042	0.020
	mr3X	-0.029	-0.016	-0.013	-0.011	-0.032	0.021	0.033	0.036	0.040	0.021
C1.3.5	rotX	0.001	0.071	0.093	0.114	-0.001	0.000	0.072	0.094	0.115	0.012
	mr1X	-0.001	0.074	0.097	0.119	0.002	0.012	0.080	0.102	0.124	0.02
	mr2X	0.001	0.075	0.097	0.119	0.004	0.018	0.084	0.105	0.126	0.025
	mr3X	0.004	0.076	0.098	0.119	0.007	0.025	0.089	0.109	0.129	0.031
C1.4.1	rotX	0.001	0.017	0.020	0.021	-0.007	0.000	0.033	0.041	0.047	0.004
	mr1X	-0.007	0.010	0.012	0.014	-0.013	0.005	0.031	0.038	0.045	0.003
	mr2X	-0.011	0.005	0.007	0.009	-0.017	0.004	0.030	0.036	0.043	0.002
	mr3X	-0.017	-0.001	0.001	0.003	-0.023	0.003	0.027	0.034	0.040	0.001
C1.4.2	rotX	0.001	-0.074	-0.097	-0.121	-0.027	0.001	-0.009	-0.023	-0.037	0.017
	mr1X	-0.029	-0.089	-0.111	-0.134	-0.044	0.019	-0.020	-0.034	-0.048	0.008
	mr2X	-0.041	-0.098	-0.119	-0.141	-0.054	0.013	-0.025	-0.039	-0.053	0.002
	mr3X	-0.054	-0.109	-0.129	-0.150	-0.067	0.005	-0.031	-0.045	-0.059	-0.005
C1.4.3	rotX	-0.399	-0.400	-0.401	-0.402	-0.410	0.000	0.008	0.009	0.011	0.006
	mr1X	-0.405	-0.404	-0.405	-0.406	-0.414	0.006	0.009	0.010	0.012	0.008
	mr2X	-0.407	-0.406	-0.407	-0.408	-0.416	0.007	0.010	0.011	0.013	0.009
	mr3X	-0.410	-0.409	-0.410	-0.411	-0.418	0.009	0.011	0.012	0.014	0.010
C1.4.4	rotX	0.001	0.030	0.041	0.054	0.011	0.001	0.005	0.008	0.012	0.010
	mr1X	0.012	0.041	0.053	0.066	0.022	0.012	0.013	0.016	0.020	0.020
	mr2X	0.019	0.047	0.058	0.071	0.028	0.018	0.018	0.021	0.024	0.026
	mr3X	0.027	0.055	0.066	0.078	0.037	0.025	0.025	0.027	0.030	0.033
C1.4.5	rotX	0.001	-0.078	-0.101	-0.124	-0.024	0.001	-0.021	-0.035	-0.048	0.013
	mr1X	-0.025	-0.091	-0.113	-0.136	-0.038	0.014	-0.029	-0.043	-0.057	0.008
	mr2X	-0.035	-0.098	-0.119	-0.142	-0.046	0.011	-0.032	-0.046	-0.061	0.004
	mr3X	-0.046	-0.106	-0.127	-0.149	-0.056	0.006	-0.036	-0.050	-0.064	0.000

Tabella 3.11 Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 3 e 4

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.5.1	rotY	0.000	-0.007	-0.012	-0.019	-0.013	0.001	0.038	0.044	0.049	0.015
	mr1Y	-0.013	-0.018	-0.023	-0.028	-0.022	0.015	0.035	0.041	0.046	0.014
	mr2Y	-0.019	-0.024	-0.029	-0.034	-0.028	0.015	0.034	0.039	0.044	0.014
	mr3Y	-0.026	-0.031	-0.036	-0.041	-0.034	0.015	0.032	0.037	0.042	0.013
C1.5.2	rotY	0.002	0.044	0.059	0.075	0.003	0.001	0.033	0.043	0.053	0.010
	mr1Y	0.003	0.052	0.069	0.085	0.010	0.011	0.040	0.051	0.061	0.017
	mr2Y	0.007	0.055	0.072	0.088	0.014	0.016	0.043	0.053	0.064	0.022
	mr3Y	0.012	0.059	0.075	0.091	0.018	0.021	0.048	0.057	0.067	0.026
C1.5.3	rotY	0.001	0.019	0.026	0.032	-0.003	0.000	0.016	0.020	0.024	0.008
	mr1Y	-0.003	0.020	0.027	0.033	-0.002	0.009	0.019	0.022	0.026	0.011
	mr2Y	-0.002	0.020	0.027	0.034	-0.001	0.011	0.020	0.024	0.028	0.013
	mr3Y	-0.002	0.020	0.027	0.034	0.000	0.013	0.022	0.026	0.029	0.015
C1.5.4	rotY	0.001	0.058	0.072	0.085	-0.003	0.000	0.050	0.063	0.075	0.003
	mr1Y	-0.003	0.052	0.067	0.081	-0.005	0.003	0.048	0.061	0.074	0.005
	mr2Y	-0.005	0.048	0.063	0.076	-0.007	0.004	0.047	0.059	0.071	0.005
	mr3Y	-0.007	0.044	0.058	0.071	-0.009	0.005	0.045	0.057	0.069	0.006
C1.5.5	rotY	0.001	0.049	0.065	0.081	-0.001	0.000	0.042	0.055	0.068	0.012
	mr1Y	-0.001	0.051	0.068	0.084	0.003	0.012	0.047	0.060	0.073	0.018
	mr2Y	0.001	0.053	0.069	0.085	0.005	0.016	0.051	0.063	0.075	0.022
	mr3Y	0.004	0.054	0.071	0.087	0.008	0.022	0.055	0.067	0.079	0.027
C1.6.1	rotY	0.001	0.029	0.038	0.047	0.006	0.000	0.002	0.003	0.004	0.002
	mr1Y	0.006	0.032	0.041	0.050	0.011	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004
	mr2Y	0.009	0.034	0.043	0.052	0.014	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005
	mr3Y	0.013	0.037	0.045	0.054	0.018	0.004	0.004	0.005	0.006	0.006
C1.6.2	rotY	0.000	0.092	0.121	0.150	0.01	0.000	0.023	0.035	0.048	0.013
	mr1Y	0.011	0.100	0.128	0.157	0.020	0.014	0.038	0.049	0.061	0.027
	mr2Y	0.017	0.104	0.132	0.160	0.025	0.024	0.046	0.057	0.069	0.036
	mr3Y	0.025	0.109	0.136	0.164	0.033	0.035	0.057	0.067	0.078	0.047
C1.6.3	rotY	0.000	0.002	0.001	0.001	-0.005	0.000	0.006	0.007	0.007	0.001
	mr1Y	-0.005	-0.002	-0.002	-0.003	-0.007	0.001	0.005	0.005	0.006	0.000
	mr2Y	-0.007	-0.004	-0.004	-0.005	-0.009	0.000	0.004	0.004	0.005	-0.001
	mr3Y	-0.009	-0.007	-0.007	-0.007	-0.011	0.000	0.003	0.003	0.004	-0.001
C1.6.4	rotY	0.000	-0.049	-0.067	-0.085	-0.014	0.001	0.002	-0.003	-0.009	-0.004
	mr1Y	-0.014	-0.062	-0.079	-0.097	-0.025	-0.005	-0.010	-0.014	-0.020	-0.012
	mr2Y	-0.022	-0.068	-0.084	-0.102	-0.031	-0.010	-0.016	-0.020	-0.025	-0.016
	mr3Y	-0.030	-0.075	-0.091	-0.108	-0.039	-0.015	-0.023	-0.027	-0.031	-0.021
C1.6.5	rotY	0.000	-0.097	-0.127	-0.157	-0.014	0.000	-0.045	-0.062	-0.078	-0.007
	mr1Y	-0.015	-0.106	-0.135	-0.165	-0.023	-0.007	-0.054	-0.070	-0.086	-0.016
	mr2Y	-0.021	-0.111	-0.139	-0.168	-0.028	-0.014	-0.059	-0.074	-0.090	-0.022
	mr3Y	-0.028	-0.116	-0.144	-0.172	-0.034	-0.021	-0.064	-0.079	-0.094	-0.029

Tabella 3.12 Correlazioni tra rotazione X, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 5 e 6

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.1.1	rotY	0.001	0.062	0.081	0.100	0.009	0.000	0.045	0.061	0.077	0.001
	mr1Y	0.009	0.068	0.087	0.107	0.014	0.001	0.051	0.067	0.084	0.007
	mr2Y	0.013	0.071	0.090	0.109	0.018	0.005	0.053	0.069	0.085	0.010
	mr3Y	0.018	0.074	0.093	0.111	0.022	0.009	0.056	0.072	0.088	0.014
C1.1.2	rotY	0.004	0.008	0.008	0.007	0.002	0.002	0.019	0.023	0.027	0.003
	mr1Y	0.002	0.005	0.005	0.005	0.000	0.004	0.019	0.023	0.028	0.004
	mr2Y	0.001	0.003	0.003	0.003	-0.001	0.004	0.018	0.023	0.027	0.004
	mr3Y	-0.001	0.001	0.001	0.001	-0.003	0.004	0.018	0.022	0.026	0.004
C1.1.3	rotY	0.003	-0.023	-0.035	-0.047	-0.010	0.000	-0.006	-0.011	-0.018	-0.002
	mr1Y	-0.011	-0.037	-0.048	-0.060	-0.021	-0.002	-0.015	-0.021	-0.029	-0.010
	mr2Y	-0.018	-0.044	-0.054	-0.066	-0.028	-0.007	-0.020	-0.027	-0.034	-0.015
	mr3Y	-0.027	-0.052	-0.062	-0.074	-0.036	-0.013	-0.026	-0.033	-0.04	-0.021
C1.1.4	rotY	0.001	0.029	0.038	0.048	0.011	0.000	0.004	0.006	0.009	0.003
	mr1Y	0.012	0.036	0.046	0.056	0.020	0.003	0.007	0.009	0.011	0.007
	mr2Y	0.018	0.041	0.049	0.059	0.025	0.006	0.008	0.010	0.012	0.009
	mr3Y	0.025	0.046	0.054	0.063	0.031	0.009	0.010	0.012	0.013	0.012
C1.1.5	rotY	0.001	-0.022	-0.032	-0.044	-0.017	0.000	0.036	0.040	0.043	0.016
	mr1Y	-0.017	-0.035	-0.044	-0.055	-0.030	0.016	0.031	0.034	0.037	0.014
	mr2Y	-0.026	-0.043	-0.051	-0.061	-0.037	0.015	0.029	0.032	0.034	0.014
	mr3Y	-0.036	-0.052	-0.060	-0.069	-0.046	0.014	0.026	0.029	0.031	0.013
C1.2.1	rotY	0.003	0.023	0.027	0.032	-0.001	0.000	0.023	0.029	0.035	-0.004
	mr1Y	-0.002	0.020	0.025	0.030	-0.005	-0.004	0.022	0.029	0.035	-0.006
	mr2Y	-0.004	0.018	0.023	0.028	-0.007	-0.006	0.020	0.027	0.034	-0.007
	mr3Y	-0.006	0.015	0.020	0.025	-0.009	-0.007	0.018	0.025	0.032	-0.008
C1.2.2	rotY	0.000	0.050	0.068	0.085	0.008	0.000	0.028	0.040	0.053	0.005
	mr1Y	0.008	0.060	0.078	0.096	0.015	0.006	0.039	0.052	0.066	0.013
	mr2Y	0.013	0.065	0.082	0.100	0.019	0.011	0.045	0.057	0.071	0.018
	mr3Y	0.019	0.070	0.087	0.104	0.024	0.017	0.051	0.064	0.077	0.024
C1.2.3	rotY	0.000	0.055	0.071	0.087	0.005	0.002	0.046	0.059	0.071	0.004
	mr1Y	0.006	0.060	0.077	0.093	0.009	0.005	0.049	0.063	0.076	0.007
	mr2Y	0.008	0.061	0.077	0.093	0.011	0.006	0.049	0.063	0.076	0.009
	mr3Y	0.011	0.062	0.078	0.093	0.013	0.008	0.050	0.063	0.075	0.010
C1.2.4	rotY	0.001	0.020	0.025	0.030	0.006	0.001	0.004	0.005	0.006	-0.001
	mr1Y	0.007	0.023	0.028	0.034	0.009	-0.001	0.004	0.005	0.007	-0.002
	mr2Y	0.009	0.024	0.029	0.035	0.011	-0.002	0.003	0.005	0.007	-0.002
	mr3Y	0.011	0.026	0.031	0.036	0.013	-0.003	0.003	0.005	0.006	-0.003
C1.2.5	rotY	0.003	-0.046	-0.059	-0.071	-0.009	0.000	-0.024	-0.035	-0.045	0.014
	mr1Y	-0.009	-0.052	-0.065	-0.078	-0.011	0.016	-0.026	-0.038	-0.050	0.017
	mr2Y	-0.011	-0.053	-0.066	-0.078	-0.013	0.017	-0.025	-0.037	-0.049	0.018
	mr3Y	-0.013	-0.054	-0.066	-0.078	-0.014	0.019	-0.023	-0.036	-0.047	0.019

Tabella 3.13 Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 1 e 2

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.3.1	rotY	0.002	0.055	0.072	0.090	0.006	0.000	0.031	0.043	0.056	0.003
	mr1Y	0.007	0.062	0.080	0.098	0.011	0.003	0.040	0.053	0.066	0.010
	mr2Y	0.010	0.065	0.082	0.100	0.014	0.008	0.044	0.057	0.070	0.014
	mr3Y	0.014	0.068	0.085	0.102	0.018	0.013	0.049	0.061	0.074	0.019
C1.3.2	rotY	0.001	0.048	0.060	0.070	-0.009	0.000	0.058	0.074	0.089	-0.001
	mr1Y	-0.009	0.04	0.053	0.064	-0.015	-0.001	0.056	0.072	0.087	-0.003
	mr2Y	-0.013	0.035	0.048	0.059	-0.018	-0.002	0.053	0.069	0.084	-0.004
	mr3Y	-0.018	0.029	0.042	0.053	-0.023	-0.003	0.051	0.066	0.081	-0.005
C1.3.3	rotY	0.002	0.090	0.116	0.142	0.009	0.000	0.080	0.106	0.132	0.012
	mr1Y	0.010	0.097	0.125	0.151	0.017	0.013	0.094	0.120	0.146	0.025
	mr2Y	0.015	0.100	0.127	0.153	0.021	0.021	0.099	0.125	0.150	0.032
	mr3Y	0.021	0.103	0.130	0.155	0.026	0.031	0.106	0.130	0.155	0.040
C1.3.4	rotY	0.000	0.054	0.065	0.076	0.019	0.001	0.010	0.016	0.021	0.001
	mr1Y	0.022	0.062	0.075	0.088	0.030	0.001	0.017	0.022	0.027	0.007
	mr2Y	0.029	0.064	0.076	0.089	0.036	0.005	0.018	0.023	0.028	0.010
	mr3Y	0.036	0.068	0.079	0.090	0.042	0.009	0.020	0.025	0.029	0.014
C1.3.5	rotY	0.000	0.014	0.018	0.022	0.003	0.001	0.006	0.007	0.008	0.009
	mr1Y	0.003	0.015	0.019	0.023	0.006	0.010	0.009	0.010	0.011	0.014
	mr2Y	0.005	0.016	0.020	0.023	0.008	0.012	0.011	0.012	0.013	0.016
	mr3Y	0.008	0.017	0.020	0.024	0.010	0.016	0.014	0.014	0.015	0.019
C1.4.1	rotY	0.001	0.021	0.028	0.035	0.003	0.000	0.019	0.025	0.032	0.002
	mr1Y	0.004	0.024	0.031	0.038	0.006	0.003	0.022	0.029	0.036	0.005
	mr2Y	0.005	0.026	0.032	0.039	0.008	0.004	0.024	0.030	0.037	0.006
	mr3Y	0.007	0.027	0.034	0.040	0.009	0.006	0.025	0.032	0.038	0.008
C1.4.2	rotY	0.000	0.013	0.014	0.014	-0.013	0.001	0.047	0.058	0.068	0.009
	mr1Y	-0.014	0.003	0.005	0.005	-0.022	0.010	0.049	0.060	0.071	0.009
	mr2Y	-0.020	-0.004	-0.001	0.000	-0.027	0.009	0.048	0.059	0.07	0.009
	mr3Y	-0.026	-0.011	-0.008	-0.007	-0.033	0.009	0.046	0.057	0.068	0.009
C1.4.3	rotY	0.001	0.047	0.061	0.074	0.007	0.000	0.048	0.063	0.078	0.013
	mr1Y	0.007	0.049	0.062	0.074	0.010	0.014	0.056	0.070	0.085	0.021
	mr2Y	0.009	0.049	0.061	0.073	0.012	0.019	0.059	0.073	0.088	0.026
	mr3Y	0.012	0.049	0.061	0.072	0.014	0.025	0.064	0.077	0.091	0.031
C1.4.4	rotY	0.000	-0.028	-0.035	-0.042	0.007	0.001	-0.035	-0.045	-0.055	0.003
	mr1Y	0.008	-0.026	-0.035	-0.043	0.012	0.004	-0.036	-0.048	-0.059	0.004
	mr2Y	0.011	-0.023	-0.032	-0.040	0.014	0.004	-0.035	-0.046	-0.057	0.004
	mr3Y	0.014	-0.019	-0.028	-0.037	0.016	0.004	-0.033	-0.045	-0.055	0.004
C1.4.5	rotY	0.001	-0.064	-0.085	-0.107	-0.016	0.001	-0.019	-0.032	-0.046	0.012
	mr1Y	-0.016	-0.075	-0.096	-0.117	-0.028	0.013	-0.027	-0.041	-0.054	0.006
	mr2Y	-0.025	-0.082	-0.102	-0.123	-0.035	0.009	-0.030	-0.044	-0.058	0.002
	mr3Y	-0.034	-0.09	-0.109	-0.129	-0.044	0.004	-0.035	-0.048	-0.062	-0.003

Tabella 3.14 Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 3 e 4

		Correlazioni termiche					Correlazioni igrometriche				
		temp	mt12	mt16	mt20	mt24	umid	mu12	mu16	mu20	mu24
C1.5.1	rotY	0.001	0.040	0.051	0.061	0.001	0.002	0.040	0.051	0.061	0.004
	mr1Y	0.001	0.041	0.052	0.063	0.002	0.004	0.042	0.054	0.065	0.006
	mr2Y	0.002	0.040	0.051	0.062	0.003	0.005	0.042	0.053	0.064	0.007
	mr3Y	0.003	0.039	0.050	0.061	0.004	0.007	0.042	0.053	0.064	0.008
C1.5.2	rotY	0.002	0.073	0.096	0.118	0.014	0.002	0.045	0.062	0.079	0.006
	mr1Y	0.015	0.084	0.107	0.130	0.025	0.007	0.057	0.075	0.092	0.015
	mr2Y	0.022	0.089	0.111	0.134	0.031	0.012	0.062	0.079	0.096	0.021
	mr3Y	0.030	0.095	0.117	0.139	0.038	0.019	0.067	0.084	0.100	0.027
C1.5.3	rotY	0.001	0.021	0.027	0.034	0.011	0.001	-0.006	-0.006	-0.005	0.004
	mr1Y	0.011	0.027	0.033	0.040	0.018	0.004	-0.001	-0.001	-0.001	0.008
	mr2Y	0.016	0.030	0.036	0.042	0.022	0.007	0.002	0.001	0.001	0.011
	mr3Y	0.021	0.035	0.040	0.046	0.026	0.010	0.005	0.004	0.004	0.014
C1.5.4	rotY	0.001	-0.062	-0.084	-0.107	-0.009	0.001	-0.019	-0.029	-0.041	-0.006
	mr1Y	-0.009	-0.073	-0.094	-0.117	-0.020	-0.007	-0.030	-0.041	-0.052	-0.017
	mr2Y	-0.016	-0.078	-0.099	-0.121	-0.026	-0.014	-0.037	-0.047	-0.058	-0.024
	mr3Y	-0.024	-0.085	-0.106	-0.127	-0.034	-0.022	-0.045	-0.054	-0.065	-0.032
C1.5.5	rotY	0.001	-0.026	-0.035	-0.043	-0.004	0.002	-0.003	-0.006	-0.009	0.013
	mr1Y	-0.005	-0.030	-0.038	-0.046	-0.007	0.014	-0.001	-0.005	-0.008	0.016
	mr2Y	-0.006	-0.031	-0.038	-0.046	-0.008	0.015	0.001	-0.003	-0.006	0.017
	mr3Y	-0.008	-0.032	-0.039	-0.046	-0.010	0.017	0.003	-0.001	-0.004	0.018
C1.6.1	rotY	0.001	-0.025	-0.034	-0.044	-0.007	0.000	-0.004	-0.007	-0.010	-0.003
	mr1Y	-0.008	-0.031	-0.040	-0.049	-0.014	-0.003	-0.008	-0.010	-0.013	-0.006
	mr2Y	-0.012	-0.034	-0.043	-0.051	-0.017	-0.006	-0.010	-0.012	-0.014	-0.008
	mr3Y	-0.017	-0.038	-0.046	-0.054	-0.022	-0.008	-0.012	-0.014	-0.016	-0.010
C1.6.2	rotY	0.001	0.060	0.078	0.096	-0.002	0.001	0.030	0.040	0.051	0.003
	mr1Y	-0.003	0.065	0.084	0.104	-0.002	0.003	0.038	0.049	0.061	0.008
	mr2Y	-0.003	0.064	0.084	0.103	-0.002	0.007	0.040	0.052	0.063	0.012
	mr3Y	-0.002	0.063	0.082	0.102	-0.001	0.011	0.043	0.054	0.066	0.015
C1.6.3	rotY	0.000	0.000	-0.003	-0.007	-0.013	0.001	0.026	0.032	0.037	-0.001
	mr1Y	-0.014	-0.011	-0.013	-0.017	-0.024	-0.002	0.024	0.030	0.036	-0.004
	mr2Y	-0.021	-0.018	-0.019	-0.023	-0.030	-0.004	0.021	0.027	0.033	-0.006
	mr3Y	-0.029	-0.025	-0.027	-0.030	-0.037	-0.006	0.018	0.024	0.029	-0.008
C1.6.4	rotY	0.001	0.015	0.016	0.016	-0.009	0.001	0.030	0.036	0.042	-0.003
	mr1Y	-0.010	0.006	0.007	0.008	-0.018	-0.004	0.027	0.035	0.042	-0.007
	mr2Y	-0.016	0.000	0.002	0.002	-0.024	-0.006	0.024	0.032	0.039	-0.009
	mr3Y	-0.023	-0.008	-0.006	-0.005	-0.030	-0.009	0.020	0.028	0.035	-0.011
C1.6.5	rotY	0.000	-0.090	-0.119	-0.150	-0.014	0.001	-0.017	-0.026	-0.035	-0.005
	mr1Y	-0.014	-0.100	-0.129	-0.159	-0.024	-0.005	-0.025	-0.034	-0.043	-0.014
	mr2Y	-0.021	-0.106	-0.134	-0.163	-0.031	-0.011	-0.030	-0.038	-0.046	-0.020
	mr3Y	-0.030	-0.113	-0.141	-0.169	-0.039	-0.019	-0.036	-0.043	-0.051	-0.027

Tabella 3.15 Correlazioni tra rotazione Y, temperatura e umidità corrette per i sensori delle travi 5 e 6

CORRELATION BETWEEN ROTATION X AND TEMPERATURE

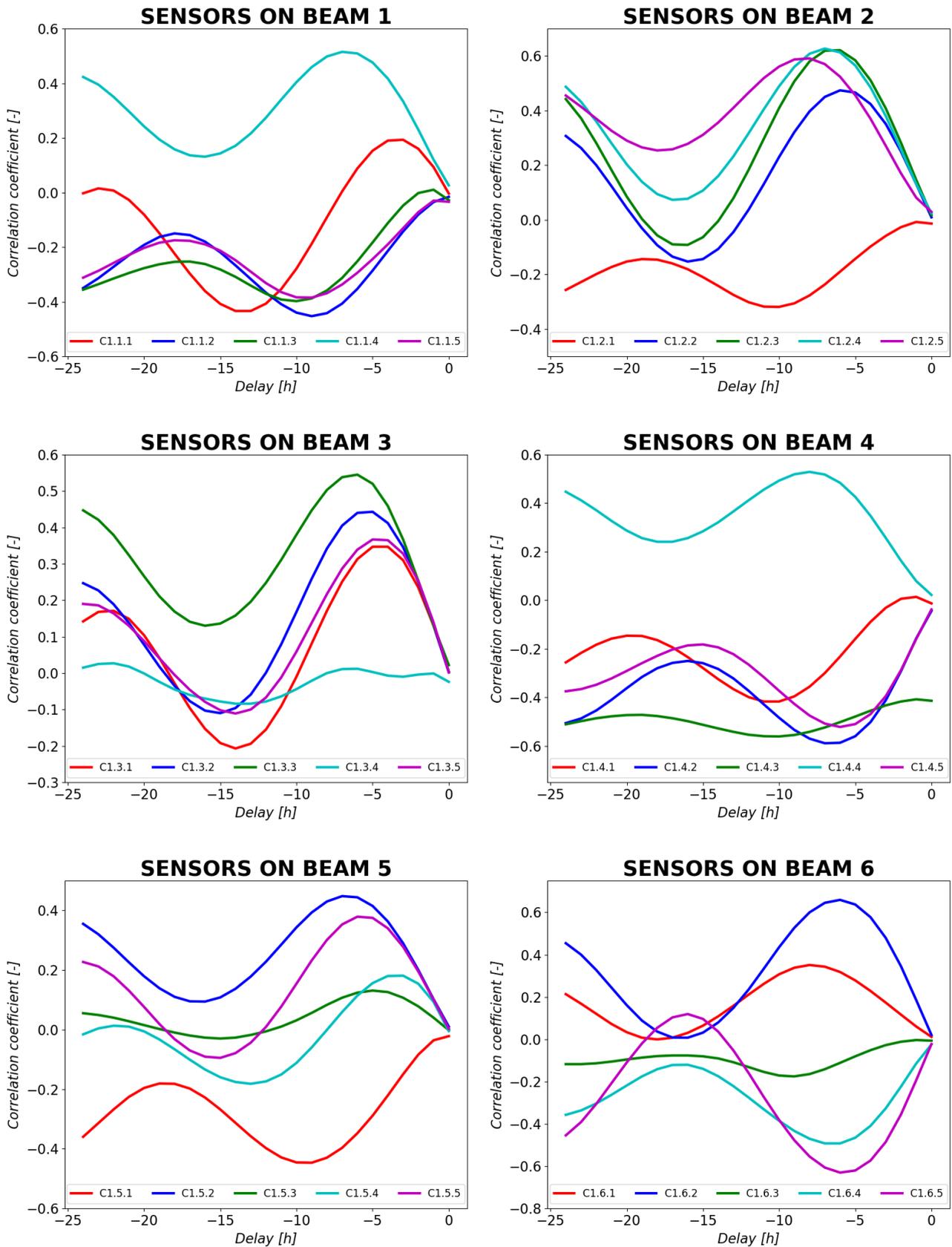


Figura 3.4 Coefficienti di correlazione tra $mr1X$ e $mt24-rn$ in funzione del ritardo

CORRELATION BETWEEN ROTATION X AND HUMIDITY

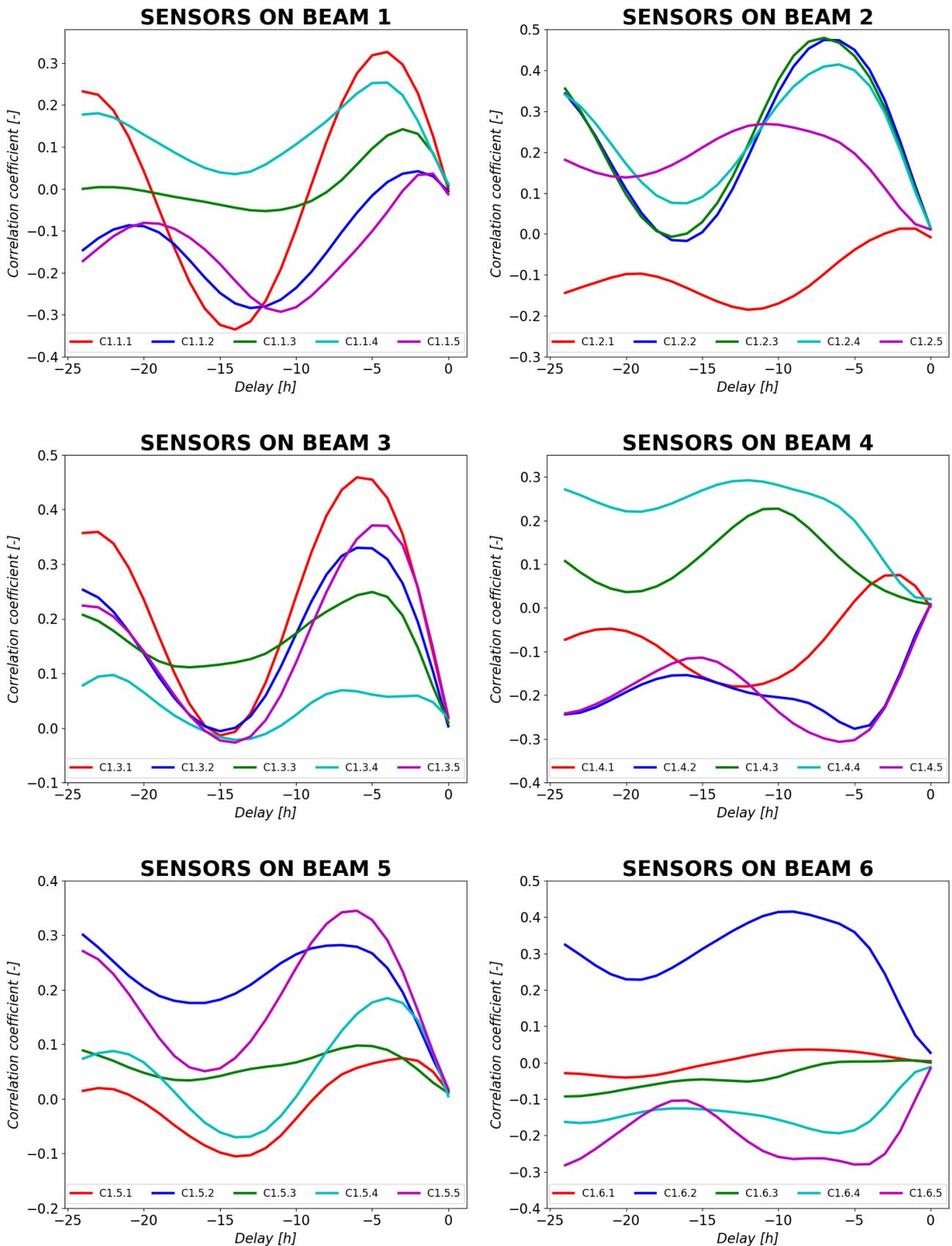


Figura 3.5 Coefficienti di correlazione tra $mr1X$ e μ_{24-rn} in funzione del ritardo

CORRELATION BETWEEN ROTATION Y AND TEMPERATURE

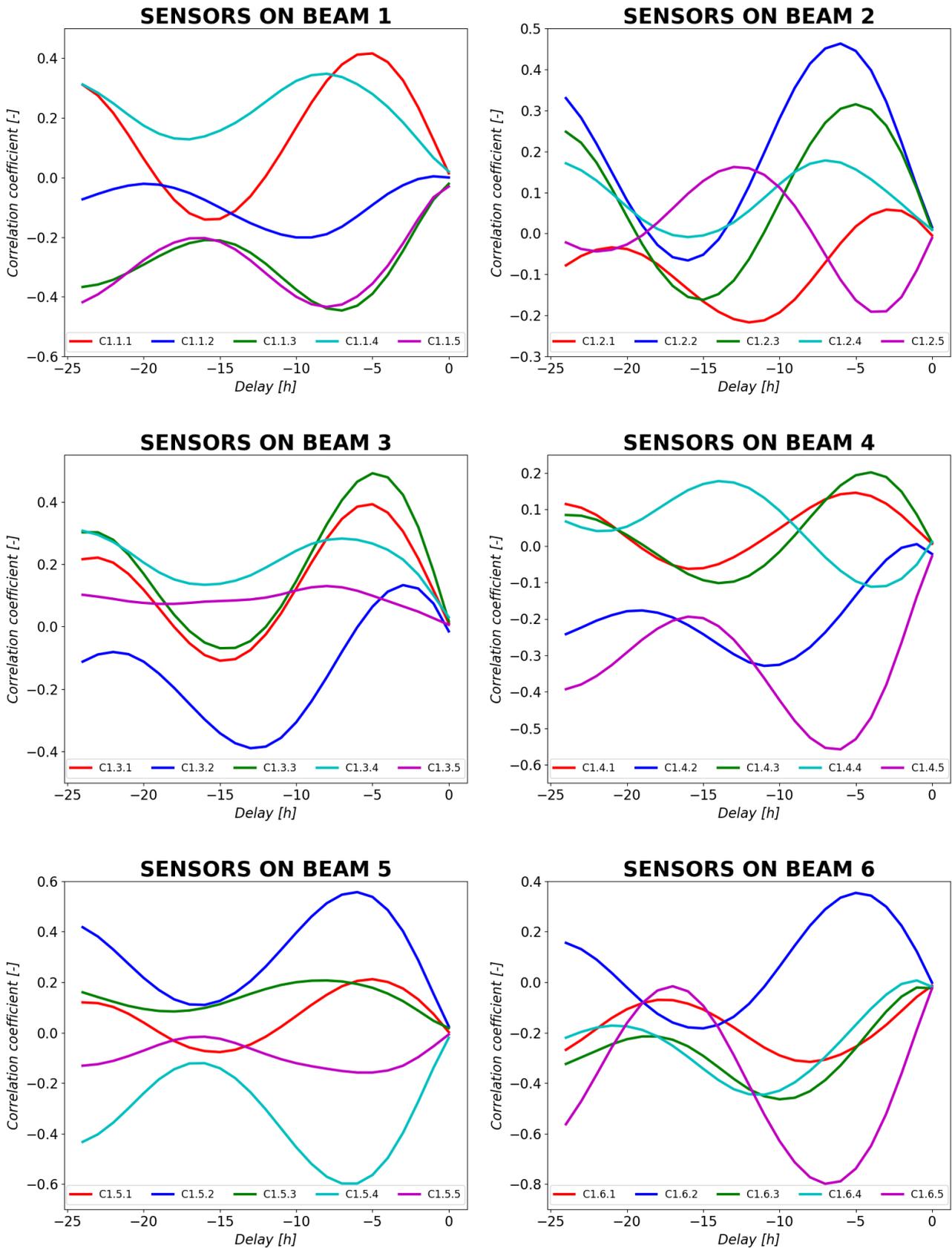


Figura 3.6 Coefficienti di correlazione tra $mr1Y$ e $mt24-rn$ in funzione del ritardo

CORRELATION BETWEEN ROTATION Y AND HUMIDITY

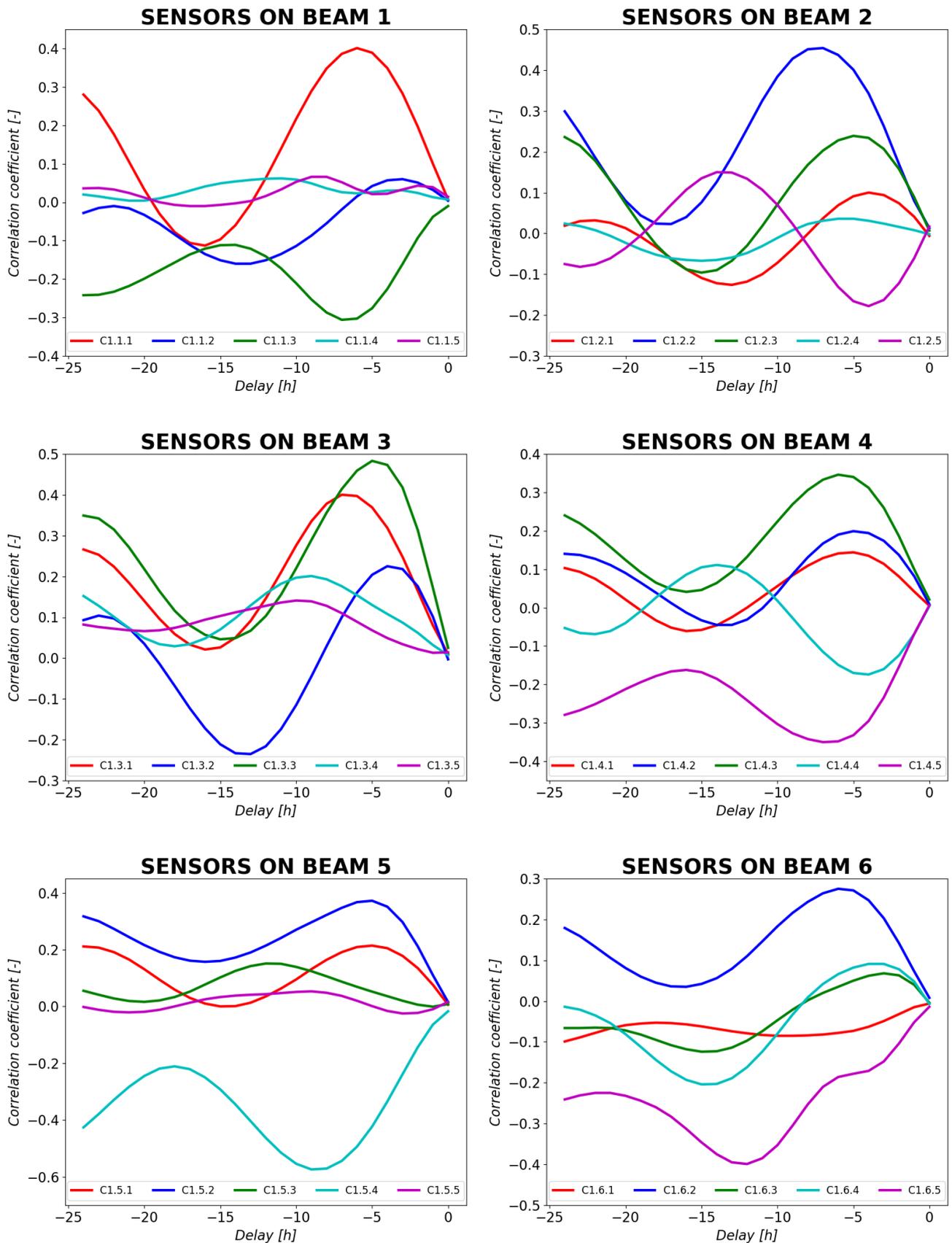


Figura 3.7 Coefficienti di correlazione tra $mr1Y$ e $mu24-rn$ in funzione del ritardo

Osservando i risultati tabellati e graficati, si possono trarre alcune considerazioni. Confrontando i coefficienti di correlazione mostrati nelle Tabelle 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 con quelli riportati nelle Tabelle 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13, si nota immediatamente che questi ultimi hanno valori prossimi allo zero: questo risultato è la conseguenza della minimizzazione effettuata dall'algoritmo di ottimizzazione della deriva istantanea e indica che tutte le correlazioni istantanee sono state rimosse. Ciò è conforme a tutte le previsioni poiché il contributo maggiore all'effetto termo-igrometrico è dovuto all'influenza diretta sugli strumenti, la quale è stata rimossa correggendo il segnale con la formulazione riportata nell'Equazione 3.10.

L'effetto residuo dovuto alle deformazioni impresse sull'impalcato è visibile nei grafici mostrati nelle Figure 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

La maggior parte delle curve hanno un andamento circa sinusoidale (in accordo con la periodicità del fenomeno studiato) con ampiezza e lunghezza d'onda variabile in funzione dello strumento. Infatti, per ognuno dei sensori i segnali di rotazione misurati la temperatura influisce diversamente sia dal punto di vista quantitativo sia dal punto di vista del ritardo con cui si riscontra l'effetto. In altre parole, un'oscillazione termica o igrometrica che agisce sul ponte in un certo istante, comporta un effetto in termine di inflessione dell'impalcato con un diverso ritardo e con una diversa magnitudine a seconda della posizione dello strumento.

Per il caso in studio, per ogni segnale, si sceglie di considerare, tra tutti, il primo picco di correlazione (positivo o negativo che sia) ovvero quello che presenta un ritardo minore con la condizione che se il ritardo è maggiore di 12 ore, il picco viene scartato e si considera la correlazione con ritardo nullo.

Nelle Tabelle 3.16, si riporta, sia per le rotazioni X sia per le rotazioni Y, il numero di sensori che presentano l'influenza termica e igrometrica nei tre diversi range di ritardo mostrati.

EFFETTO TERMICO			EFFETTO IGROMETRICO		
Numero di sensori			Numero di sensori		
Ritardo [h]	Rotazione X	Rotazione Y	Ritardo [h]	Rotazione X	Rotazione Y
$1 \leq n \leq 4$	4	5	$1 \leq n \leq 4$	10	10
$5 \leq n \leq 9$	22	22	$5 \leq n \leq 9$	17	17
$10 \leq n \leq 12$	4	3	$10 \leq n \leq 12$	3	3

Tabella 3.16 Ritardo con cui si presentano gli effetti termico (a) e igrometrico (b)

Per quanto riguarda la temperatura, la maggior parte dei segnali (22 strumenti su 30 nel caso di entrambe le rotazioni pur trattandosi però di strumenti diversi) tende a manifestarne l'effetto con un ritardo che è compreso tra le 5 e le 9 ore.

Anche nel caso dell'effetto igrometrico, la maggioranza dei segnali presenta il primo picco di correlazione che ricade nello stesso range di ritardo. Tuttavia, in questo caso, un buon numero di sensori sembrerebbe invece subire l'influenza delle variazioni di umidità entro le prime 4 ore.

La risposta differita alle variazioni termo-igrometriche risulta dunque essere scarsamente correlata e fortemente dipendente dalla posizione del sensore stesso. Questi risultati non sono fisicamente significativi ma sono coerenti con quanto riscontrato in precedenza poiché il maggior contributo alla correlazione termo-igrometrica è già stato rimosso minimizzando i coefficienti di correlazione con le serie istantanee e mediate senza ritardo e il contributo residuo è basso e variabile.

Questi andamenti scorrelati, uniti ai bassi valori assoluti dei coefficienti di correlazione, suggeriscono che non vi sia un effetto termo-igrometrico differito ben individuabile.

Nonostante ciò, per valutare le modifiche che il segnale subirebbe se esso venisse considerato, si sceglie di procedere alla seconda correzione applicando, nell'ipotesi di svincolamento dalla temperatura, la formulazione mostrata nell'Equazione 3.11 per il generico elemento i di segnale.

$$rot_{kk}[i] = rot_k[i] + DD \cdot (temp[i] - temp_0) \quad (3.11)$$

Dove rot_{kk} è il vettore che contiene il segnale di rotazione doppiamente corretto, rot_k è il vettore che contiene il segnale di rotazione corretto, $temp$ è il vettore che contiene il segnale di temperatura, DD è il valore della deriva termica differita e $temp_0$ è il valore di temperatura misurato a ponte scarico. Ovviamente la stessa formulazione è valida anche per la rimozione dell'effetto dell'umidità utilizzando però il vettore $umid$ e il parametro a ponte scarico $umid_0$.

I parametri a ponte scarico $temp_0$ e $umid_0$ sono gli stessi del caso precedente mentre la deriva differita viene nuovamente ottenuta attraverso un processo di ottimizzazione. In particolare, in questo caso, il valore della deriva differita viene tarato in modo tale da minimizzare il coefficiente di correlazione massimo tra la serie di rotazione ottenuta eseguendo la media mobile centrata su 180 minuti (e dunque smorzando gli effetti istantanei del traffico) e la serie di temperatura ottenuta eseguendo la media mobile sui 120 minuti precedenti con il ritardo (in ogni caso inferiore a 12 ore).

A questo scopo, la funzione *deriva_differita* contiene il metodo della bisezione spiegato nel paragrafo 3.1.4 il quale deve necessitare di ricevere in input all'interno di *File di input utente.txt* (vedi Figura 3.3) gli estremi dell'intervallo iniziale e la precisione per la convergenza. Nelle Tabelle 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20 si riportano, per le rotazioni X e Y, i coefficienti di correlazione massimi riscontrati, il relativo ritardo e i valori ottimizzati delle derivate differite sia termiche sia igrometriche.

	$\rho_{MAX,X,T}$	n [h]	$DD_{X,T}$		$\rho_{MAX,X,T}$	n [h]	$DD_{X,T}$		$\rho_{MAX,X,T}$	n [h]	$DD_{X,T}$
C1.1.1	0.189	3	0.0144	C1.3.1	0.348	5	0.0082	C1.5.1	-0.448	9	-0.0230
C1.1.2	-0.456	9	-0.0154	C1.3.2	0.444	5	0.0201	C1.5.2	0.450	7	0.0063
C1.1.3	-0.403	10	-0.0138	C1.3.3	0.548	6	0.027	C1.5.3	0.132	5	0.0071
C1.1.4	0.519	7	0.02109	C1.3.4	-0.008	3	-0.0002	C1.5.4	0.18	3	0.0045
C1.1.5	-0.388	9	-0.0093	C1.3.5	0.372	5	0.0118	C1.5.5	0.379	6	0.0189
C1.2.1	-0.322	10	-0.0043	C1.4.1	-0.421	11	-0.0130	C1.6.1	0.350	8	0.0100
C1.2.2	0.476	6	0.0255	C1.4.2	-0.598	7	-0.0260	C1.6.2	0.666	6	0.0378
C1.2.3	0.625	6	0.0288	C1.4.3	-0.560	10	-0.1996	C1.6.3	-0.176	9	-0.0050
C1.2.4	0.632	7	0.0293	C1.4.4	-0.534	8	0.0078	C1.6.4	-0.497	7	-0.0090
C1.2.5	0.595	8	0.0532	C1.4.5	-0.531	6	-0.0180	C1.6.5	-0.638	6	-0.0329

Tabella 3.17 Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva termica differita per le rotazioni X

	$\rho_{MAX,Y,T}$	n [h]	$DD_{Y,T}$		$\rho_{MAX,Y,T}$	n [h]	$DD_{Y,T}$		$\rho_{MAX,Y,T}$	n [h]	$DD_{Y,T}$
C1.1.1	0.416	5	0.0073	C1.3.1	0.393	5	0.0072	C1.5.1	0.212	5	0.0021
C1.1.2	-0.202	9	-0.002	C1.3.2	0.129	3	0.0016	C1.5.2	0.562	6	0.0082
C1.1.3	-0.448	7	-0.0050	C1.3.3	0.497	5	0.0082	C1.5.3	0.210	8	0.0032
C1.1.4	0.349	8	0.0051	C1.3.4	0.286	7	0.0021	C1.5.4	-0.604	7	-0.0101
C1.1.5	-0.435	8	-0.0205	C1.3.5	0.131	8	0.0013	C1.5.5	-0.158	5	-0.0027
C1.2.1	0.056	3	-0.0024	C1.4.1	0.146	5	0.0002	C1.6.1	-0.315	8	-0.0060
C1.2.2	0.466	6	0.0060	C1.4.2	-0.330	11	-0.0032	C1.6.2	0.355	5	0.0043
C1.2.3	0.316	5	0.0038	C1.4.3	0.201	4	-0.0003	C1.6.3	-0.467	10	-0.0061
C1.2.4	0.179	7	0.0017	C1.4.4	-0.110	4	0.0001	C1.6.4	-0.449	11	-0.0033
C1.2.5	-0.190	4	0.0001	C1.4.5	-0.563	6	-0.0152	C1.6.5	-0.803	7	-0.0388

Tabella 3.18 Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva termica differita per le rotazioni Y

	$\rho_{MAX,X,U}$	n [h]	$DD_{X,U}$		$\rho_{MAX,X,U}$	n [h]	$DD_{X,U}$		$\rho_{MAX,X,U}$	n [h]	$DD_{X,U}$
C1.1.1	0.332	4	0.0346	C1.3.1	0.463	6	0.0181	C1.5.1	0.074	3	0.0047
C1.1.2	0.040	2	0.0026	C1.3.2	0.332	6	0.0230	C1.5.2	0.285	7	0.0064
C1.1.3	0.141	3	0.0065	C1.3.3	0.250	5	0.0130	C1.5.3	0.099	6	0.0108
C1.1.4	0.251	5	0.0122	C1.3.4	0.060	3	0.0012	C1.5.4	0.185	4	0.0087
C1.1.5	0.029	1	0.0021	C1.3.5	0.377	5	0.0192	C1.5.5	0.346	6	0.0261
C1.2.1	0.011	2	0.0002	C1.4.1	0.072	2	0.0038	C1.6.1	0.036	8	0.0015
C1.2.2	0.476	6	0.0441	C1.4.2	-0.282	5	-0.0172	C1.6.2	0.424	9	0.0245
C1.2.3	0.483	5	0.0265	C1.4.3	0.224	10	0.1105	C1.6.3	0.006	2	0.0002
C1.2.4	0.418	6	0.0216	C1.4.4	0.296	12	0.0051	C1.6.4	-0.196	6	-0.0049
C1.2.5	0.271	11	0.0309	C1.4.5	-0.315	6	-0.0149	C1.6.5	-0.287	5	-0.0165

Tabella 3.19 Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva igrometrica differita per le rotazioni X

	$\rho_{MAX,Y,U}$	n [h]	$DD_{Y,U}$		$\rho_{MAX,Y,U}$	n [h]	$DD_{Y,U}$		$\rho_{MAX,Y,U}$	n [h]	$DD_{Y,U}$
C1.1.1	0.401	6	0.0097	C1.3.1	0.401	7	0.0114	C1.5.1	0.214	5	0.0042
C1.1.2	0.059	3	0.0010	C1.3.2	0.223	4	0.0077	C1.5.2	0.376	5	0.0076
C1.1.3	-0.307	7	-0.0025	C1.3.3	0.491	5	0.0129	C1.5.3	0.153	12	0.0025
C1.1.4	0.030	4	0.0005	C1.3.4	0.204	9	0.0014	C1.5.4	-0.578	9	-0.0140
C1.1.5	0.041	1	0.0029	C1.3.5	0.141	10	0.0017	C1.5.5	-0.024	3	0.0004
C1.2.1	0.099	4	0.0016	C1.4.1	0.144	5	0.0019	C1.6.1	-0.090	9	-0.0025
C1.2.2	0.458	7	0.0106	C1.4.2	0.199	5	0.0049	C1.6.2	0.277	6	0.00474
C1.2.3	0.240	5	0.0042	C1.4.3	0.346	6	0.0072	C1.6.3	0.068	3	0.0011
C1.2.4	0.036	6	0.0005	C1.4.4	-0.174	4	0.0014	C1.6.4	0.091	4	0.0011
C1.2.5	-0.177	4	0.0024	C1.4.5	-0.356	7	-0.0112	C1.6.5	-0.404	12	-0.0079

Tabella 3.20 Coefficienti di correlazione massimi, ritardi e deriva igrometrica differita per le rotazioni Y

Se si confrontano le derivate differite con le derivate istantanee riportate nelle Tabelle 3.7, 3.8 e 3.9, si vede chiaramente che i valori sono decisamente inferiori: questo è nuovamente indice del fatto che le modifiche vengono sostanzialmente eseguite in fase di prima correzione e che la seconda fase è più di carattere speculativo poiché, come specificato, il fenomeno non è ben definito e vengono effettuate modifiche che probabilmente sono inferiori alla soglia di rumore degli strumenti utilizzati. Con l'applicazione della formulazione riportata nell'Equazione 3.11 ai due segnali di rotazione utilizzando i parametri di deriva differita riportati nelle Tabelle 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20, si ottengono infine i segnali di rotazione doppiamente corretti identificati con la dicitura *kk*.

Anche queste rotazioni doppiamente corrette vengono passate alla funzione *calcoli_rotazioni* presente all'interno del modulo secondario *statistica.py* per calcolarne il valore medio (*mediakk*), lo scarto quadratico medio (*sqmkk*), le medie mobili sui 3 intervalli scelti dall'utente (*mrkk1*, *mrkk2* e *mrkk3*) e la differenza con la media mobile su 180 minuti (*diff_mrkk2*).

Come prevedibile, i valori di media e scarto quadratico medio non sono molto differenti rispetto ai segnali corretti una volta sola.

Per completezza, vengono poi ancora calcolati i coefficienti di correlazione tra le serie delle rotazioni doppiamente corrette istantanee (*rotkk*) e mediate su 140 (*mrkk1*), 180 (*mrkk2*) e 220 (*mrkk3*) minuti e le serie di temperatura e di umidità istantanee (*temp* e *umid*) e mediate sui 60 (*mt12* e *mu12*), 80 (*mt16* e *mu16*), 100 (*mt20* e *mu20*) e 120 (*mt24* e *mu24*) minuti precedenti con e senza ritardo *n* variabile da 1 a 23 ore. Ovviamente, questi ultimi saranno molto bassi poiché abbiamo rimosso tutte le correlazioni e, in particolare si aggirano mediamente tra 0 e 0.1 con qualche raro picco 0.2.

Al termine del calcolo, tutti gli algoritmi di correzione sono stati eseguiti e teoricamente si ottengono in output dei segnali non più affetti da errori o da tendenze anomale causate da sollecitazioni esterne. In Figura 3.8, si riporta, per lo strumento C1.1.1, il confronto tra il segnale di rotazione X grezzo e dopo la prima correzione e la seconda correzione (dai segnali di temperatura e di umidità).

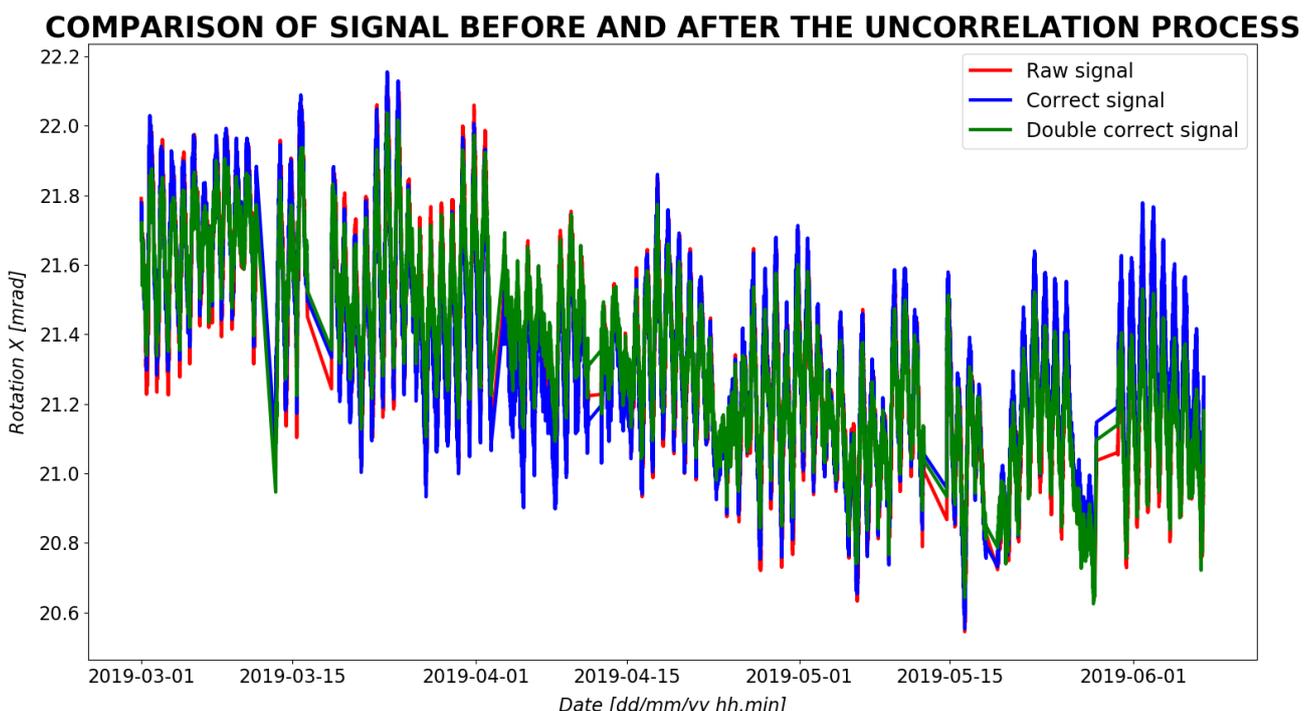


Figura 3.8 Segnale di rotazione X del sensore C1.1.1 prima e dopo la rimozione delle correlazioni

3.1.6 Salvataggio dei risultati

Al termine delle operazioni di rimozione delle correlazioni, analogamente a quanto spiegato nel paragrafo 2.4 per la pulizia, si salvano i risultati dell'analisi sia in forma grafica sia in forma numerica. Per prima cosa, l'algoritmo aggiunge all'interno della directory chiamata nome *sensore_immagini di output* presente all'interno di ogni cartella una terza e una quarta cartella chiamate 2) *Dati scorrelati da temperatura* e 3) *Dati scorrelati da temperatura e umidità*. All'interno di queste cartelle, verranno salvati i grafici di output relativi alle rimozioni delle correlazioni rispettivamente. In particolare, in ogni cartella vengono riportati per ognuna delle rotazioni misurate, 6 diverse tipologie di grafico. I primi 3 grafici mostrano sovrapposti, i segnali delle rotazioni istantanee e con media mobile centrata su 180 minuti (ovvero 37 elementi) e il segnale relativo alla grandezza di cui si vuole rimuovere l'influenza. In particolare, il primo grafico (di cui si riporta l'esempio del sensore C1.1.1 in Figura 3.9) è relativo ai segnali grezzi, il secondo (di cui si riporta l'esempio del sensore C1.1.1 in Figura 3.10) è relativo ai segnali corretti e il terzo (di cui si riporta l'esempio del sensore C1.1.1 in Figura 3.11) è relativo ai segnali doppiamente corretti. In questi grafici di esempio, si sta effettuando la rimozione della correlazione con il segnale di temperatura.

In tutti i grafici, si vede chiaramente che le curve relative alle medie mobili presentano delle oscillazioni meno ampie rispetto alle curve relative ai valori istantanei in quanto le medie hanno l'effetto di rimuovere l'effetto istantaneo del traffico spalmandolo sui 37 elementi adiacenti. Inoltre, si vede chiaramente che le tendenze dei segnali di rotazione sono decisamente influenzate dalla variazione termica stagionale in quanto, l'innalzamento delle temperature medie che si verifica dal 15 Aprile comporta una riduzione delle rotazioni medie. Questo effetto stagionale non può essere rimosso poiché si hanno a disposizione i dati su soli 4 mesi di monitoraggio; tuttavia esso viene smorzato ed è infatti meno evidente nei segnali corretto e doppiamente corretto.

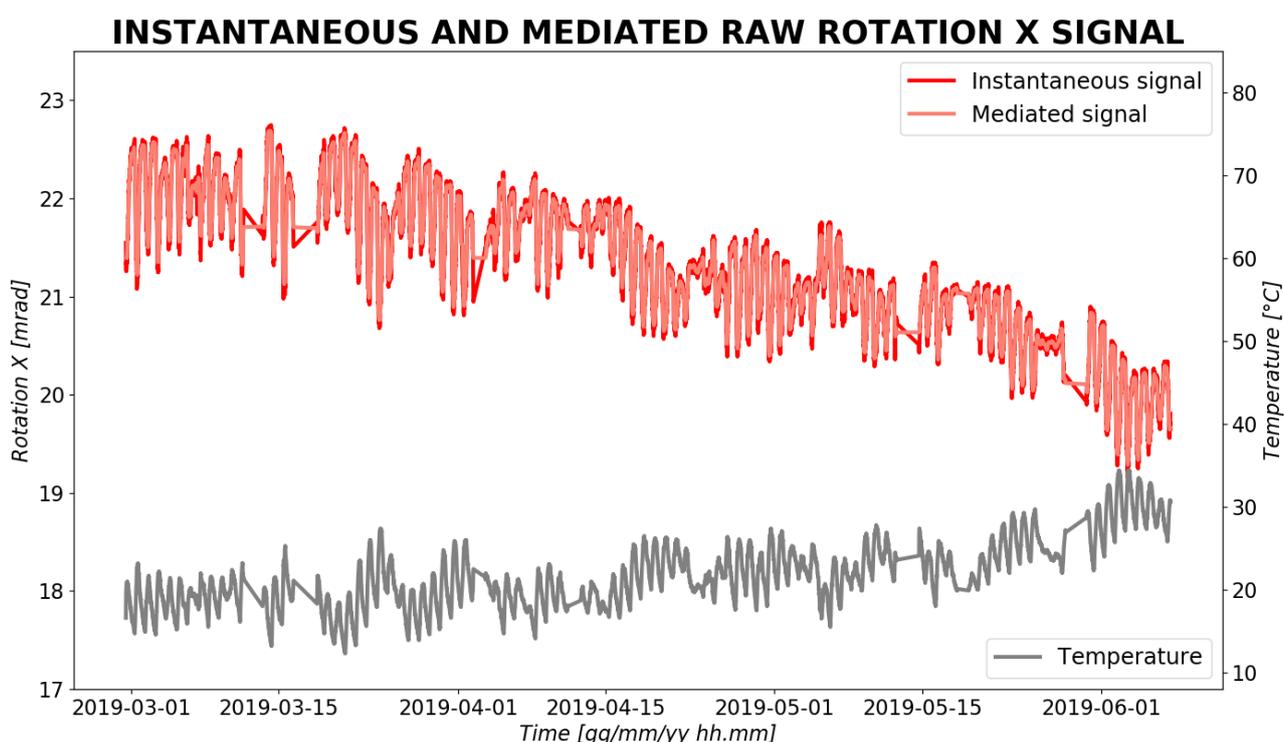


Figura 3.9 Segnali grezzi di rotazione X istantanea e mediata del sensore C1.1.1

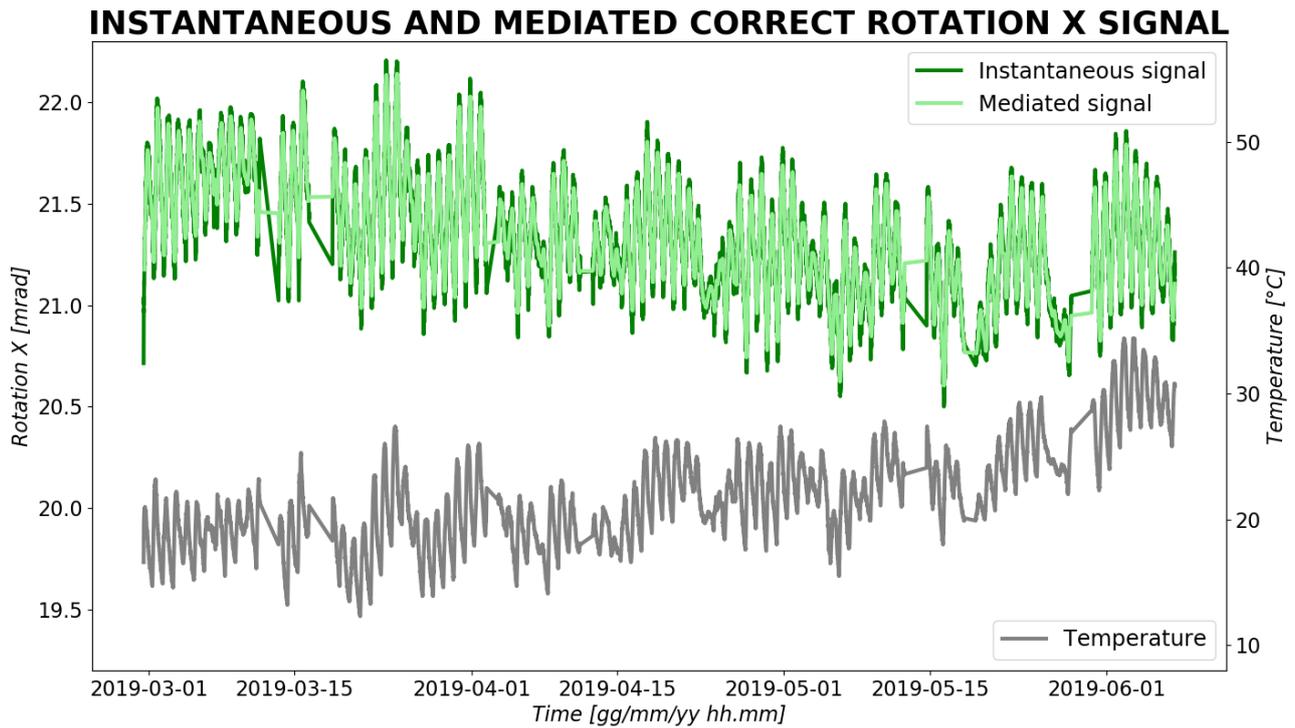


Figura 3.10 Segnali corretti di rotazione X istantanea e mediata del sensore C1.1.1

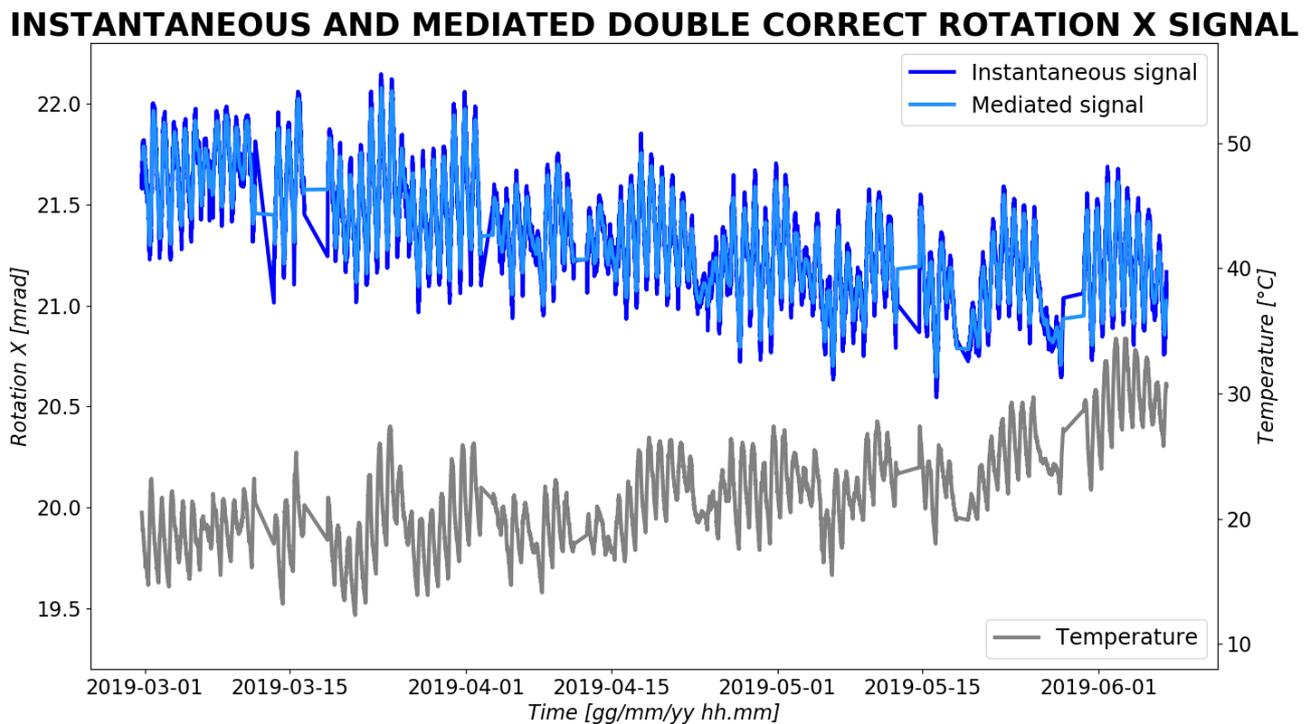


Figura 3.11 Segnali doppiamente corretti di rotazione X istantanea e mediata del sensore C1.1.1

Il quarto grafico salvato (di cui viene mostrato un esempio in Figura 3.12) mette invece a confronto tutte le serie relative alla generica rotazione ottenute eseguendo le medie mobili centrate su 180 minuti (ovvero su 37 elementi di segnale) e il segnale relativo alla grandezza rispetto alla quale si sta eseguendo la scorrelazione. Prima di tutto si può notare, che i segnali corretto e doppiamente corretto sono quasi uguali tra loro poiché, come già specificato in precedenza, il contributo maggiore è dato dall'influenza sulla strumentazione la quale è già stata rimossa nella prima fase di correzione. L'effetto ritardato misurato dagli strumenti dovuto invece all'inflessione dell'impalcato sotto le azioni termiche, pur essendo presente, è viceversa più blando e, di conseguenza, la seconda fase di correzione del segnale non comporta una modifica rilevante del segnale.

Inoltre, si vede come l'effetto termico stagionale sia decisamente marcato nella serie relativa alle rotazioni grezze e viceversa molto più lieve nelle serie relative alle rotazioni corrette e doppiamente corrette. Questo particolare è indice del fatto che il processo di rimozione della correlazione è andato a buon fine e che, al termine dell'analisi, il segnale risultante risulta decisamente più stabile.

Il quinto grafico salvato (di cui viene mostrato un esempio in Figura 3.13) mostra invece le serie ottenute dalla differenza tra i segnali delle rotazioni istantanee e mediate (*diff_mr2*) prima e dopo la correzione. Osservando le curve, si nota immediatamente come questa differenza sia decisamente inferiore nel caso di rotazioni corrette rispetto al caso di rotazioni grezze; questo è un ulteriore indice dell'incremento di stabilità che il segnale acquista dopo l'algoritmo di scorrelazione.

Infine viene salvato un sesto tipo di grafico (di cui è riportato un esempio in Figura 3.14) che mette a confronto, su una finestra temporale ristretta, il segnale delle rotazioni istantanee con i segnali delle medie mobili su 180 minuti per i dati grezzi, corretti e doppiamente corretti per mostrare ancora una volta che, anche localmente, il segnale corretto è decisamente più stabile del segnale grezzo.

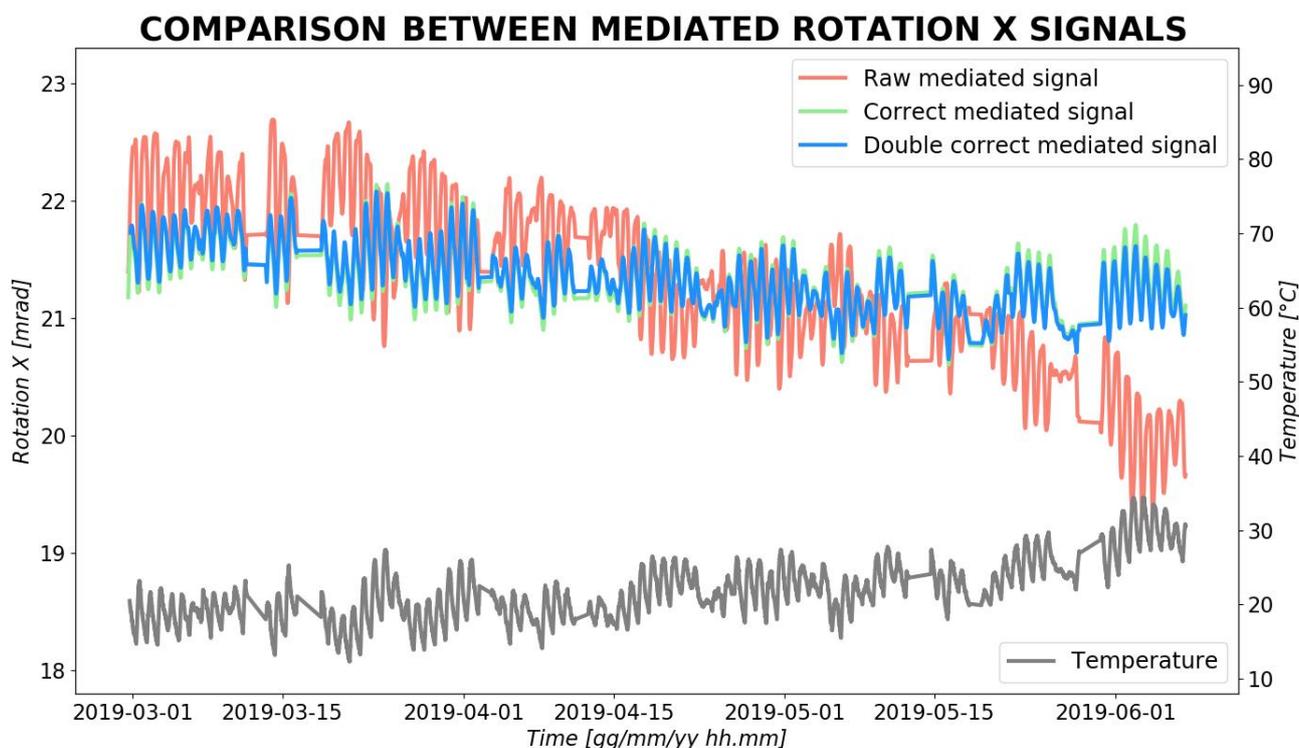


Figura 3.12 Segnali mediati di rotazione X grezzi, corretti e doppiamente corretti del sensore C1.1.1

DIFFERENCE OF INSTANTANEOUS AND MEDIATED SIGNALS BEFORE AND AFTER THE CORRECTION

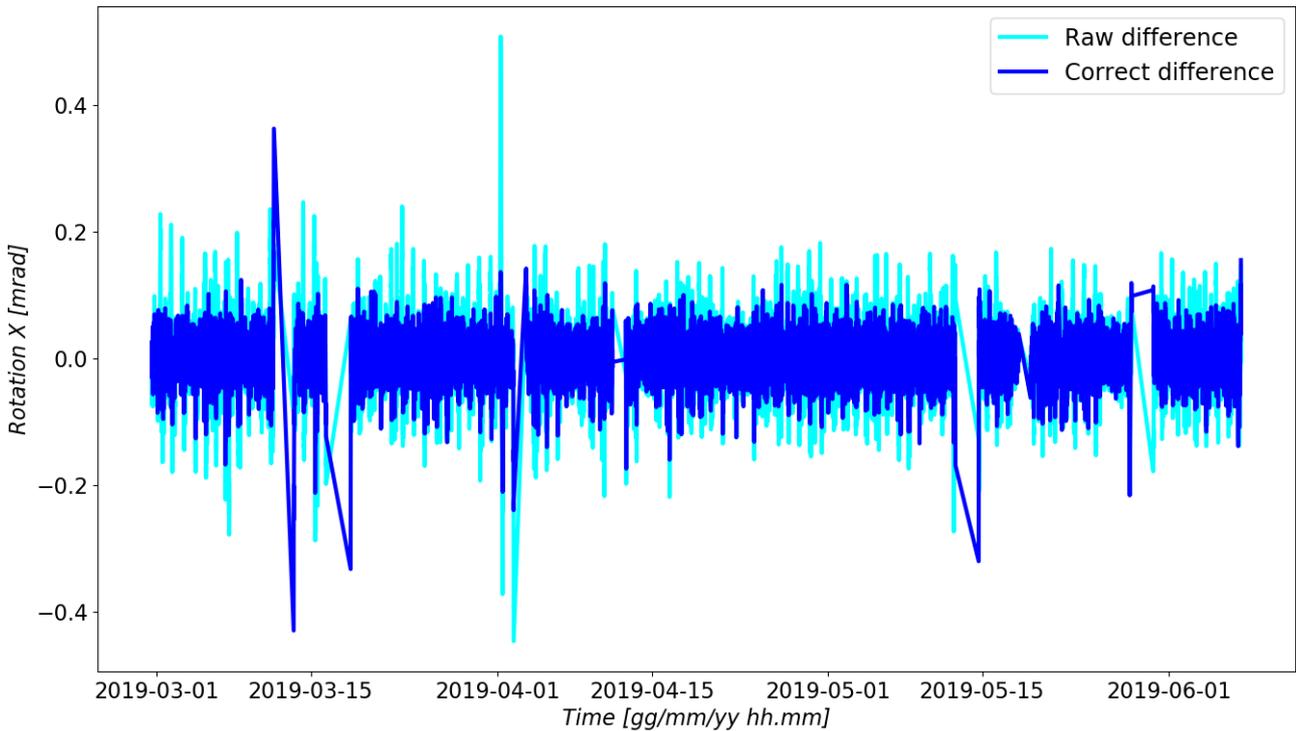


Figura 3.13 Segnali di rotazione X 'diff_mr2' e 'diff_mr2k' del sensore C1.1.1

COMPARISON BETWEEN INSTANTANEOUS AND MEDIATED ROTATION X SIGNALS

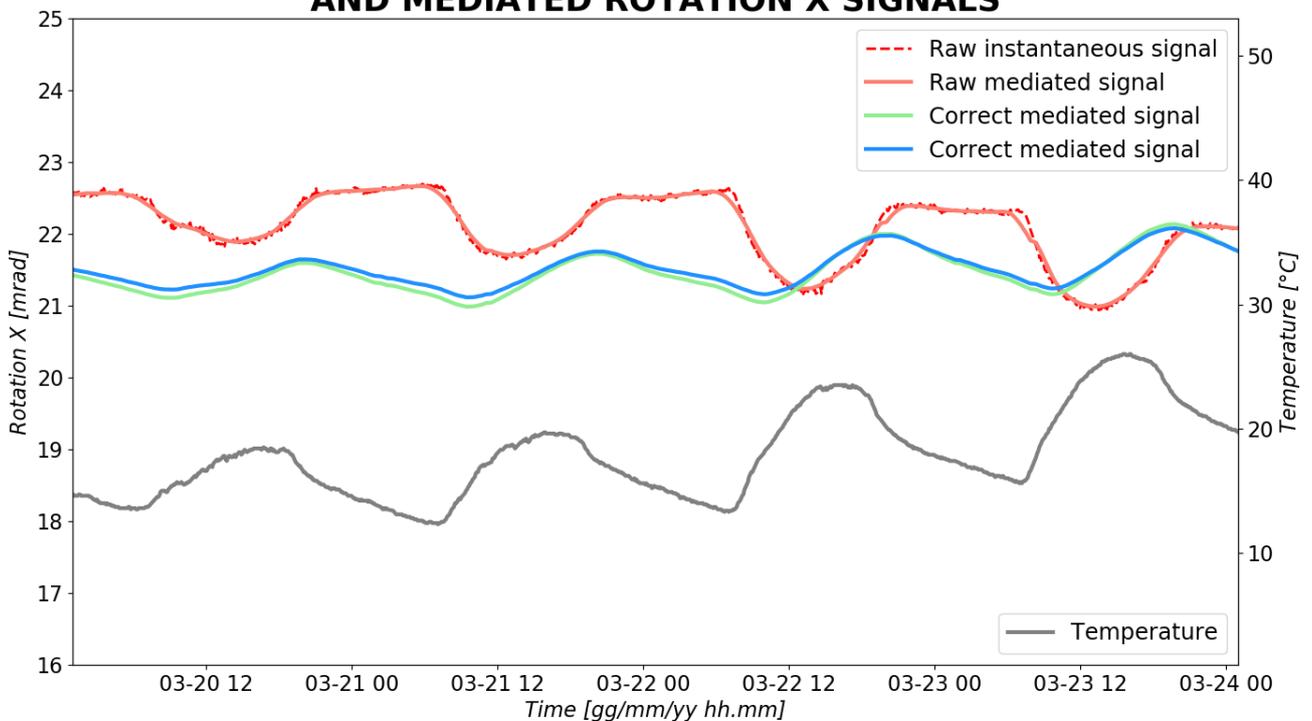


Figura 3.14 Segnali di rotazione istantanei e mediati del sensore C1.1.1 dal 20/03/2019 al 24/03/2019

Come già specificato, tali grafici verranno salvati sia per la rotazione X che per la rotazione Y nelle sottocartelle create all'interno delle directory dedicate al generico strumento: ognuna delle due cartelle conterrà almeno 12 grafici (in funzione del numero di intervalli temporali segnalati dall'utente) relativi al processo di scorrelazione da una delle grandezze influenzanti.

Inoltre, verrà disposta una cartella chiamata *RISULTATI*, il cui percorso viene deciso dall'utente come mostrato in Figura 1.14, che sarà destinata al salvataggio dei risultati comuni a tutti gli strumenti; in particolare, essa contiene i grafici correlazione-ritardo mostrati nelle Figure 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 e due file Excel che contengono i risultati numerici del processo di svincolamento da temperatura e umidità. I due file si chiamano rispettivamente *risultati svincolati da temperatura.xls* e *risultati svincolati da temperatura e umidità.xls* e avranno identico layout. Essi conterranno 4 fogli denominati *risultati*, *coefficienti correlazione raw*, *coefficienti di correlazione k* e *coefficienti di correlazione kk*.

Il primo file è destinato al salvataggio dei risultati generici e conterrà dunque due tabelle (una per la rotazione X e una per la rotazione Y) aventi un numero di righe pari al numero di sensori analizzati e 13 colonne che conterranno il nome dei sensori, le derive istantanea e differita e il ritardo associato alla deriva differita. Inoltre, per i 3 tipi di segnali (grezzi, corretti e doppiamente, corretti), esse conterranno il valore medio e lo scarto quadratico medio dei segnali istantanei e lo scarto quadratico medio del segnale ottenuto dalla differenza tra segnale istantaneo e segnale mediato su 180 minuti. Il secondo, il terzo e il quarto foglio sono invece identici con l'unica differenza di contenere i risultati dell'analisi dei segnali rispettivamente grezzi, corretti e doppiamente corretti. In particolare, essi sono dedicati al salvataggio dei coefficienti di correlazione e contengono due tabelle (una per la rotazione X e una per la rotazione Y) costituite dalle serie relative alla rotazione sulle righe e dalle serie relative alla temperatura (o all'umidità) sulle colonne. Coerentemente a quanto spiegato nei paragrafi precedenti, si hanno 4 righe per ognuno dei sensori e 27 colonne nella cui cella di intersezione è appunto contenuto il relativo coefficiente di correlazione.

Riassumendo, salvati all'interno della cartella *RISULTATI*, nel caso in studio, saranno dunque presenti due file Excel (uno per la scorrelazione dalla temperatura e l'altro per la scorrelazione dall'umidità), i quali conterranno 4 fogli ciascuno, di cui, il primo contiene due tabelle aventi 30 righe e 13 colonne riempite con i risultati generici dell'analisi, mentre il secondo, il terzo e il quarto contengono due tabelle aventi 120 righe e 27 colonne riempite con i diversi coefficienti di correlazione calcolati.

Infine, all'interno della sottocartella chiamata *nome_sensore_Segnali modificati* presente all'interno di ognuna delle directory dedicate al singolo sensore, vengono salvati i segnali man mano che vengono modificati. In particolare, ai 4 file csv già presenti (vedi paragrafo 2.4.2), si aggiungono 4 ulteriori file contenenti i segnali relativi alla rotazione X e alla rotazione Y in uscita da ogni fase degli algoritmi di scorrelazione (solo alla rotazione X nel caso degli strumenti di tipo B) corredati dal riferimento temporale in formato Unix Timestamp. In tal modo, qualora lo desideri, l'utente ha nuovamente la possibilità di estrarli e utilizzarli esternamente.

I file vengono nominati come segue: 5) *nome_sensore_singolarmente scorrelato da temperatura.csv*, 6) *nome_sensore_doppiamente scorrelato da temperatura.csv*, 7) *nome_sensore_doppiamente scorrelato da temperatura e singolarmente scorrelati da umidità.csv* e 8) *nome_sensore_doppiamente scorrelato da temperatura e umidità*.

3.2 Analisi nel dominio della frequenza

Un segnale $s(t)$ è, per definizione, la rappresentazione di una qualsiasi grandezza fisica che varia nel tempo in maniera deterministica o aleatoria. Allora, anche i segnali misurati dagli strumenti installati dal ponte in studio sono inclusi in questa definizione e possono pertanto essere trattati rigorosamente utilizzando l'approccio della teoria dei segnali.

3.2.1 Trasformata di Fourier

In particolare, al termine degli algoritmi di pulizia e di scorrelazione dei segnali, il codice prevede l'analisi dei segnali di rotazione X e Y nel dominio della frequenza e dunque la trasformata di Fourier. In altre parole, il generico segnale s subisce una trasformata integrale e viene riscritto in funzione della frequenza mediante la scomposizione nelle infinite armoniche di ampiezza infinitesima. Nelle Equazioni 3.12 e 3.13, viene mostrato il passaggio matematico dal dominio dei tempi al dominio della frequenza (trasformata di Fourier) e dal dominio delle frequenze al dominio dei tempi (antitrasformata di Fourier).

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) \cdot e^{j \cdot 2\pi f t} df \quad (3.12)$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi f t} dt \quad (3.13)$$

Dove $s(t)$ e $S(f)$ sono le espressioni del generico segnale s scritte rispettivamente in funzione del tempo e della frequenza, j è l'unità immaginaria e $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione della funzione esponenziale. Tuttavia, è necessario tenere in considerazione che i segnali di rotazione (grezzi, corretti e doppiamente corretti) non sono continui ma hanno un tempo di campionamento pari a 5 minuti (a cui corrisponde una frequenza di campionamento di 0,0033 Hertz). In alcuni casi, essi presentano anche delle interruzioni dovute alla rimozione dei tratti a valore costante effettuata preliminarmente. Allora, essi devono essere trattati come discreti e vengono dunque definiti nel dominio dei tempi come il prodotto di un treno di impulsi e del generico segnale s come mostrato nell'Equazione 3.14.

$$s_{\delta}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} T_c \cdot s(nT_c) \cdot \delta(t - nT_c) = T_c \cdot s(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_c) \quad (3.14)$$

Dove T_c è il tempo di campionamento del segnale e la funzione $\delta(t - nT_c)$ è la delta di Dirac che rappresenta il generico impulso all'istante nT_c . In altre parole, il segnale campionato viene ottenuto come un treno di impulsi δ_n con ampiezza pari al segnale s e con posizione in funzione proprio di δ . Allora, applicando la trasformata di Fourier al segnale campionato così definito, si ottiene la relazione mostrata nell'Equazione 3.15, la quale verrà applicata sui segnali relativi ai dati di monitoraggio.

La trasformata di Fourier del segnale campionato restituirà, nel dominio della frequenza, una replica dello stesso segnale (pari a quello che si avrebbe se il segnale nel dominio dei tempi fosse continuo) dove ogni replica ha dominio sull'asse delle ascisse pari alla frequenza di campionamento f_c e la cui massima frequenza è chiamata banda utile B_f .

$$S_\delta(f) = \mathcal{F}(s_\delta(t)) = T_c \cdot S(f) \frac{1}{T_c} \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nf_c) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S(f - nf_c) \quad (3.15)$$

Esistono due funzioni implementate per l'applicazione dell'operatore di Fourier \mathcal{F} ad un segnale discreto: la funzione *DFT* (Discrete Fourier Transform) e la funzione *FFT* (Fast Fourier Transform). Entrambe consentono di effettuare una trasformata discreta e differiscono tra loro per l'onere computazionale che è pari rispettivamente a N^2 per la prima e a $N \cdot \log N$ per la seconda, ragione per cui solitamente viene utilizzata la seconda dato l'elevato grado di accuratezza che garantisce.

Dunque, per ogni strumento, all'interno della funzione *fourier* definita all'interno del blocco secondario *Grafici.py*, viene applicata la *FFT* (e in particolare, su Python, la funzione *fft(s)* per trasformare le ampiezze e la funzione *fftfreq(N, T_c)* per trasformare le frequenze) alle 3 serie di dati relative alle rotazioni X e Y (grezze, corrette e doppiamente corrette).

Al termine del calcolo, le frequenze ottenute vengono moltiplicate per 10000 per aumentare la leggibilità dell'asse delle ascisse e si salvano i grafici che mostrano i segnali nel dominio della frequenza (solo per frequenze positive) all'interno delle sottocartelle 2) *Dati scorrelati da temperatura* e 3) *Dati scorrelati da temperatura e umidità* (poiché l'analisi nel dominio della frequenza viene effettuata al termine di entrambi i processi di scorrelazione). In Figura 3.15, si riportano i 3 segnali di rotazione X nel dominio della frequenza misurati dallo strumento C1.1.1.

Osservando i grafici di output, si possono ricavare molte informazioni riguardanti le frequenze e i periodi fondamentali dei segnali in studio. Infatti, tutte le curve sono caratterizzati da dei picchi nell'ampiezza della trasformata in corrispondenza delle frequenze comprese mediamente tra $0.14 \cdot 10^{-4}$ e $0.16 \cdot 10^{-4}$ Hertz. Assumendo un valore medio di $0.15 \cdot 10^{-4}$ Hertz, si calcola il periodo fondamentale medio T_0 dei segnali come mostrato nell'Equazione 3.16.

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{0.15 \cdot 10^{-4}} = 6.67 \cdot 10^{-4} s \quad (3.16)$$

Tale picco è dunque relativo ad un'armonica avente periodo di 18 ore (ovvero poco meno di un giorno). Il risultato è perfettamente plausibile in quanto l'armonica è dovuta alle escursioni termiche misurate che, come si può vedere nel grafico mostrato in Figura 3.15, hanno periodo di circa 24 ore. Oltre a questa armonica dominante, è possibile notarne una seconda in corrispondenza della frequenza di circa $0.02 \cdot 10^{-4}$ Hertz a cui corrisponde un periodo di circa 5.8 giorni (ovvero poco meno di una settimana). Tale picco è decisamente inferiore al primo e potrebbe essere dovuto alla variazione del traffico durante il weekend.

In ogni caso, si noti che, man mano che si procede con gli algoritmi di scorrelazione, il picco relativo all'effetto termico diminuisce mentre, viceversa, si fa sempre più marcato quello dovuto al traffico. Questo risultato è un ulteriore indice della correttezza degli algoritmi di correzione del segnale poiché si ottiene un conseguente smorzamento dell'effetto della temperatura, il quale copriva l'effetto di minor entità del traffico nel segnale grezzo.

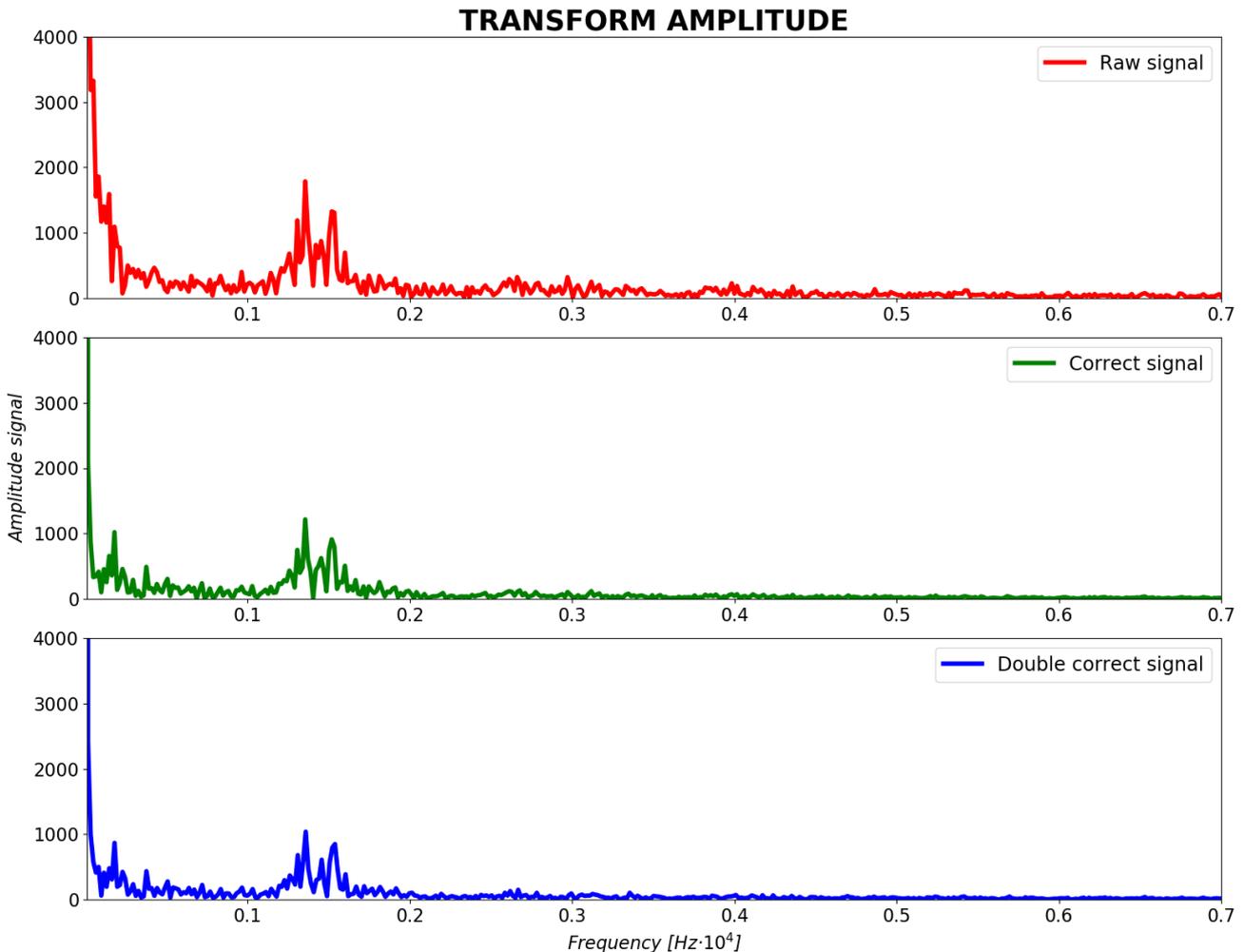


Figura 3.15 Ampiezze dei segnali di rotazione X grezzi, corretti e doppiamente corretti

3.2.2 Densità spettrale di energia

Dopo aver salvato i grafici relativi alla trasformata di Fourier, il codice prevede anche il calcolo della *ESD* (Energy Spectral Density) la quale viene definita, come mostrato nell'Equazione 3.17, come il quadrato dell'ampiezza della trasformata di Fourier del segnale $s(t)$.

$$ESD = E(f) = |S(f)|^2 \quad (3.17)$$

Questo parametro, chiamato anche spettro di energia, descrive la distribuzione di energia associata alle varie componenti della frequenza che compongono il segnale indicando le armoniche principali.

Ovviamente, l'energia del segnale è globalmente equivalente sia nel dominio dei tempi sia nel dominio delle frequenze come specificato dall'uguaglianza di Parseval mostrata nell'equazione 3.18.

$$E_s = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt \quad (3.18)$$

I grafici relativi all'ESD, calcolati per le rotazioni X e Y al termine della correlazione sia dalla temperatura sia dall'umidità, vengono salvati nella stessa cartella che già contiene i grafici dell'ampiezza della trasformata. In Figura 3.16, si riporta l'esempio relativo al segnale di rotazione X (grezzo, corretto e doppiamente corretto) misurato dallo strumento C1.1.1 e scorrelato dalla temperatura. Osservando i grafici, possono essere fatte le stesse considerazioni fatte in precedenza per la Figura 3.15 poiché si tratta dello stesso andamento amplificato dalla potenza e perché sono evidenziate le stesse frequenze ma in termini di energia invece che di ampiezza.

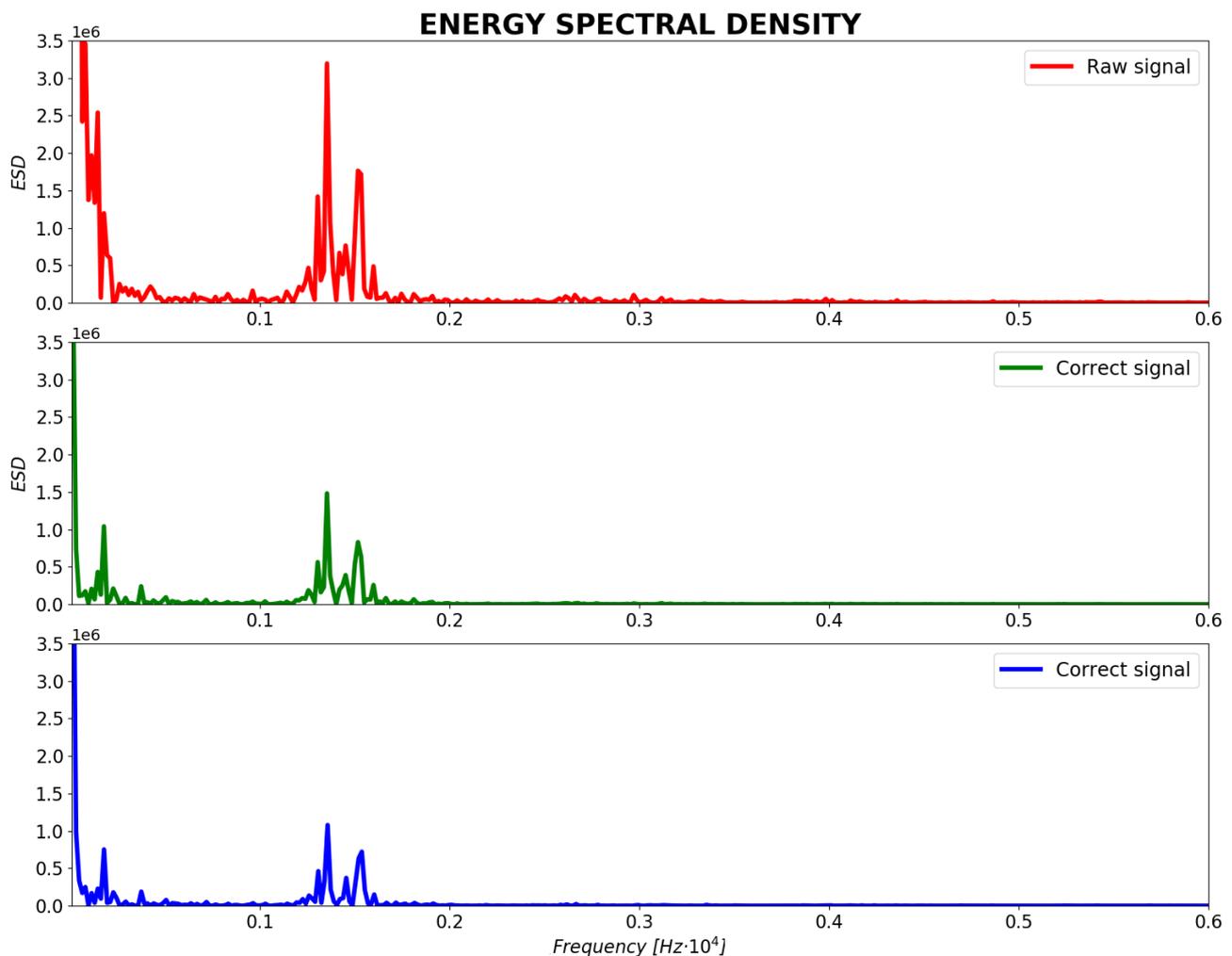


Figura 3.16 ESD relativa ai segnali di rotazione grezza, corretta e doppiamente corretta

3.3 Cross-correlazione dei segnali

Una volta rimossi dai segnali gli errori strumentali occorsi durante il monitoraggio e le influenze sulle misurazioni esercitate dalle condizioni termo-igrometriche, è possibile passare all'ultima fase dell'analisi in cui verranno confrontati i segnali dei diversi strumenti per valutare il loro grado di correlazione e dunque, la presenza di eventuali anomalie.

3.3.1 Linee temporali dei segnali

Il primo problema che si deve affrontare in questa fase è la ricerca di istanti di misurazione comuni ai diversi sensori. I segnali di output hanno infatti lunghezze diverse e hanno linee temporali non perfettamente sovrapponibili poiché i sensori non eseguono le acquisizioni in maniera perfettamente sincrona ma con un distacco di 1-2 secondi. Questa situazione già inizialmente complessa viene poi peggiorata dall'algoritmo di pulizia dai tratti di plateau poiché, a seconda degli errori presenti, ogni segnale subisce la cancellazione di alcune sue parti. Al termine degli algoritmi di pulizia, il dataset è costituito da segnali aventi lunghezze che possono essere molto diverse tra loro e tali che l'intersezione esatta tra le loro linee temporale è un insieme vuoto (oppure contenente pochissimi elementi. A titolo di esempio, in Figura 3.17, si riporta la distribuzione statistica del tempo di campionamento relativo al sensore C1.1.1; le curve relative agli altri sensori sono praticamente identiche poiché media e scarto quadratico medio, cambiano solo alla terza cifra decimale. Come si può vedere dall'immagine, l'intervallo temporale tra due acquisizioni è mediamente di 6-7 minuti ma ha una grande variabilità dovuta anche al fatto che, talvolta, i sensori saltano delle misurazioni. Probabilmente, ciò accade a causa di temporanei spegnimenti o malfunzionamenti dei sensori e il fatto di avere una frequenza di campionamento elevata amplifica il fenomeno.

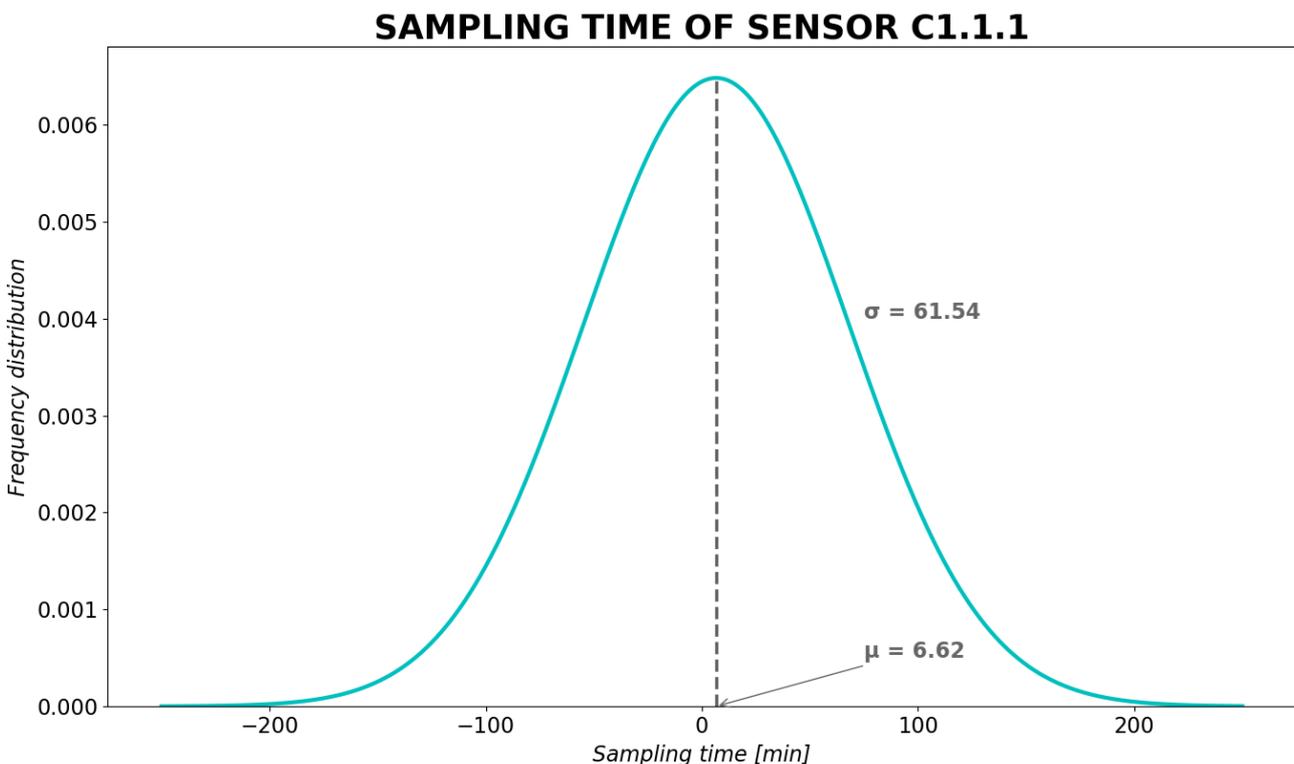


Figura 3.17 Distribuzione di frequenza del tempo di campionamento del sensore C1.1.1

3.3.2 Parametri di input

L'algoritmo di cross-correlazione dei segnali necessita di ricevere in input alcuni parametri per il corretto funzionamento. Tali parametri sono scelti dall'utente perché dipendono dal caso specifico. Per prima cosa, in funzione della posizione dei sensori sul ponte in studio, l'utente deve indicare quali segnali desidera cross-correlare. A questo scopo, il codice permette la definizione di gruppi che devono contenere almeno due sensori differenti. L'algoritmo effettuerà automaticamente tutte le cross-correlazioni possibili tra i sensori all'interno di ogni gruppo.

Inoltre, dal momento che le linee temporali non sono esattamente sovrapponibili, per ognuno dei gruppi definiti in precedenza, l'utente dovrà definire una tolleranza ovvero il numero massimo di secondi che possono dividere due misurazioni che saranno considerate corrispondenti a livello di asse dei tempi. Infine, l'utente ha la possibilità di definire un istante iniziale e un istante finale nel caso in cui desideri effettuare la cross-correlazione dei segnali su una finestra temporale più ristretta.

Seguendo la stessa idea di fondo che ha caratterizzato l'intero codice di calcolo, l'utente potrà visualizzare i risultati ottenuti con i parametri inseriti e, se lo desidera, modificarli arbitrariamente eseguendo nuovamente l'analisi anche su un ristretto numero di sensori per affinare il risultato finale. Tali parametri devono essere inseriti nella sezione dedicata in *File di input utente.txt* seguendo dettagliatamente le istruzioni riportate. In Figura 3.18, si riporta un'immagine dell'undicesima sezione di *File input utente.txt*. Osservando la figura, si possono vedere i gruppi che contengono tutti i sensori allineati lungo la direzione trasversale del ponte. Tuttavia, è possibile effettuare la cross-correlazione su gruppi diversi che contengono il medesimo sensore poiché le analisi dei singoli gruppi sono completamente indipendenti tra loro. Nel caso specifico, vengono aggiunti 6 ulteriori gruppi che contengono i 5 sensori allineati longitudinalmente installati sulle diverse travi.

```
In questa sezione, si richiede di inserire tutti i parametri relativi alla cross-correlazione dei sensori.
Per prima cosa, indicare (lasciando uno spazio dopo il simbolo ':') se nell'analisi successiva si desidera
effettuare la cross-correlazione e, in caso affermativo, quanti gruppi di sensori si vogliono creare.

Algoritmo_di_crosscorrelazione: sì
Numero_di_gruppi: 5

Inoltre, si richiede di definire i sensori di cui si vuole effettuare la cross-correlazione e di dividerli nei gruppi
precedentemente definiti. A questo scopo, inserire la dicitura 'gruppok' con k a partire da 0 seguita dai due punti.
Successivamente, lasciare uno spazio e inserire i sensori che fanno parte del gruppo separati da virgole e chiudere la
riga con un'ulteriore virgola.

gruppo0: C1.1.1,C1.2.1,C1.3.1,C1.4.1,C1.5.1,C1.6.1,
gruppo1: C1.1.2,C1.2.2,C1.3.2,C1.4.2,C1.5.2,C1.6.2,
gruppo2: C1.1.3,C1.2.3,C1.3.3,C1.4.3,C1.5.3,C1.6.3,
gruppo3: C1.1.4,C1.2.4,C1.3.4,C1.4.4,C1.5.4,C1.6.4,
gruppo4: C1.1.5,C1.2.5,C1.3.5,C1.4.5,C1.5.5,C1.6.5,

Poi, per ciascun gruppo di sensori da cross-correlare, inserire una riga. Per ogni riga, inserire il termine
"tolleranza_gruppok:"rispettando l'indicizzazione precedente e, lasciando uno spazio dopo due punti, indicare la
tolleranza desiderata (in secondi) nella ricerca delle corrispondenze tra le linee temporali dei vari sensori.

Tolleranza_gruppo0: 60
Tolleranza_gruppo1: 60
Tolleranza_gruppo2: 60
Tolleranza_gruppo3: 60
Tolleranza_gruppo4: 60

Infine, inserire i riferimenti temporali di inizio e fine dell'intervallo di tempo su cui si vuole effettuare la
crosscorrelazione. Inserire i dati in formato Timestamp lasciando uno spazio dopo il simbolo di ':'.

Inizio: 1550192400
Fine: 1560564000
```

Figura 3.18 Undicesimo gruppo di parametri di 'File di input utente.txt'

3.3.3 Algoritmo di acquisizione e analisi dei gruppi di sensori

Una volta inseriti i parametri richiesti, il codice deve acquisirli e passarli alla funzione *cross_correlazione* definita all'interno del modulo secondario *Cross_correlazione.py*. Per funzionare correttamente, la funzione necessita di ricevere in input i parametri riportati di seguito.

- **gruppo**: è l'array che contiene le stringhe con i codici identificativi dei sensori appartenenti all'*m*-esimo gruppo.
- **tolleranza**: è la variabile che contiene la tolleranza (in secondi) relativa all'*m*-esimo gruppo.
- ***m***: è l'indice che contiene il numero identificativo del gruppo corrente da cross-correlare; esso sarà utilizzato per nominare i file con i risultati.
- **percorso_cartella_crosscorrelazione**: è la stringa che contiene il percorso della cartella all'interno della quale verranno salvati i risultati degli algoritmi di cross-correlazione.
- **lim_inf** e **lim_sup**: sono le variabili che contengono gli estremi dell'intervallo temporale su cui si desidera eseguire la cross-correlazione.

L'algoritmo di controllo del processo è fondato sulle prime due scelte effettuate dall'utente. Per prima cosa, l'esecuzione dell'algoritmo di cross-correlazione dipende della risposta 'sì' o 'no' alla prima domanda: infatti, se l'utente si trova nella fase taratura dei parametri di input per gli algoritmi di pulizia o di scorrelazione, un semplice 'no' alla richiesta di esecuzione interromperà il codice senza eseguire la cross-correlazione. Qualora invece l'utente desideri eseguire gli algoritmi di cross-correlazione, egli dovrà rispondere 'sì' e indicare il numero di gruppi in cui dividere i sensori.

Dopo aver verificato che l'utente desidera effettuare la cross-correlazione, il codice crea la cartella in cui verranno salvati i risultati e procede alla rilettura del file di input acquisendo il numero di gruppi. A questo punto il codice entra in un ciclo di indice *m* e avente un numero di iterazioni pari al numero di gruppi indicato dall'utente: alla generica *m*-esima iterazione, le righe di *file di input utente.txt* vengono lette e divise in stringhe (usando come separatore il simbolo ':') con lo scopo di cercare la riga che inizia con la stringa 'gruppom'. Una volta trovata, il codice prende la seconda stringa e la divide ulteriormente in sottostringhe (utilizzando il simbolo di virgola come separatore) ognuna delle quali contiene il nome del generico sensore.

Tutti i nomi degli strumenti che fanno parte del gruppo vengono salvati all'interno dell'array *gruppo*. Quindi il codice cerca la riga che inizia con la stringa 'tolleranza_gruppom' e acquisisce il valore inserito dall'utente salvandolo all'interno della variabile *tolleranza*. In questo modo, il codice acquisisce i parametri di input relativi all'*m*-esimo gruppo. Il modulo principale richiama il modulo secondario *Cross_correlazione.py* e passa alla funzione *cross_correlazione* i parametri acquisiti.

Al termine dell'algoritmo di cross-correlazione, il flusso di istruzioni ritorna al modulo principale per eseguire l'iterazione successiva. Il ciclo (e dunque il codice di calcolo) ha termine quando tutti i gruppi di sensori sono stati acquisiti e analizzati.

Si noti che non viene restituito alcun dato al blocco principale del codice poiché l'analisi e il salvataggio dei risultati sono effettuati direttamente all'interno della funzione *cross_correlazione*. In Figura 3.19, viene riportato un diagramma di flusso che descrive nel dettaglio l'algoritmo di acquisizione dei gruppi su cui eseguire la cross-correlazione. Nel diagramma di flusso non è presente l'acquisizione dell'intervallo temporale in quanto i due limiti sono comuni a tutti i gruppi di sensori e vengono dunque acquisiti con un algoritmo differente.

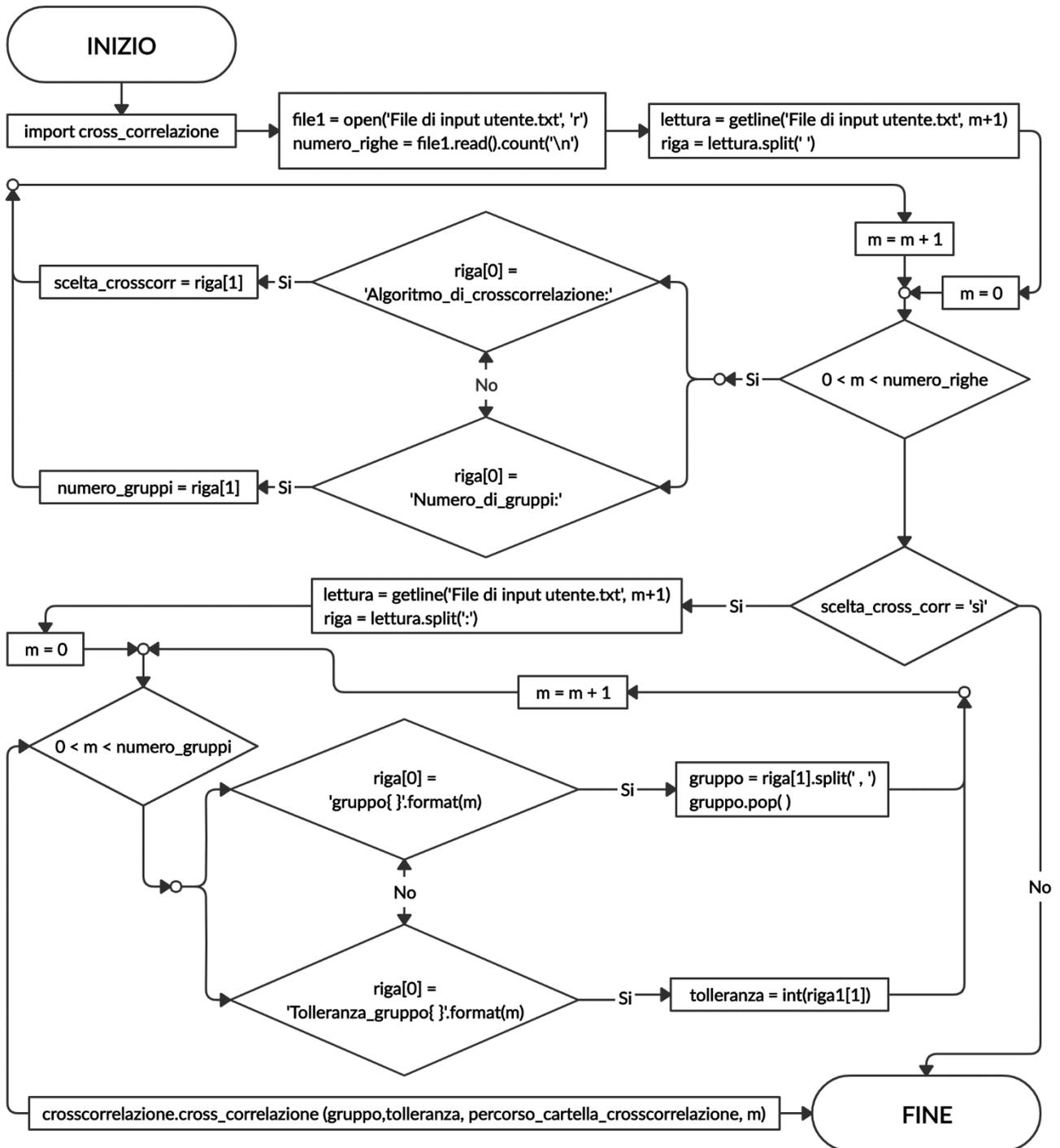


Figura 3.19 Algoritmo di acquisizione dei gruppi di sensori da cross-correlare

3.3.4 Algoritmo di cross-correlazione dei segnali

Come mostrato in figura 3.19, dopo aver acquisito i parametri necessari relativi alla generica m -esima iterazione, il modulo principale *main.py* li passa alla funzione *cross_correlazione* presente nel modulo secondario *Cross_correlazione.py*. Il modulo crea il file di testo vuoto in cui verranno successivamente salvati i risultati dell'analisi. Quindi può avere inizio l'algoritmo di calcolo che, mediante due cicli annidati effettua tutte le combinazioni possibili (senza ripetizioni) tra i sensori presenti nel gruppo. Dato l'array *gruppo*, viene calcolata la cross-correlazione tra il sensore in i -esima posizione (dove l'indice i è variabile tra il primo e l'ultimo elemento dell'array) e il sensore in j -esima posizione (dove l'indice j è variabile tra l' $(i+1)$ -esimo e l'ultimo elemento dell'array).

In altre parole, data la matrice quadrata che contiene sulle righe e sulle colonne i sensori da cross-correlare, la diagonale principale è vuota (poiché sarebbe relativa alla cross-correlazione tra un sensore e se stesso) mentre il calcolo porta al riempimento della sola porzione superiore o inferiore (poiché la matrice è simmetrica) come mostrato in Figura 3.20.

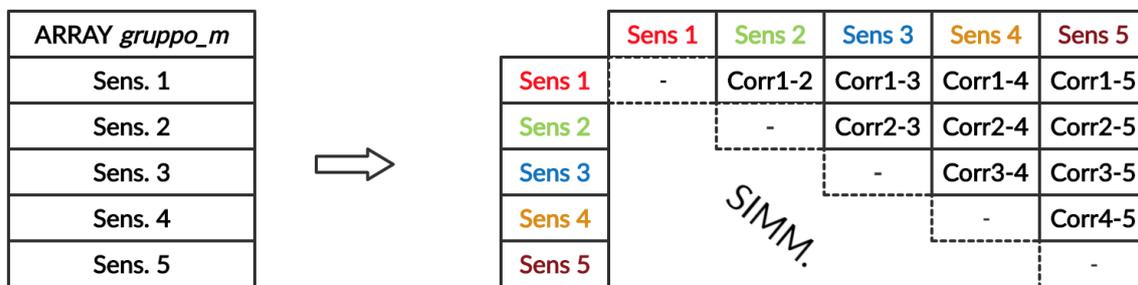


Figura 3.20 Combinazione dei sensori del generico m -esimo gruppo

Al termine dei due cicli, dato un generico gruppo composto da N sensori, verranno effettuate le cross-correlazioni tra $(N^2 - N)/2$ coppie di sensori. Data la generica combinazione tra indice i e indice j , si acquisiscono i segnali sfruttando il salvataggio strutturato dei segnali spiegato nel paragrafo 3.1.6.

Infatti, al termine degli algoritmi di svincolamento dalle condizioni termo-igrometriche, i segnali di rotazioni X e Y (puliti e corretti) corredati dai riferimenti temporali sono salvati all'interno di un file csv (nominato con il codice del sensore) contenuto in un cartella (nominata con il codice del sensore). Estratte dall'array *gruppo* le due stringhe con i codici dei sensori, si possono comporre i percorsi di questi file, dai quali i due segnali con le rotazioni X e Y e il segnale con i tempi vengono estratti e salvati rispettivamente nei vettori *rotX1*, *rotY1*, *tempo1* (nel caso dell' i -esimo sensore) e nei vettori *rotX2*, *rotY2*, *tempo2* (nel caso dell' j -esimo sensore).

Come spiegato nel paragrafo 3.3.1, le due triplete di vettori hanno diversa lunghezza e hanno i tempi che non corrispondono. Per questa ragione, non è ancora possibile valutare la correlazione ma è necessario effettuare preliminarmente una sorta di intersezione con tolleranza tra i due segnali di tempo al fine di ottenere vettori di uguale lunghezza con i riferimenti temporali coincidenti.

Per prepararsi all'analisi, si confrontano le lunghezze dei segnali e si salvano i segnali di lunghezza minore nei vettori *rotX_corta*, *rotY_corta*, *tempo_corto* e i segnali di lunghezza maggiore nei vettori *rotX_lunga*, *rotY_lunga*, *tempo_lungo*.

Infine si creano i vettori vuoti $rotX_corta_correlata$, $rotY_corta_correlata$, $rotX_lunga_correlata$ e $rotY_lunga_correlata$ in cui si salvano gli elementi corrispondenti dal punto di vista temporale.

A questo punto, può avere inizio il processo di intersezione delle diverse linee temporali, il quale consiste in un ciclo di indice k che spazza il vettore $tempo_lungo$ in tutta la sua lunghezza. Nella generica iterazione k , si eseguono le differenze tra il k -esimo elemento del vettore e tutti gli elementi del vettore $tempo_corto$; tra tutti i valori trovati, si seleziona il minore (salvandolo nella variabile $salto_min$) e il corrispondente indice minore (salvandolo nella variabile $indice_min$). In questo modo, tra tutti gli elementi del vettore $tempo_corto$, è stato individuato quello più vicino al k -esimo elemento del vettore $tempo_corto$.

La corrispondenza individuata è valida se e solo se i due istanti di tempo sono sufficientemente vicini ovvero se l'intervallo intercorso salvato all'interno di $salto_min$ risulta essere minore o al più uguale alla variabile $tolleranza$ in cui è salvato il valore scelto dall'utente. Inoltre, se si desidera effettuare l'analisi su una finestra temporale ristretta, si inserisce l'ulteriore condizione che i due istanti temporali corrispondenti debbano ricadere nell'intervallo di tempo selezionato dall'utente.

Se queste condizioni sono soddisfatte, si salvano gli ($indice_min$)-esimi elementi dei vettori $rotX_corta$ e $rotY_corta$ e i k -esimi elementi dei vettori $rotX_lunga$ e $rotY_lunga$ all'interno dei vettori $rotX_corta_correlata$, $rotY_corta_correlata$, $rotX_lunga_correlata$ e $rotY_lunga_correlata$.

Infine, per evitare che gli stessi istanti di tempo vengano nuovamente selezionati nelle iterazioni successive, questi ultimi vengono sostituiti con il valore 0 in modo tale che, messi a confronto con elementi aventi ordine di grandezza di 10^9 secondi, a essi non possa mai corrispondere lo scarto temporale minimo. Se invece lo scarto tra i due istanti supera la tolleranza, si passa all'iterazione successiva senza salvare. In Figura 3.21, si mostra uno schema dell'intersezione tra due segnali.

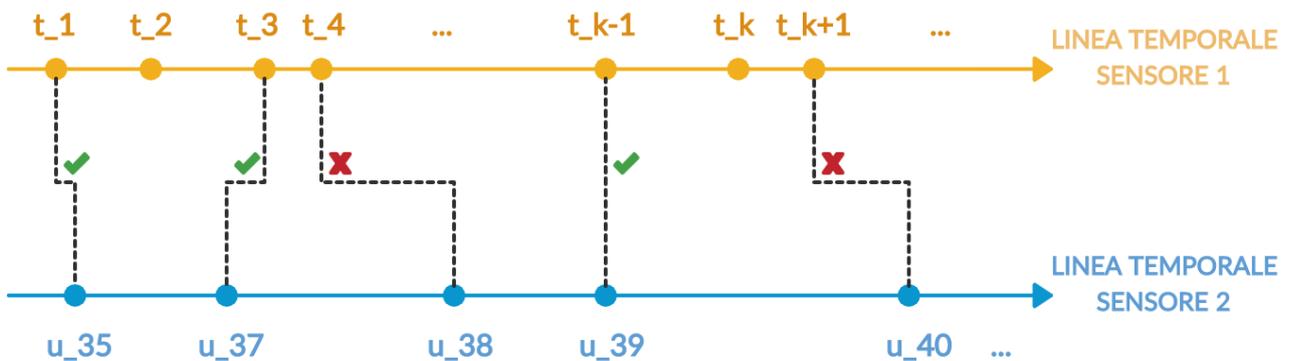


Figura 3.21 Intersezione delle linee temporali di una generica coppia di sensori

Al termine del ciclo, i 4 vettori inizialmente vuoti conterranno i segnali di rotazione X e Y perfettamente paralleli dal punto di vista temporale e aventi uguale lunghezza; soltanto a questo punto si può valutare correttamente la loro dipendenza calcolandone il coefficiente di correlazione lineare di Pearson (vedi Equazione 3.9).

Dal momento che non ci può essere la certezza sul corretto orientamento degli assi X e Y dell'inclinometro, si è ritenuto opportuno calcolare il coefficiente di correlazione tra le rotazioni X e Y: in tal modo, l'utente ha la possibilità di valutare se qualche sensore è stato installato ruotato di 90°

rispetto ai compagni o se invece esistono correlazioni tra l'inclinazione in una direzione e quella in direzione ad essa ortogonale.

Una volta calcolati tutti i coefficienti di correlazione, i risultati vengono inseriti nel file di testo creato inizialmente, il quale viene poi salvato nell'apposita directory come mostrato nel paragrafo 3.3.5.

Al termine del salvataggio, si passa alla coppia di sensori successiva fino al termine dei due cicli di indice i e j . In Figura 3.22, si riporta un diagramma di flusso che descrive nel dettaglio l'algoritmo di cross-correlazione del generico gruppo di sensori.

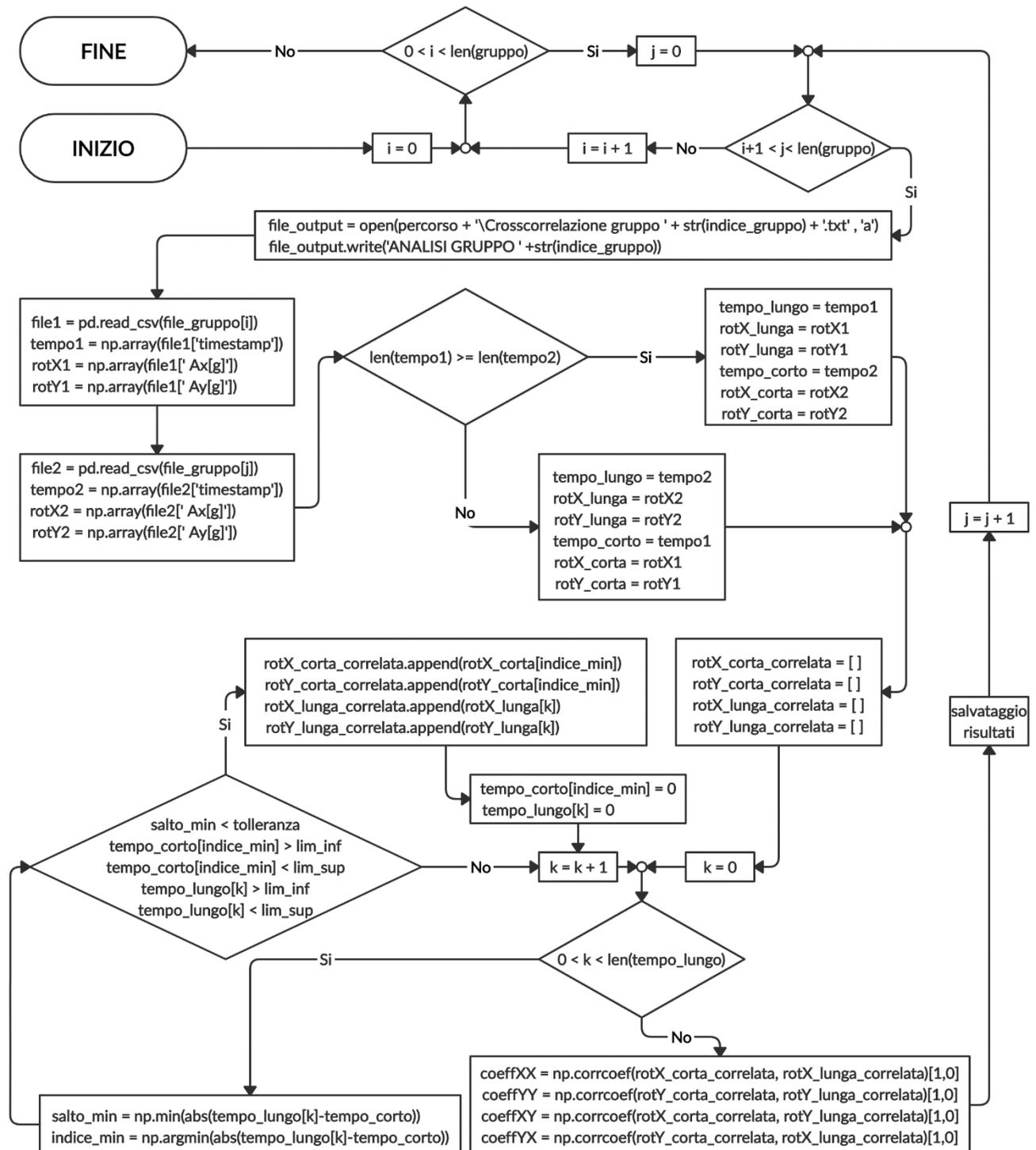


Figura 3.22 Algoritmo di cross-correlazione dei segnali

In Figura 3.23, si riportano a confronto i segnali di rotazione X prima e dopo il processo di intersezione delle linee temporali relative ai sensori C1.1.1 e C.1.2.1. L'algoritmo di intersezione delle linee temporali iniziali comporta la creazione di una nuove linee temporali che hanno una lunghezza pari mediamente al 80-90% rispetto a quelle iniziali. Per esempio, nel caso dell'intersezione tra i sensori C1.1.1 (lunghezza iniziale di 20308 elementi) e C1.2.1 (lunghezza iniziale di 21187 elementi), la linea temporale finale ha una lunghezza di 16716 elementi. Dal grafico, è chiaro l'effetto del processo di intersezione che, tra tutti gli elementi prende solamente quelli comuni ad entrambi i segnali.

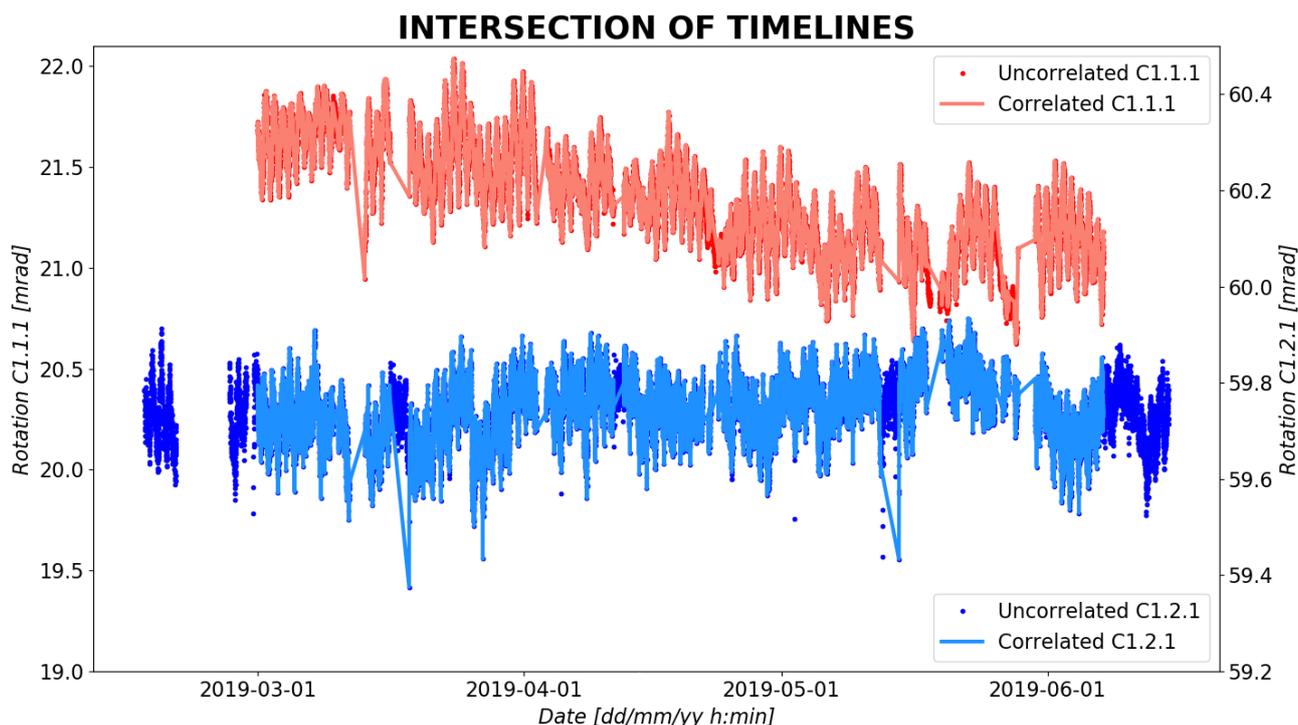


Figura 3.23 Effetto dell'intersezione sui segnali di rotazione X dei sensori C1.1.1 e C.1.2.1

Il grande tratto di plateau che a inizio codice è stato rimosso dal segnale di temperatura e dunque da tutti gli altri segnali relativi dello strumento C1.1.1 (vedi Figura 2.1) comporterà, in fase di cross-correlazione, lo scarto di tutte quelle misurazioni acquisite nello stesso periodo dagli altri sensori.

Dunque, gli errori che, nella prima fase del codice, sono stati rimossi da un singolo segnale influenzano in questa fase anche i segnali che non avevano risentito di notevoli anomalie.

La cross-correlazione non viene effettuato unicamente sui segnali corretti dagli errori strumentali e svincolati dalle condizioni termo-igrometriche ma anche per tutti gli altri segnali intermedi che hanno subito variazioni durante l'esecuzione dei vari algoritmi perché, volendo sapere il grado di correlazione tra i segnali, non è possibile sapere a priori, quando esso si manifesti più chiaramente.

Dunque, il codice acquisirà i segnali dagli 8 file csv contenuti nella cartella chiamata *nome_sensore_Segnali modificati* in maniera automatica e molto rapida grazie al salvataggio sistematico effettuato durante l'esecuzione dell'algoritmo.

3.3.5 Salvataggio dei file di output

I risultati dell'algoritmo di cross-correlazione sono comuni a tutti i sensori e dunque, come tali, sono salvati all'interno della cartella *RISULTATI* (che contiene già i risultati relativi agli algoritmi di svincolamento dalle condizioni termo-igrometriche e all'analisi nel dominio della frequenza).

In particolare, prima di iniziare l'analisi, viene creata una cartella chiamata *Crosscorrelazione* (completamente dedicata ai risultati dell'ultima fase) la quale conterrà 8 sottocartelle relative ai segnali dopo le varie modifiche occorse man mano. Esse si chiamano come segue: 1) *Segnali raw*, 2) *Segnali ripuliti da plateau*, 3) *Segnali ripuliti da plateau e errori di traslazione*, 4) *Segnali ripuliti da plateau, errori di traslazione e picchi*, 5) *segnali singolarmente scorrelati da temperatura*, 6) *segnali doppiamente scorrelati da temperatura*, 7) *segnali doppiamente scorrelati da temperatura e singolarmente scorrelati da umidità* e 8) *segnali doppiamente scorrelato da temperatura*.

Ogni cartella contiene dei file di testo (uno per ogni gruppo definito dall'utente) che si chiamano *Crosscorrelazione gruppo m.txt* dove *m* è la variabile in cui è memorizzato l'indice del gruppo.

In Figura 3.24, a titolo di esempio, si riporta un'immagine del file di output del gruppo 1 definito in Figura 3.18. I file di output conterranno sia i 4 coefficienti di correlazione calcolati, sia il numero di elementi comuni ai 2 segnali da cross-correlare. In tal modo l'utente avrà la possibilità di valutare l'effetto delle sue scelte sui risultati e dunque, se lo desidera, variare i parametri di input.

```
correlazione tra C1.1.1 e C1.2.1 --> 16716 corrispondenze  
  
coefficiente rotazione rotX-rotX = -0.07991200446228981  
coefficiente rotazione rotY-rotY = 0.5740368894886724  
coefficiente rotazione rotX-rotY = -0.033890245966508824  
coefficiente rotazione rotY-rotX = 0.1680897339884218  
  
correlazione tra C1.1.1 e C1.3.1 --> 16211 corrispondenze  
  
coefficiente rotazione rotX-rotX = 0.6622312600039001  
coefficiente rotazione rotY-rotY = 0.5374315343430713  
coefficiente rotazione rotX-rotY = 0.0933598768005897  
coefficiente rotazione rotY-rotX = 0.07363911984990201  
  
correlazione tra C1.1.1 e C1.4.1 --> 16783 corrispondenze  
  
coefficiente rotazione rotX-rotX = 0.10412219525540478  
coefficiente rotazione rotY-rotY = 0.5215714127690991  
coefficiente rotazione rotX-rotY = -0.13909379501733135  
coefficiente rotazione rotY-rotX = 0.12098234847209986  
  
correlazione tra C1.1.1 e C1.5.1 --> 16426 corrispondenze  
  
coefficiente rotazione rotX-rotX = 0.6731006119544579  
coefficiente rotazione rotY-rotY = 0.18455856316932454  
coefficiente rotazione rotX-rotY = 0.4499156886313487  
coefficiente rotazione rotY-rotX = -0.476028297034034
```

Figura 3.24 File di output della cross-correlazione tra segnali dei sensori del gruppo 1

3.3.6 Analisi sull'intero periodo di monitoraggio

Data la disposizione dei sensori lungo la campata (vedi Figura 1.2), sono stati creati in totale 11 gruppi di sensori. I primi 5 gruppi contengono i sensori che sono allineati lungo la direzione trasversale del ponte come mostrato di seguito.

- **GRUPPO 1:** sensori C1.1.1, C1.2.1, C1.3.1, C1.4.1, C1.5.1, C1.6.1.
- **GRUPPO 2:** sensori C1.1.2, C1.2.2, C1.3.2, C1.4.2, C1.5.2, C1.6.2.
- **GRUPPO 3:** sensori C1.1.3, C1.2.3, C1.3.3, C1.4.3, C1.5.3, C1.6.3.
- **GRUPPO 4:** sensori C1.1.4, C1.2.4, C1.3.4, C1.4.4, C1.5.4, C1.6.4.
- **GRUPPO 5:** sensori C1.1.5, C1.2.5, C1.3.5, C1.4.5, C1.5.5, C1.6.5.

Ipotizzando una preponderanza del comportamento a trave (e dunque di una deformata monodimensionale) da parte della campata, lo scopo è quello di vedere se effettivamente si vede la correlazione nella deformata longitudinale e dunque di riuscire a riconoscere gli assi degli strumenti. In Figura 3.25, si possono vedere i primi 5 macro-gruppi in cui sono stati suddivisi i 30 strumenti nonché la deformata teorica dell'impalcato sotto l'azione del peso proprio.

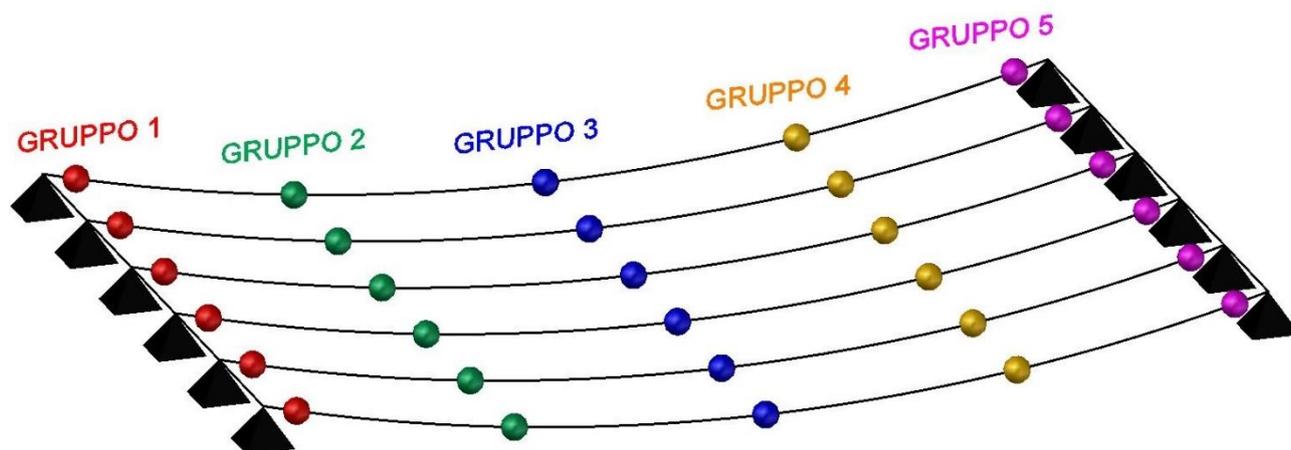


Figura 3.25 Divisione degli strumenti installati sull'impalcato nei macro-gruppi da cross-correlare

Gli altri 6 gruppi contengono invece tutti i sensori appartenenti alle 6 travate, i quali vengono analizzati per valutare le correlazioni maggiori lungo la direzione longitudinale e verificare se la deformata si avvicina effettivamente a quella relativa ad una trave su due appoggi caricata uniformemente nell'ipotesi di una predominanza dei carichi permanenti su quelli variabili.

Inoltre, volendo vedere come variano i coefficienti di correlazione con l'avanzare degli algoritmi di pulizia e svincolamento dalle condizioni termo-igrometriche, il calcolo della cross-correlazione è stato eseguito a valle di ogni singola modifica dei segnali per un totale di 8 set di coefficienti per ogni gruppo (1 grezzo, 3 risultanti dagli algoritmi di pulizia e 4 risultanti dagli algoritmi di svincolamento).

Nelle Figure 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 si mostra, per ognuno dei gruppi di sensori, l'andamento del coefficiente di correlazione medio (calcolato con segno) in ogni fase dell'algoritmo.

TREND OF COEFFICIENT OF CORRELATION XX DURING ANALYSIS

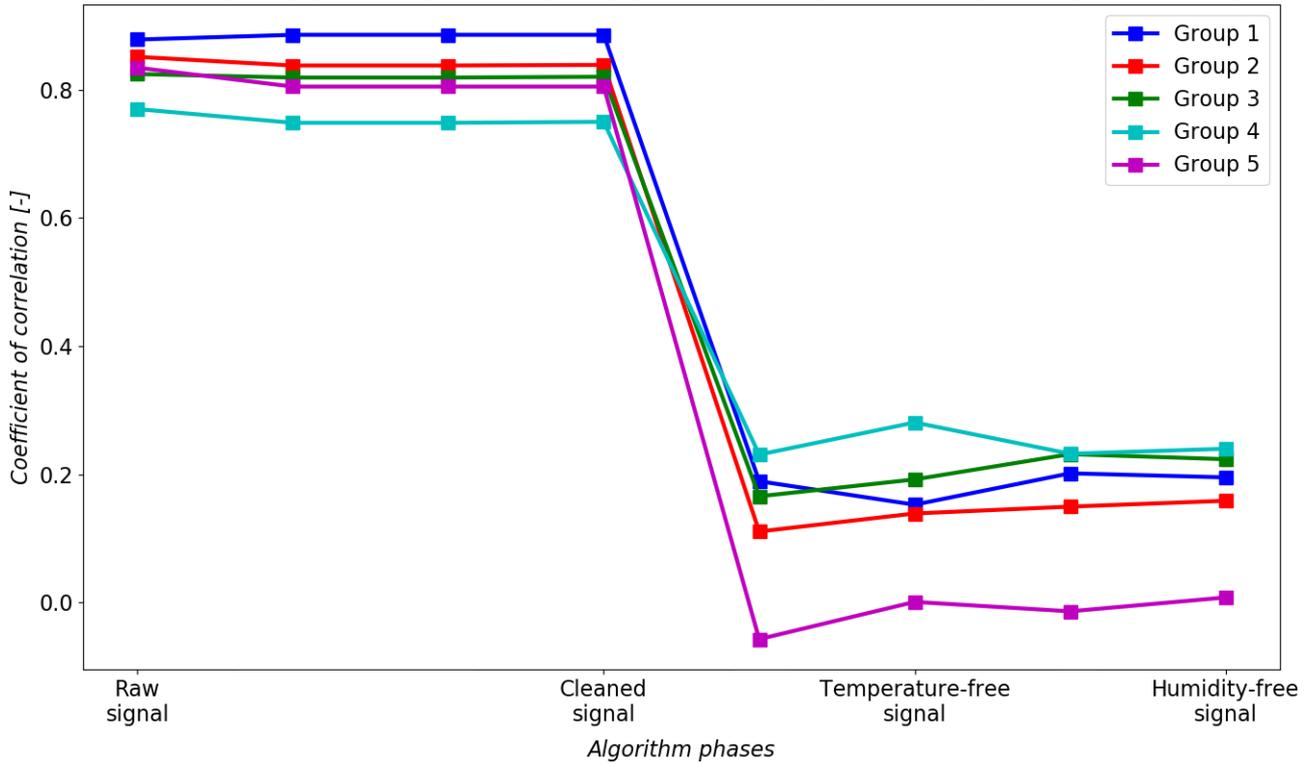


Figura 3.26 Andamento della correlazione tra rotazioni X dei sensori allineati trasversalmente

TREND OF COEFFICIENT OF CORRELATION YY DURING ANALYSIS

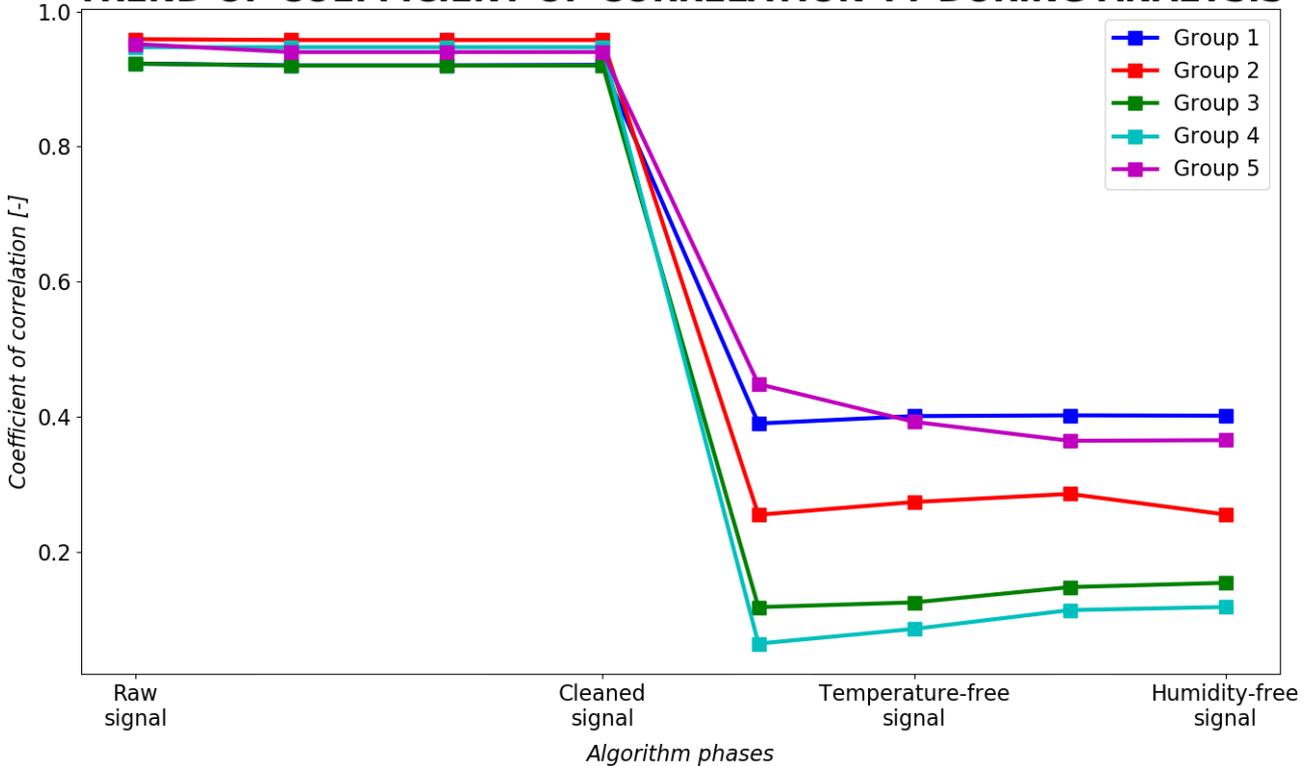


Figura 3.27 Andamento della correlazione tra rotazioni Y dei sensori allineati trasversalmente

TREND OF COEFFICIENT OF CORRELATION XX DURING ANALYSIS

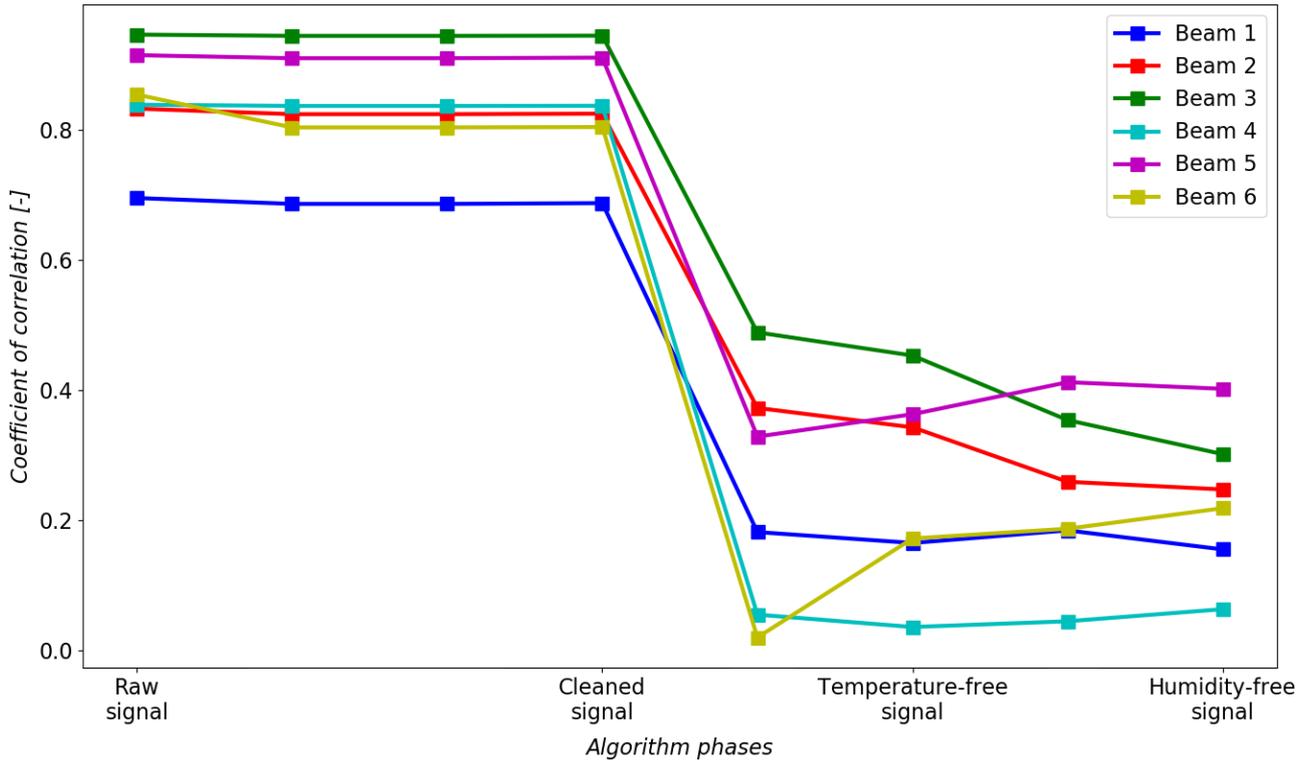


Figura 3.28 Andamento della correlazione tra rotazioni X dei sensori allineati longitudinalmente

TREND OF COEFFICIENT OF CORRELATION YY DURING ANALYSIS

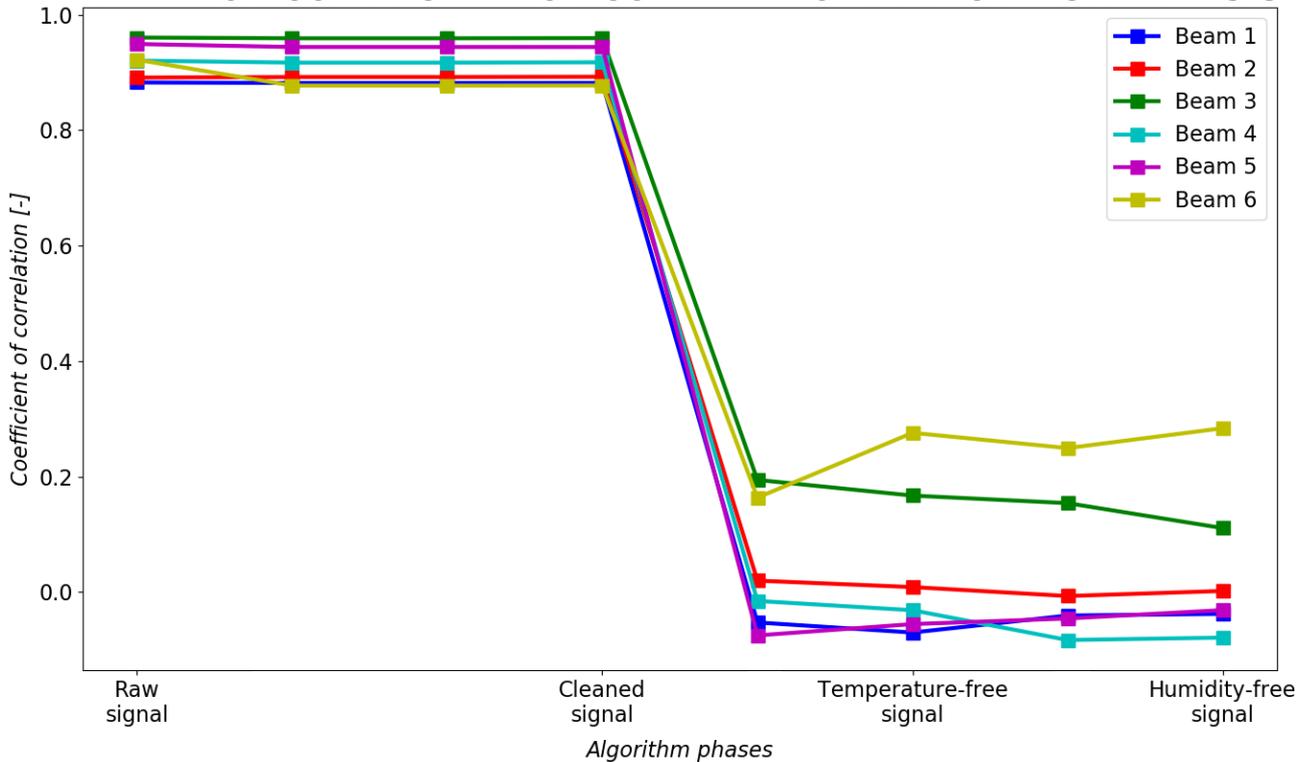


Figura 3.29 Andamento della correlazione tra rotazioni Y dei sensori allineati longitudinalmente

Dai grafici mostrati nelle figure, si vede chiaramente che tutte le curve hanno un primo tratto pressoché costante per poi decrescere ripidamente a coefficienti di correlazione medi molto bassi. In particolare, i coefficienti di correlazione non subiscono grandi variazioni a causa degli algoritmi di pulizia dei segnali in quanto le operazioni eseguite non comportano grandi variazioni degli scarti quadratici medi: nel caso dei plateau, esse consistono nell'eliminazione della porzione di segnale errata e nel caso dei picchi, la correzione avviene mediando gli elementi precedente e successivo. Infine, l'algoritmo di pulizia dagli errori di traslazione non ha comportato alcuna differenza nei segnali che sono privi di queste anomalie.

Al contrario, gli algoritmi di svincolamento dalle condizioni termo-igrometriche provocano delle diminuzioni medie, forti e anche molto forti dei coefficienti di correlazioni che addirittura, nei casi peggiori, cambiano segno indicando una correlazione negativa. Questo fenomeno potrebbe essere dovuto agli effetti locali presenti nei segnali di umidità e temperatura. Infatti, a seconda del grado di esposizione dello strumento all'irradiazione solare, gli andamenti possono essere molto diversi. Ciò potrebbe aver comportato, in fase di minimizzazione del coefficiente di correlazione tra rotazioni e temperatura (o umidità), una diminuzione del grado di correlazione tra le misure dei diversi sensori. Di conseguenza, per vedere al meglio le correlazioni tra i diversi strumenti, si sceglie di valutare i risultati al termine degli algoritmi di pulizia mostrati nel capitolo 2. In questa fase, i segnali di rotazione hanno delle lunghezze variabili tra i 20000 e i 22000 elementi. Gli algoritmi di intersezione delle diverse linee temporali scartano mediamente il 16% dei segnali che avranno dunque una lunghezza media finale di 17000-18000 elementi.

Nelle Tabelle 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25, si riportano i risultati relativi alla cross-correlazione tra i sensori allineati trasversalmente mentre, nelle Tabelle 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31, si riportano i risultati relativi alla cross-correlazione tra i sensori allineati longitudinalmente.

		Rotazione X -Rotazione X								Rotazione Y -Rotazione Y					
		C1.1.1	C1.2.1	C1.3.1	C1.4.1	C1.5.1	C1.6.1			C1.1.1	C1.2.1	C1.3.1	C1.4.1	C1.5.1	C1.6.1
C1.1.1	-	0.897	0.957	0.896	0.939	0.670	C1.1.1	-	0.889	0.958	0.930	0.929	0.897		
C1.2.1	0.897	-	0.943	0.958	0.955	0.871	C1.2.1	0.889	-	0.902	0.884	0.880	0.887		
C1.3.1	0.957	0.943	-	0.922	0.928	0.928	C1.3.1	0.958	0.902	-	0.948	0.960	0.926		
C1.4.1	0.896	0.958	0.922	-	0.954	0.816	C1.4.1	0.930	0.884	0.948	-	0.951	0.946		
C1.5.1	0.939	0.955	0.928	0.954	-	0.733	C1.5.1	0.929	0.880	0.960	0.951	-	0.926		
C1.6.1	0.670	0.871	0.848	0.816	0.733	-	C1.6.1	0.897	0.887	0.926	0.946	0.926	-		

		Rotazione X -Rotazione Y								Rotazione Y -Rotazione X					
		C1.1.1	C1.2.1	C1.3.1	C1.4.1	C1.5.1	C1.6.1			C1.1.1	C1.2.1	C1.3.1	C1.4.1	C1.5.1	C1.6.1
C1.1.1	-	0.791	0.888	0.843	0.930	0.764	C1.1.1	-	0.907	0.921	0.871	0.810	0.884		
C1.2.1	0.791	-	0.945	0.941	0.967	0.940	C1.2.1	0.907	-	0.876	0.852	0.805	0.800		
C1.3.1	0.888	0.945	-	0.914	0.964	0.876	C1.3.1	0.921	0.876	-	0.920	0.894	0.898		
C1.4.1	0.843	0.941	0.914	-	0.939	0.918	C1.4.1	0.871	0.852	0.920	-	0.885	0.884		
C1.5.1	0.930	0.967	0.964	0.939	-	0.870	C1.5.1	0.810	0.805	0.894	0.885	-	0.856		
C1.6.1	0.764	0.940	0.876	0.918	0.870	-	C1.6.1	0.884	0.800	0.898	0.884	0.856	-		

Tabelle 3.21 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 1

Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y						
	C1.1.2	C1.2.2	C1.3.2	C1.4.2	C1.5.2	C1.6.2		C1.1.2	C1.2.2	C1.3.2	C1.4.2	C1.5.2	C1.6.2
C1.1.2	-	0.834	0.795	0.904	0.817	0.607	C1.1.2	-	0.978	0.948	0.966	0.958	0.912
C1.2.2	0.834	-	0.989	0.848	0.959	0.892	C1.2.2	0.978	-	0.980	0.985	0.988	0.942
C1.3.2	0.795	0.989	-	0.821	0.961	0.882	C1.3.2	0.948	0.980	-	0.942	0.985	0.960
C1.4.2	0.904	0.848	0.821	-	0.848	0.546	C1.4.2	0.966	0.985	0.942	-	0.968	0.924
C1.5.2	0.817	0.959	0.961	0.848	-	0.880	C1.5.2	0.958	0.988	0.985	0.968	-	0.950
C1.6.2	0.607	0.892	0.882	0.546	0.880	-	C1.6.2	0.912	0.942	0.960	0.924	0.950	-

0.921

Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X						
	C1.1.2	C1.2.2	C1.3.2	C1.4.2	C1.5.2	C1.6.2		C1.1.2	C1.2.2	C1.3.2	C1.4.2	C1.5.2	C1.6.2
C1.1.2	-	0.89	0.869	0.886	0.851	0.827	C1.1.2	-	0.925	0.900	0.928	0.935	0.745
C1.2.2	0.89	-	0.964	0.951	0.962	0.952	C1.2.2	0.925	-	0.961	0.920	0.978	0.830
C1.3.2	0.869	0.964	-	0.941	0.956	0.942	C1.3.2	0.900	0.961	-	0.915	0.954	0.771
C1.4.2	0.886	0.951	0.941	-	0.864	0.824	C1.4.2	0.928	0.920	0.915	-	0.885	0.884
C1.5.2	0.851	0.962	0.956	0.864	-	0.938	C1.5.2	0.935	0.978	0.954	0.885	-	0.875
C1.6.2	0.827	0.952	0.942	0.824	0.938	-	C1.6.2	0.745	0.830	0.771	0.884	0.875	-

Tabelle 3.22 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 2

Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y						
	C1.1.3	C1.2.3	C1.3.3	C1.4.3	C1.5.3	C1.6.3		C1.1.3	C1.2.3	C1.3.3	C1.4.3	C1.5.3	C1.6.3
C1.1.3	-	0.881	0.827	0.836	0.932	0.872	C1.1.3	-	0.922	0.931	0.902	0.921	0.922
C1.2.3	0.881	-	0.976	0.667	0.901	0.871	C1.2.3	0.922	-	0.969	0.930	0.908	0.893
C1.3.3	0.827	0.976	-	0.510	0.884	0.906	C1.3.3	0.931	0.969	-	0.941	0.944	0.933
C1.4.3	0.836	0.667	0.510	-	0.750	0.564	C1.4.3	0.902	0.930	0.941	-	0.891	0.870
C1.5.3	0.932	0.901	0.884	0.750	-	0.928	C1.5.3	0.921	0.908	0.944	0.891	-	0.922
C1.6.3	0.872	0.871	0.906	0.564	0.928	-	C1.6.3	0.922	0.893	0.933	0.870	0.922	-

Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X						
	C1.1.3	C1.2.3	C1.3.3	C1.4.3	C1.5.3	C1.6.3		C1.1.3	C1.2.3	C1.3.3	C1.4.3	C1.5.3	C1.6.3
C1.1.3	-	0.911	0.930	0.894	0.895	0.910	C1.1.3	-	0.869	0.814	0.817	0.917	0.881
C1.2.3	0.911	-	0.974	0.939	0.895	0.892	C1.2.3	0.869	-	0.924	0.760	0.905	0.852
C1.3.3	0.930	0.974	-	0.816	0.896	0.900	C1.3.3	0.814	0.924	-	0.745	0.944	0.900
C1.4.3	0.894	0.939	0.816	-	0.698	0.648	C1.4.3	0.817	0.760	0.745	-	0.901	0.832
C1.5.3	0.895	0.895	0.896	0.698	-	0.924	C1.5.3	0.917	0.905	0.944	0.901	-	0.927
C1.6.3	0.910	0.892	0.900	0.648	0.924	-	C1.6.3	0.881	0.852	0.900	0.832	0.927	-

Tabelle 3.23 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 3

		Rotazione X -Rotazione X								Rotazione Y -Rotazione Y					
		C1.1.4	C1.2.4	C1.3.4	C1.4.4	C1.5.4	C1.6.4			C1.1.4	C1.2.4	C1.3.4	C1.4.4	C1.5.4	C1.6.4
C1.1.4	-	0.825	0.427	0.564	0.457	0.350		C1.1.4	-	0.941	0.940	0.911	0.881	0.935	
C1.2.4	0.825	-	0.795	0.863	0.796	0.713		C1.2.4	0.941	-	0.967	0.949	0.932	0.968	
C1.3.4	0.427	0.795	-	0.949	0.899	0.978		C1.3.4	0.940	0.967	-	0.978	0.949	0.969	
C1.4.4	0.564	0.863	0.949	-	0.842	0.933		C1.4.4	0.911	0.949	0.978	-	0.972	0.964	
C1.5.4	0.457	0.796	0.899	0.842	-	0.859		C1.5.4	0.881	0.932	0.949	0.972	-	0.952	
C1.6.4	0.350	0.713	0.978	0.933	0.859	-		C1.6.4	0.935	0.968	0.969	0.964	0.952	-	

		Rotazione X -Rotazione Y								Rotazione Y -Rotazione X					
		C1.1.4	C1.2.4	C1.3.4	C1.4.4	C1.5.4	C1.6.4			C1.1.4	C1.2.4	C1.3.4	C1.4.4	C1.5.4	C1.6.4
C1.1.4	-	0.468	0.438	0.366	0.270	0.424		C1.1.4	-	0.863	0.936	0.930	0.837	0.910	
C1.2.4	0.468	-	0.725	0.625	0.767	0.767		C1.2.4	0.863	-	0.969	0.926	0.857	0.950	
C1.3.4	0.438	0.798	-	0.967	0.952	0.984		C1.3.4	0.936	0.969	-	0.943	0.860	0.958	
C1.4.4	0.366	0.725	0.967	-	0.866	0.942		C1.4.4	0.930	0.926	0.943	-	0.804	0.968	
C1.5.4	0.270	0.625	0.952	0.866	-	0.878		C1.5.4	0.837	0.857	0.860	0.804	-	0.964	
C1.6.4	0.424	0.767	0.984	0.942	0.878	-		C1.6.4	0.910	0.950	0.958	0.968	0.964	-	

Tabelle 3.24 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 4

		Rotazione X -Rotazione X								Rotazione Y -Rotazione Y					
		C1.1.5	C1.2.5	C1.3.5	C1.4.5	C1.5.5	C1.6.5			C1.1.5	C1.2.5	C1.3.5	C1.4.5	C1.5.5	C1.6.5
C1.1.5	-	0.615	0.966	0.947	0.964	0.839		C1.1.5	-	0.897	0.932	0.946	0.939	0.829	
C1.2.5	0.615	-	0.689	0.499	0.671	0.591		C1.2.5	0.897	-	0.961	0.943	0.970	0.921	
C1.3.5	0.966	0.689	-	0.897	0.980	0.765		C1.3.5	0.932	0.961	-	0.960	0.988	0.910	
C1.4.5	0.947	0.499	0.897	-	0.906	0.958		C1.4.5	0.946	0.943	0.960	-	0.976	0.973	
C1.5.5	0.964	0.671	0.980	0.906	-	0.788		C1.5.5	0.939	0.970	0.988	0.976	-	0.954	
C1.6.5	0.839	0.591	0.765	0.958	0.788	-		C1.6.5	0.829	0.921	0.910	0.973	0.954	-	

		Rotazione X -Rotazione Y								Rotazione Y -Rotazione X					
		C1.1.5	C1.2.5	C1.3.5	C1.4.5	C1.5.5	C1.6.5			C1.1.5	C1.2.5	C1.3.5	C1.4.5	C1.5.5	C1.6.5
C1.1.5	-	0.919	0.975	0.937	0.959	0.860		C1.1.5	-	0.400	0.900	0.922	0.920	0.773	
C1.2.5	0.919	-	0.638	0.483	0.615	0.552		C1.2.5	0.400	-	0.914	0.935	0.925	0.902	
C1.3.5	0.975	0.638	-	0.900	0.951	0.779		C1.3.5	0.900	0.914	-	0.953	0.969	0.886	
C1.4.5	0.937	0.483	0.900	-	0.965	0.978		C1.4.5	0.922	0.935	0.953	-	0.902	0.923	
C1.5.5	0.959	0.615	0.951	0.965	-	0.791		C1.5.5	0.920	0.925	0.969	0.902	-	0.922	
C1.6.5	0.860	0.552	0.779	0.978	0.791	-		C1.6.5	0.773	0.902	0.886	0.923	0.922	-	

Tabelle 3.25 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori del gruppo 5

		Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y				
		C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5			C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5
C1.1.1	-	0.807	0.953	0.337	0.941	C1.1.1	-	0.929	0.847	0.933	0.744		
C1.1.2	0.807	-	0.934	0.333	0.897	C1.1.2	0.929	-	0.962	0.924	0.895		
C1.1.3	0.953	0.934	-	0.314	0.947	C1.1.3	0.847	0.962	-	0.875	0.945		
C1.1.4	0.337	0.333	0.314	-	0.415	C1.1.4	0.933	0.924	0.875	-	0.766		
C1.1.5	0.941	0.897	0.947	0.415	-	C1.1.5	0.744	0.895	0.945	0.766	-		

		Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X				
		C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5			C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.4	C1.1.5
C1.1.1	-	0.886	0.899	0.769	0.941	C1.1.1	-	0.825	0.852	0.680	0.929		
C1.1.2	0.886	-	0.906	0.835	0.824	C1.1.2	0.825	-	0.934	0.413	0.970		
C1.1.3	0.899	0.906	-	0.838	0.926	C1.1.3	0.852	0.934	-	0.275	0.955		
C1.1.4	0.769	0.835	0.838	-	0.102	C1.1.4	0.680	0.413	0.275	-	0.914		
C1.1.5	0.941	0.824	0.926	0.102	-	C1.1.5	0.929	0.970	0.955	0.914	-		

Tabelle 3.26 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 1

		Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y				
		C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5			C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5
C1.2.1	-	0.918	0.892	0.715	0.570	C1.2.1	-	0.868	0.852	0.859	0.733		
C1.2.2	0.918	-	0.987	0.872	0.686	C1.2.2	0.868	-	0.968	0.967	0.941		
C1.2.3	0.892	0.987	-	0.926	0.777	C1.2.3	0.852	0.968	-	0.937	0.882		
C1.2.4	0.715	0.872	0.926	-	0.911	C1.2.4	0.859	0.967	0.937	-	0.920		
C1.2.5	0.570	0.686	0.777	0.911	-	C1.2.5	0.733	0.941	0.882	0.920	-		

		Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X				
		C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5			C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.2.5
C1.2.1	-	0.964	0.918	0.953	0.920	C1.2.1	-	0.856	0.835	0.705	0.508		
C1.2.2	0.964	-	0.957	0.927	0.868	C1.2.2	0.856	-	0.962	0.813	0.683		
C1.2.3	0.918	0.957	-	0.930	0.853	C1.2.3	0.835	0.962	-	0.817	0.660		
C1.2.4	0.953	0.927	0.930	-	0.691	C1.2.4	0.705	0.813	0.817	-	0.665		
C1.2.5	0.920	0.868	0.853	0.691	-	C1.2.5	0.508	0.683	0.660	0.665	-		

Tabelle 3.27 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 2

		Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y				
		C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5			C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5
C1.3.1		-	0.973	0.908	0.954	0.969	C1.3.1		-	0.945	0.963	0.938	0.929
C1.3.2	0.973	-	0.938	0.939	0.965		C1.3.2	0.945	-	0.969	0.955	0.970	
C1.3.3	0.908	0.938	-	0.920	0.924		C1.3.3	0.963	0.969	-	0.976	0.968	
C1.3.4	0.954	0.939	0.920	-	0.964		C1.3.4	0.938	0.955	0.976	-	0.983	
C1.3.5	0.969	0.965	0.924	0.964	-		C1.3.5	0.929	0.970	0.968	0.983	-	

		Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X				
		C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5			C1.3.1	C1.3.2	C1.3.3	C1.3.4	C1.3.5
C1.3.1		-	0.977	0.970	0.936	0.945	C1.3.1		-	0.944	0.933	0.960	0.955
C1.3.2	0.977	-	0.963	0.926	0.93		C1.3.2	0.944	-	0.874	0.962	0.974	
C1.3.3	0.970	0.963	-	0.910	0.888		C1.3.3	0.933	0.874	-	0.970	0.982	
C1.3.4	0.936	0.926	0.910	-	0.976		C1.3.4	0.960	0.962	0.970	-	0.965	
C1.3.5	0.945	0.93	0.888	0.976	-		C1.3.5	0.955	0.974	0.982	0.965	-	

Tabelle 3.28 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 3

		Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y				
		C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5			C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5
C1.4.1		-	0.928	0.772	0.840	0.935	C1.4.1		-	0.927	0.876	0.921	0.885
C1.4.2	0.928	-	0.843	0.818	0.983		C1.4.2	0.927	-	0.930	0.963	0.950	
C1.4.3	0.772	0.843	-	0.609	0.782		C1.4.3	0.876	0.930	-	0.896	0.868	
C1.4.4	0.840	0.818	0.609	-	0.865		C1.4.4	0.921	0.963	0.896	-	0.961	
C1.4.5	0.935	0.983	0.782	0.865	-		C1.4.5	0.885	0.950	0.868	0.961	-	

		Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X				
		C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5			C1.4.1	C1.4.2	C1.4.3	C1.4.4	C1.4.5
C1.4.1		-	0.933	0.887	0.900	0.922	C1.4.1		-	0.878	0.655	0.916	0.910
C1.4.2	0.933	-	0.844	0.924	0.974		C1.4.2	0.878	-	0.832	0.915	0.946	
C1.4.3	0.887	0.844	-	0.743	0.818		C1.4.3	0.655	0.832	-	0.851	0.847	
C1.4.4	0.900	0.924	0.743	-	0.841		C1.4.4	0.916	0.915	0.851	-	0.957	
C1.4.5	0.922	0.974	0.818	0.841	-		C1.4.5	0.910	0.946	0.847	0.957	-	

Tabelle 3.29 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 4

		Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y				
		C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5			C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5
C1.5.1	-	0.884	0.901	0.863	0.931	C1.5.1	-	0.975	0.933	0.945	0.968		
C1.5.2	0.884	-	0.945	0.862	0.967	C1.5.2	0.975	-	0.954	0.912	0.952		
C1.5.3	0.901	0.945	-	0.903	0.954	C1.5.3	0.933	0.954	-	0.897	0.931		
C1.5.4	0.863	0.862	0.903	-	0.906	C1.5.4	0.945	0.912	0.897	-	0.975		
C1.5.5	0.931	0.967	0.954	0.906	-	C1.5.5	0.968	0.952	0.931	0.975	-		

		Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X				
		C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5			C1.5.1	C1.5.2	C1.5.3	C1.5.4	C1.5.5
C1.5.1	-	0.892	0.875	0.942	0.955	C1.5.1	-	0.961	0.940	0.882	0.969		
C1.5.2	0.892	-	0.944	0.885	0.941	C1.5.2	0.961	-	0.944	0.871	0.968		
C1.5.3	0.875	0.944	-	0.887	0.925	C1.5.3	0.940	0.944	-	0.855	0.939		
C1.5.4	0.942	0.885	0.887	-	0.822	C1.5.4	0.882	0.871	0.855	-	0.900		
C1.5.5	0.955	0.941	0.925	0.822	-	C1.5.5	0.969	0.968	0.939	0.900	-		

Tabelle 3.30 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 5

		Rotazione X -Rotazione X							Rotazione Y -Rotazione Y				
		C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5			C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
C1.6.1	-	0.867	0.923	0.880	0.663	C1.6.1	-	0.896	0.964	0.947	0.787		
C1.6.2	0.867	-	0.781	0.743	0.511	C1.6.2	0.896	-	0.923	0.933	0.642		
C1.6.3	0.923	0.781	-	0.956	0.801	C1.6.3	0.964	0.923	-	0.976	0.829		
C1.6.4	0.880	0.743	0.956	-	0.923	C1.6.4	0.947	0.933	0.976	-	0.879		
C1.6.5	0.663	0.511	0.801	0.923	-	C1.6.5	0.787	0.642	0.829	0.879	-		

		Rotazione X -Rotazione Y							Rotazione Y -Rotazione X				
		C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5			C1.6.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
C1.6.1	-	0.885	0.899	0.903	0.646	C1.6.1	-	0.722	0.946	0.947	0.816		
C1.6.2	0.885	-	0.753	0.789	0.470	C1.6.2	0.722	-	0.902	0.910	0.654		
C1.6.3	0.899	0.753	-	0.952	0.753	C1.6.3	0.946	0.902	-	0.973	0.847		
C1.6.4	0.903	0.789	0.952	-	0.912	C1.6.4	0.947	0.910	0.973	-	0.878		
C1.6.5	0.646	0.470	0.753	0.912	-	C1.6.5	0.816	0.654	0.847	0.878	-		

Tabelle 3.31 Cross-correlazioni tra rotazioni X (a), Y (b) e miste (c, d) relativi ai sensori della trave 6

Come si può vedere dalle tabelle, tutti i coefficienti di correlazione calcolati dopo gli algoritmi di pulizia sono decisamente alti e a parte alcuni casi specifici. Per una maggiore leggibilità dei risultati, sono stati evidenziati in arancione i valori dei coefficienti di correlazione inferiori a 0.7.

In generale, si possono notare due particolarità. In primo luogo, sia per i gruppi di sensori allineati trasversalmente sia per quelli allineati longitudinalmente, le anomalie sono presenti solo nel caso delle rotazioni X (e dunque nel caso dei coefficienti di correlazione XX, XY e YX) e non si presentano mai in maniera casuale ma si pongono sempre sulla riga e sulla colonna relative a pochi sensori.

Di seguito, si analizzano in maniera sistematica tutti i valori più bassi dei coefficienti di correlazione assegnando ai sensori un livello di attenzione basso, medio o alto a seconda della severità dell'anomalia e ricordando che i valori evidenziati in arancione includono valori nell'ordine di 0.6- 0.7 i quali sono bassi se messi a confronto con la tendenza media ma non in termini assoluti.

Nel caso dei segnali relativi ai sensori allineati in direzione trasversale, si riscontrano delle anomalie più leggere nel caso dei primi due gruppi e più severe nel caso degli ultimi 3 come riportato di seguito.

- **GRUPPO 1:** in questo gruppo, si riscontra unicamente una coppia di sensori scarsamente correlata (C1.1.1-C.1.6.1). Questa anomalia non crea particolari preoccupazioni poiché i due sensori si trovano sulle travi ai due estremi della campata e il coefficiente di correlazione ha un valore non troppo basso. Tuttavia, è possibile riscontrare una leggera diminuzione della correlazione anche in altri coefficienti presenti nella colonna del sensore C1.6.1, i quali presentano valori leggermente inferiori rispetto agli altri (0.733, 0.816).
- **GRUPPO 2:** in questo gruppo, si riscontrano due coppie di sensori scarsamente correlate (C1.1.2-C.1.6.2 e C1.4.2-1.6.2). Pur non essendo particolarmente allarmante, è comunque necessario verificare il sensore C1.6.2 poiché presenta i segnali scorrelati rispetto a due diversi sensori allineati trasversalmente.
- **GRUPPO 3:** in questo gruppo, si riscontrano tre coppie di sensori scarsamente correlate (C1.2.3-C.1.4.3, C1.3.3-1.4.3 e C1.4.3-1.6.3). Questa anomalia risulta essere più pesante delle precedenti poiché il sensore C1.4.3 acquisisce in maniera mediamente scorrelata da 3 sensori con cui è allineato trasversalmente. Inoltre, anche la correlazione con il sensore C1.5.3 (pari a 0.75) risulta essere inferiore ai valori medi. Per di più, a differenza dei casi precedenti, queste tendenze vengono confermate anche nella tabella dei coefficienti di correlazione XY e sarà perciò necessario verificare lo strumento C1.4.3.
- **GRUPPO 4:** in questo gruppo, si riscontrano ben 6 coppie di sensori scarsamente correlate (C1.1.4-C.1.2.4, C1.1.4-1.3.4, C1.1.4-1.4.4, C1.1.4-1.5.4, C1.1.4-1.6.4 e C1.2.4-1.4.4). Le anomalie presenti in questo gruppo sono importanti poiché il sensore C1.1.4 sta ha acquisito dati in maniera altamente scorrelata dagli altri sensori allineati trasversalmente con valori molto bassi dei coefficienti. Ciò è aggravato dal fatto che questa tendenza preoccupante compare sia nei coefficienti di correlazione XX sia in quelli XY. Sarà necessario verificare anche il sensore C1.2.4 a cui corrispondono coefficienti minori dei valori medi (0.7 e 0.8),

- **GRUPPO 5:** in questo gruppo, si riscontrano ben 5 coppie di sensori scarsamente correlate (C1.1.5-C.1.2.5, C1.2.5-C.1.3.5, C1.2.5-1.4.5, C1.2.5-1.5.4 e C1.2.5-1.6.5). Anche in questo caso, compare una tendenza da controllare del sensore C1.2.5, il quale sembrerebbe misurare in maniera decisamente scorrelata da tutti gli altri. Inoltre, anche in questo caso, tale tendenza viene parzialmente confermata nei coefficienti di correlazioni misti XY e YX.

Dunque al termine di questa prima analisi, l'attenzione è molto elevata per i sensori C1.1.4 e C.1.2.5, media per i sensori C1.2.4 e C 1.4.3 e bassa per i sensori C1.6.1 e C1.6.2. A questo punto, si procede con l'analisi dei sensori allineati in direzione longitudinale, la quale evidenzia la presenza di anomalie sulla prima, sulla seconda, sulla quarta e sulla sesta trave come riportato di seguito.

- **TRAVE 1:** su questa trave, si riscontrano ben 4 coppie di sensori scarsamente correlate (C1.1.1-C.1.1.4, C1.1.2-C.1.1.4, C1.1.3-1.1.4 e C1.1.4-1.1.5). In questo caso, i coefficienti di correlazione XX, XY e YX suggeriscono che il sensore C1.1.4 risulta essere scorrelato da tutti gli altri sensori presenti sulla trave.
- **TRAVE 2:** su questa trave, si riscontrano ben 4 coppie di sensori scarsamente correlate (C1.2.1-C.1.2.5, C1.2.2-C.1.2.5, C1.2.3-1.2.5 e C1.2.4-1.2.5). Come nel caso precedente, il sensore C1.2.5 sembrerebbe misurare in maniera scorrelata dagli altri sensori della trave.
- **TRAVE 4:** su questa trave, si riscontrano 2 coppie di sensori scarsamente correlate (C1.4.1-C.1.4.3 e C1.4.3-C.1.4.4). In questo caso, l'anomalia sembrerebbe non troppo severa poiché i coefficienti di correlazione sulla riga e sulla colonna di C1.4.3 sono abbastanza elevati; tuttavia, sarà necessario verificare anche il sensore C1.4.3.
- **TRAVE 6:** su questa trave, si riscontra un'unica coppia di sensori scarsamente correlata (C1.6.2-C.1.6.5). Pur essendo evidenziata un'unica anomalia, sarà opportuno prestare una particolare attenzione al sensore C1.6.2 poiché la riga e la colonna corrispondenti presentano coefficienti più bassi dei valori medi (0.7-0.8).

Incrociando i risultati nelle due direzioni, si osserva che i sensori che creano problemi sono i medesimi. In particolare, i sensori che hanno le tendenze più preoccupanti, sono i sensori C.1.1.4 e i sensori C.1.2.5 che risultano avere dei coefficienti di correlazioni molto basse con i sensori allineati in entrambe le direzioni. Poi, secondariamente, sarà opportuno verificare anche i sensori 1.2.4, C1.4.3, C1.6.1 e C1.6.2 che, pur avendo dei coefficienti di correlazione non troppo bassi, trovano una corrispondenza tra la direzione longitudinale e la direzione trasversale. In Figura 3.30, si riporta la pianta con i sensori nella quale viene indicato il livello di attenzione che sarà necessario dedicare a ogni strumento. Per quanto riguarda la direzione degli assi dell'inclinometro, non vi sono indicazioni certe sulla loro direzione. Tuttavia, una volta note le caratteristiche dello strumento installato, si saprà già che i problemi nell'acquisizione si sono manifestati lungo la direzione X.



Figura 3.30 Pianta della campata con i sensori anomali segnalati

In Figura 3.30, si sono evidenziati i sensori che presentano le tendenze anomale descritte nella pagina precedente; in particolare, i sensori rossi hanno correlazioni basse con tutti i sensori allineati in entrambe le direzioni, i sensori arancioni hanno presentato correlazioni basse con buona parte dei sensori allineati in entrambe le direzioni e i sensori verdi presentano correlazioni basse soltanto con alcuni dei sensori allineati in entrambe le direzioni.

Osservando la pianta dell'impalcato, si può notare che le anomalie rilevate interessano sensori che sono allineati lungo una diagonale e che si concentrano in particolar modo nell'angolo in alto a destra della campata. Inoltre, questi trend si fanno più marcati percorrendo la diagonale da sinistra a destra. Questi risultati suggeriscono la presenza di problemi che non si può conoscere a priori. Risulta dunque opportuno effettuare un'ispezione della struttura verificando le condizioni dei sensori interessati e controllando il viadotto in loro corrispondenza per verificare eventuali guasti e cercare la presenza di qualche causa esterna che possa aver disturbato la misurazione da parte dell'inclinometro.

3.3.7 Analisi su finestre temporali ristrette

Visti i risultati ottenuti, si sceglie di analizzare i sensori anomali in maniera più approfondita effettuando delle cross-correlazioni su intervalli temporali più ristretti per valutare l'andamento dei coefficienti di correlazione che erano risultati bassi considerando l'intero periodo di monitoraggio.

In particolare, si considerano i segnali di rotazione X dei sensori C1.1.4, C1.2.5, C1.2.4, C1.4.3, C1.6.2, C1.6.1 e, per ognuno, si effettua la cross correlazione con i 4 sensori allineati longitudinalmente e con i 5 sensori allineati trasversalmente su un intervallo di tempo variabile. In particolare, si parte con i dati relativi alle prime 2 settimane di monitoraggio e si procede aggiungendo progressivamente una settimana di dati alla volta fino a raggiungere le 17 settimane totali.

Nelle Figure 3.31, 3.32, 3.33, 3.34, 3.35 e 3.36 si riporta l'andamento dei coefficienti di correlazione tra i segnali di rotazione X in funzione del numero di settimane di dati analizzato. Nelle Tabelle 3.32, 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 e 3.37 si riportano le variazioni percentuali subite ogni settimana dai coefficienti di correlazione e, in particolare, si evidenziano in arancione tutti i decrementi che superano il 10%. Di seguito, si riportano le osservazioni rilevate nei risultati di tutti i sensori anomali.

- **C1.1.4:** osservando il grafico in Figura 3.31, si nota che la correlazione con i sensori allineati nelle due direzioni ha un andamento monotono decrescente per quasi tutto il periodo di monitoraggio con decrementi costanti che arrivano fino al 25%. Nelle ultime 2-3 settimane di monitoraggio si registra un incremento delle correlazioni.
- **C1.2.5:** osservando il grafico in Figura 3.32, si nota che la correlazione con i sensori allineati nelle due direzioni tende a diminuire lievemente con decrementi medi che si mantengono inferiori al 5%.
- **C1.2.4:** osservando il grafico in Figura 3.33, si nota che la correlazione con i sensori allineati nelle due direzioni tende a mantenersi pressochè con oscillazioni percentuali medie che si mantengono inferiori al 5%.
- **C1.4.3:** osservando il grafico in Figura 3.34, si nota che la correlazione con i sensori allineati nelle due direzioni subisce un brusco crollo nelle prime 4 settimane per poi avere una costante ripresa fino alla fine del monitoraggio. Questo comportamento è probabilmente indice di un periodo di temporaneo malfunzionamento del sensore.
- **C1.6.2:** osservando il grafico in Figura 3.35, si nota che la correlazione con i sensori allineati nelle due direzioni subisce una leggera diminuzione nelle prime 2 settimane per poi mantenersi circa costante per il resto del monitoraggio.
- **C1.6.1:** osservando il grafico in Figura 3.36, si nota che la correlazione con i sensori allineati nelle due direzioni si mantiene costante eccetto che per due sensori che subiscono un decremento per poi progressivamente ritornare a valori normali.

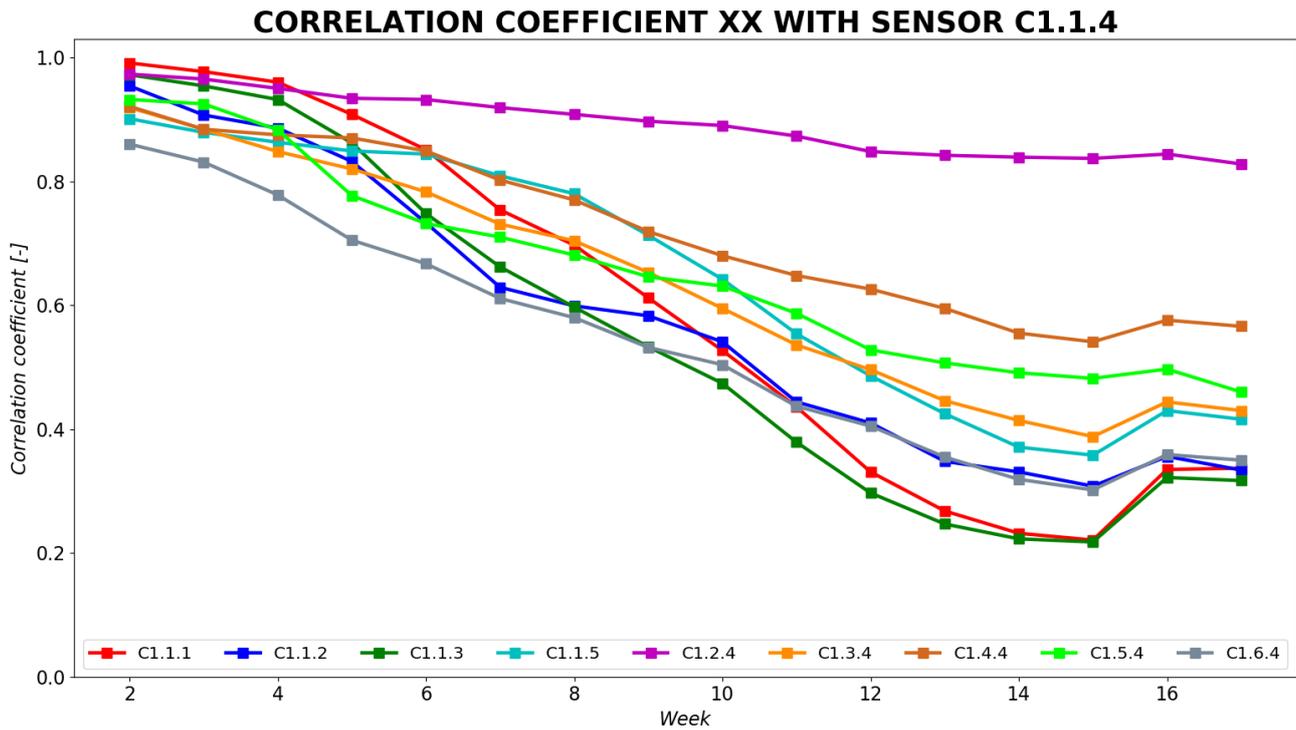


Figura 3.31 Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.1.4

		C1.1.1	C1.1.2	C1.1.3	C1.1.5	C1.2.4	C1.3.4	C1.4.4	C1.5.4	C1.6.4
C1.1.4	3 settimane	-1,4%	-4,9%	-1,9%	-2,4%	-0,8%	-3,8%	-4,0%	-0,8%	-3,4%
	4 settimane	-1,7%	-2,3%	-2,3%	-1,8%	-1,6%	-4,1%	-1,0%	-4,5%	-6,4%
	5 settimane	-5,4%	-6,1%	-7,5%	-1,6%	-1,7%	-3,3%	-0,6%	-12,0%	-9,4%
	6 settimane	-6,3%	-11,9%	-13,2%	-0,6%	-0,2%	-4,5%	-2,4%	-5,8%	-5,4%
	7 settimane	-11,4%	-14,2%	-11,5%	-4,1%	-1,4%	-6,6%	-5,5%	-3,0%	-8,4%
	8 settimane	-7,6%	-4,8%	-9,8%	-3,6%	-1,2%	-3,7%	-4,0%	-4,1%	-5,1%
	9 settimane	-12,2%	-2,7%	-10,7%	-8,6%	-1,2%	-7,2%	-6,6%	-5,1%	-8,3%
	10 settimane	-13,9%	-7,2%	-11,1%	-10,0%	-0,8%	-8,9%	-5,4%	-2,3%	-5,3%
	11 settimane	-17,3%	-17,9%	-20,0%	-13,7%	-1,9%	-9,9%	-4,7%	-7,0%	-13,3%
	12 settimane	-24,1%	-7,7%	-21,6%	-12,3%	-2,9%	-7,5%	-3,4%	-10,1%	-7,3%
	13 settimane	-19,0%	-15,1%	-16,8%	-12,6%	-0,7%	-10,1%	-5,0%	-4,0%	-12,3%
	14 settimane	-13,4%	-4,9%	-9,7%	-12,7%	-0,4%	-7,2%	-6,7%	-3,2%	-10,1%
	15 settimane	-4,7%	-6,9%	-2,2%	-3,5%	-0,2%	-6,3%	-2,5%	-1,8%	-5,3%
	16 settimane	+51,6%	+15,6%	+47,7%	+20,1%	+0,8%	+14,4%	+6,5%	+3,1%	+18,9%
17 settimane	+0,6%	-6,2%	-1,6%	-3,3%	-1,9%	-3,2%	-1,7%	-7,4%	-2,5%	

Tabelle 3.32 Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.1.4

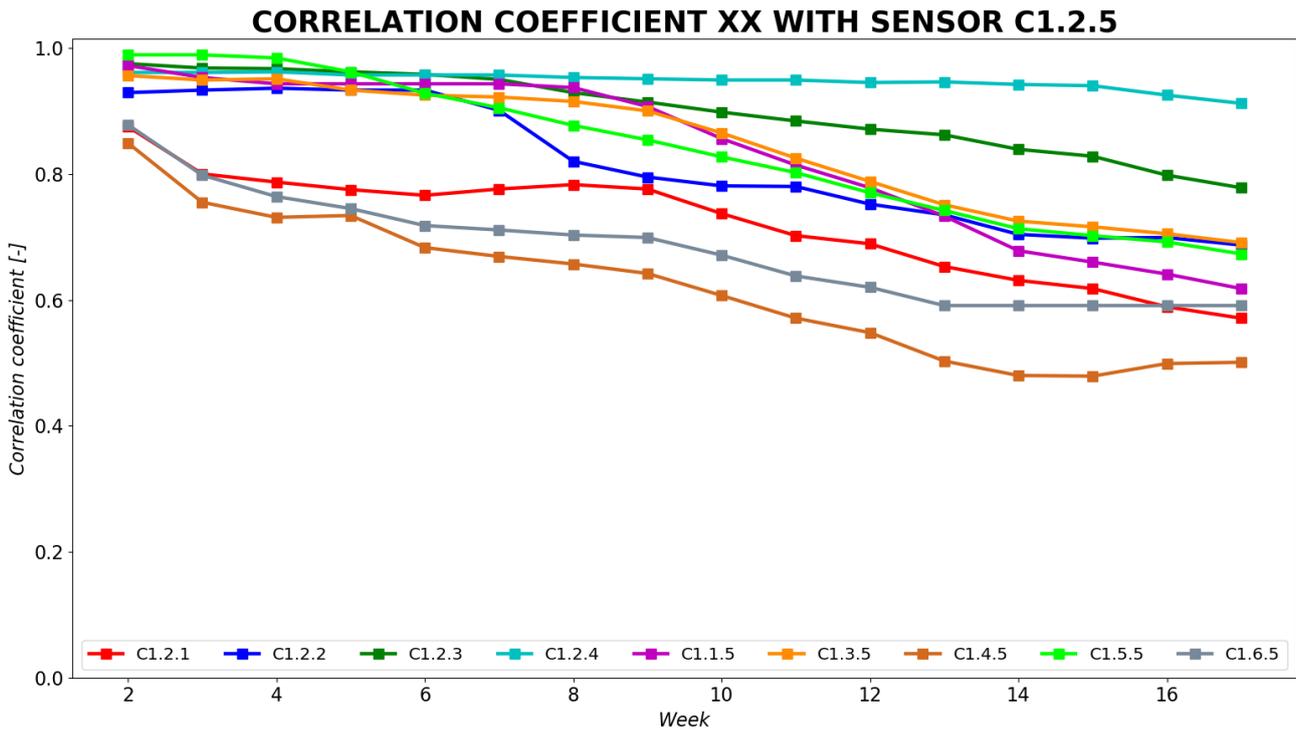


Figura 3.32 Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.2.5

		C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.4	C1.1.5	C1.3.5	C1.4.5	C1.5.5	C1.6.5
C1.2.5	3 settimane	-8,6%	+0,4%	-0,7%	+0,0%	-2,0%	-0,7%	-11,1%	+0,0%	-9,1%
	4 settimane	-1,6%	+0,3%	-0,1%	+0,1%	-1,0%	+0,2%	-3,2%	-0,5%	-4,3%
	5 settimane	-1,5%	-0,3%	-0,5%	-0,5%	+0,0%	-1,9%	+0,4%	-2,2%	-2,5%
	6 settimane	-1,2%	+0,0%	-0,4%	+0,0%	+0,0%	-0,9%	-6,9%	-3,5%	-3,6%
	7 settimane	+1,3%	-3,4%	-0,8%	+0,0%	+0,0%	-0,3%	-2,0%	-2,5%	-1,0%
	8 settimane	+0,9%	-9,0%	-2,2%	-0,4%	-0,6%	-0,8%	-1,8%	-3,1%	-1,1%
	9 settimane	-0,9%	-3,0%	-1,6%	-0,2%	-3,2%	-1,6%	-2,3%	-2,6%	-0,6%
	10 settimane	-5,0%	-1,8%	-1,8%	-0,2%	-5,6%	-3,9%	-5,5%	-3,2%	-4,0%
	11 settimane	-4,7%	-0,1%	-1,6%	+0,0%	-4,9%	-4,6%	-5,9%	-3,0%	-4,9%
	12 settimane	-1,9%	-3,6%	-1,5%	-0,4%	-4,4%	-4,5%	-4,0%	-4,0%	-2,8%
	13 settimane	-5,2%	-2,3%	-1,0%	+0,1%	-5,8%	-4,7%	-8,2%	-3,6%	-4,7%
	14 settimane	-3,4%	-4,2%	-2,7%	-0,4%	-7,5%	-3,5%	-4,6%	-3,9%	+0,0%
	15 settimane	-2,1%	-0,9%	-1,3%	-0,2%	-2,7%	-1,2%	-0,2%	-1,5%	+0,0%
	16 settimane	-4,7%	+0,1%	-3,6%	-1,6%	-2,9%	-1,5%	+4,2%	-1,4%	+0,0%
17 settimane	-3,1%	-1,7%	-2,5%	-1,4%	-3,6%	-2,0%	+0,4%	-2,7%	+0,0%	

Tabelle 3.33 Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.2.5

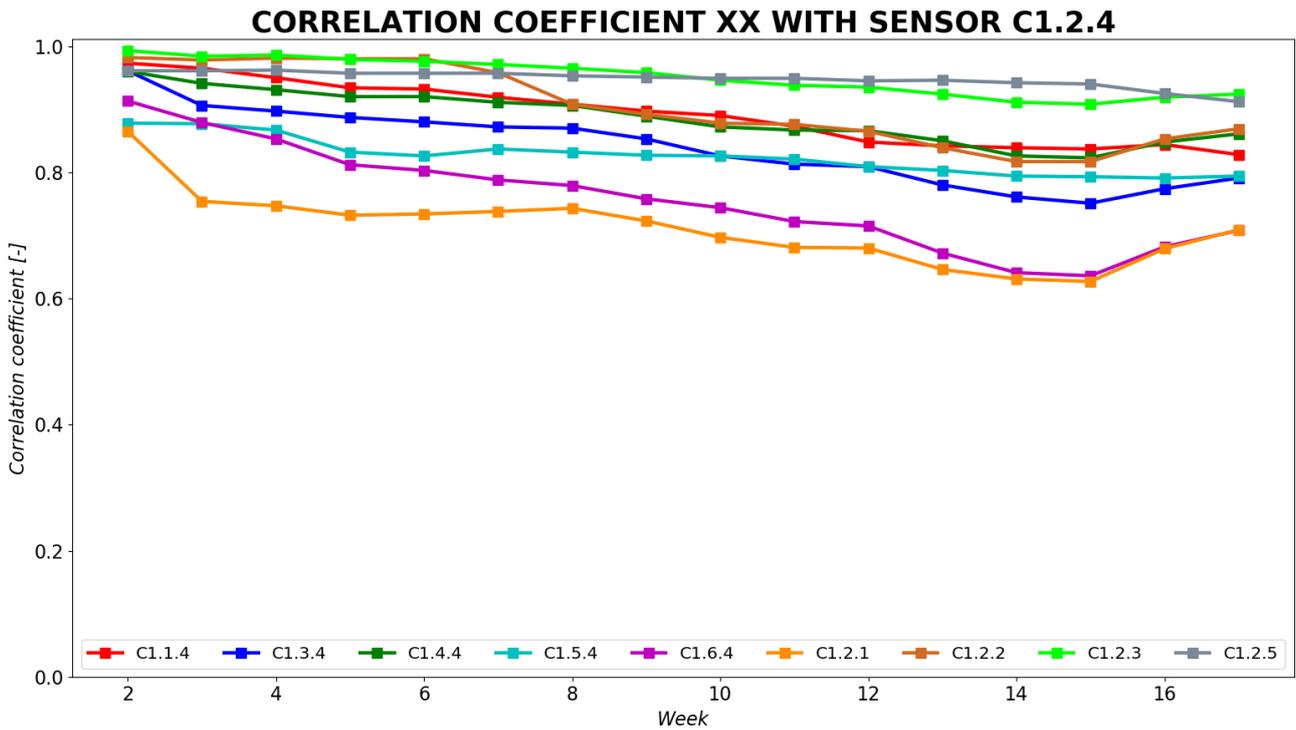


Figura 3.33 Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.2.4

		C1.1.4	C1.3.4	C1.4.4	C1.5.4	C1.6.4	C1.2.1	C1.2.2	C1.2.3	C1.2.5
C1.2.4	3 settimane	-0,8%	-5,7%	-2,0%	-0,1%	-3,7%	-12,8%	-0,4%	-0,9%	+0,0%
	4 settimane	-1,6%	-1,0%	-1,1%	-1,1%	-3,0%	-0,9%	+0,3%	+0,2%	+0,1%
	5 settimane	-1,7%	-1,1%	-1,2%	-4,0%	-4,8%	-2,0%	-0,1%	-0,7%	-0,5%
	6 settimane	-0,2%	-0,8%	+0,0%	-0,7%	-1,1%	+0,3%	+0,0%	-0,3%	+0,0%
	7 settimane	-1,4%	-0,9%	-1,0%	+1,3%	-1,9%	+0,5%	-2,2%	-0,5%	+0,0%
	8 settimane	-1,2%	-0,2%	-0,5%	-0,6%	-1,1%	+0,7%	-5,2%	-0,6%	-0,4%
	9 settimane	-1,2%	-2,0%	-1,9%	-0,6%	-2,7%	-2,7%	-1,8%	-0,7%	-0,2%
	10 settimane	-0,8%	-3,2%	-1,9%	-0,1%	-1,8%	-3,6%	-1,6%	-1,3%	-0,2%
	11 settimane	-1,9%	-1,6%	-0,6%	-0,6%	-3,0%	-2,3%	-0,2%	-0,8%	+0,0%
	12 settimane	-2,9%	-0,5%	-0,1%	-1,5%	-1,0%	-0,1%	-1,3%	-0,3%	-0,4%
	13 settimane	-0,7%	-3,6%	-1,8%	-0,7%	-6,0%	-5,0%	-3,0%	-1,2%	+0,1%
	14 settimane	-0,4%	-2,4%	-2,8%	-1,1%	-4,6%	-2,3%	-2,6%	-1,4%	-0,4%
	15 settimane	-0,2%	-1,3%	-0,4%	-0,1%	-0,8%	-0,6%	+0,0%	-0,3%	-0,2%
	16 settimane	+0,8%	+3,1%	+3,0%	-0,3%	+7,2%	+8,3%	+4,4%	+1,2%	-1,6%
17 settimane	-1,9%	+2,2%	+1,5%	+0,4%	+3,8%	+4,4%	+1,9%	+0,5%	-1,4%	

Tabelle 3.34 Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.2.4

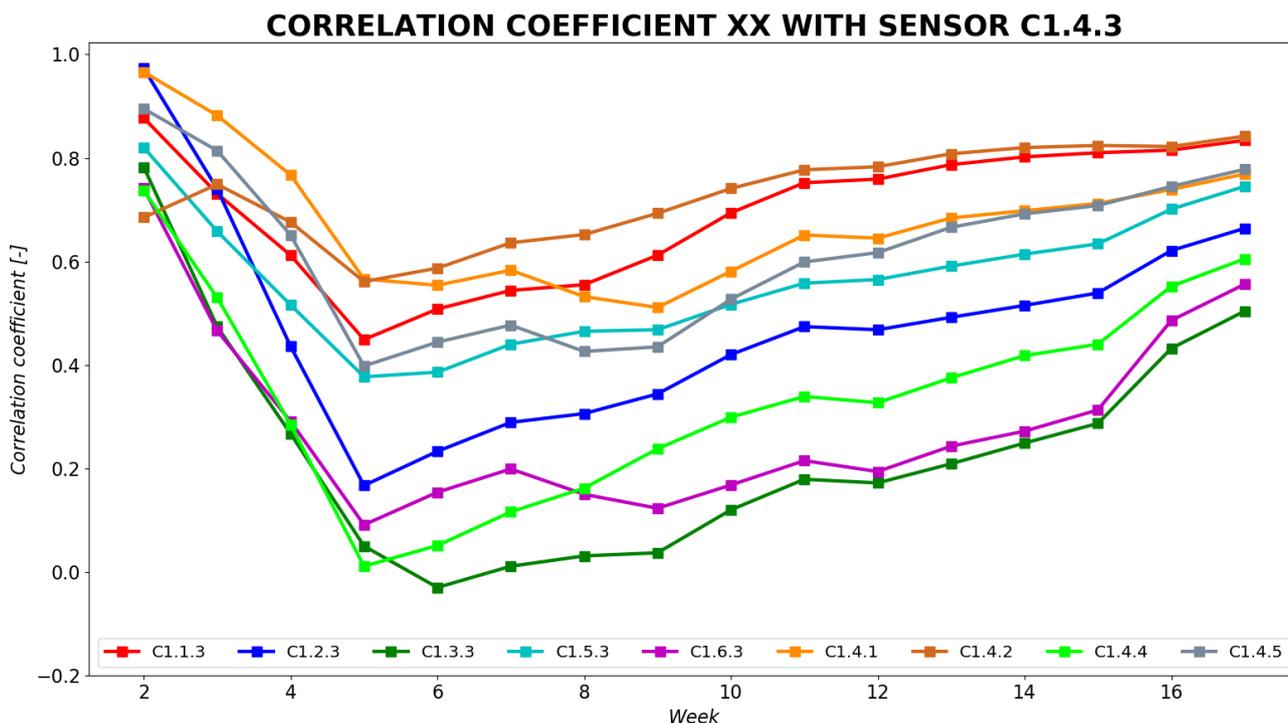


Figura 3.34 Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.4.3

		C1.1.3	C1.2.3	C1.3.3	C1.5.3	C1.6.3	C1.4.1	C1.4.2	C1.4.4	C1.4.5
C1.4.3	3 settimane	-16,6%	-23,9%	-39,4%	-19,8%	-37,1%	-8,7%	+9,3%	-28,1%	-9,1%
	4 settimane	-16,3%	-41,1%	-43,7%	-21,6%	-37,6%	-13,0%	-9,7%	-46,2%	-20,0%
	5 settimane	-26,6%	-61,7%	-81,3%	-26,9%	-68,7%	-26,2%	-17,0%	-96,1%	-38,9%
	6 settimane	+13,1%	+39,5%	-160,0%	+2,4%	+69,2%	-2,1%	+4,6%	+363,6%	+11,6%
	7 settimane	+7,1%	+24,0%	-136,7%	+14,0%	+29,2%	+5,2%	+8,3%	+127,5%	+7,4%
	8 settimane	+2,0%	+5,9%	+181,8%	+5,7%	-24,6%	-8,7%	+2,5%	+39,7%	-10,7%
	9 settimane	+10,3%	+12,4%	+19,4%	+0,6%	-18,0%	-3,9%	+6,3%	+46,9%	+2,1%
	10 settimane	+13,4%	+22,1%	+224,3%	+10,5%	+36,6%	+13,7%	+6,9%	+25,6%	+21,1%
	11 settimane	+8,4%	+12,9%	+49,2%	+7,9%	+28,0%	+12,0%	+4,9%	+13,4%	+13,7%
	12 settimane	+0,9%	-1,3%	-3,9%	+1,3%	-9,8%	-0,9%	+0,8%	-3,5%	+3,0%
	13 settimane	+3,7%	+5,1%	+21,5%	+4,6%	+25,3%	+6,0%	+3,2%	+14,7%	+7,9%
	14 settimane	+1,9%	+4,7%	+19,1%	+3,9%	+11,9%	+2,0%	+1,5%	+11,5%	+3,9%
	15 settimane	+1,0%	+4,7%	+15,3%	+3,3%	+15,1%	+2,0%	+0,5%	+5,3%	+2,3%
	16 settimane	+0,6%	+15,2%	+50,5%	+10,6%	+55,3%	+3,8%	-0,2%	+25,5%	+5,2%
17 settimane	+2,3%	+6,9%	+16,7%	+6,3%	+14,4%	+4,1%	+2,4%	+9,6%	+4,4%	

Tabelle 3.35 Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.4.3

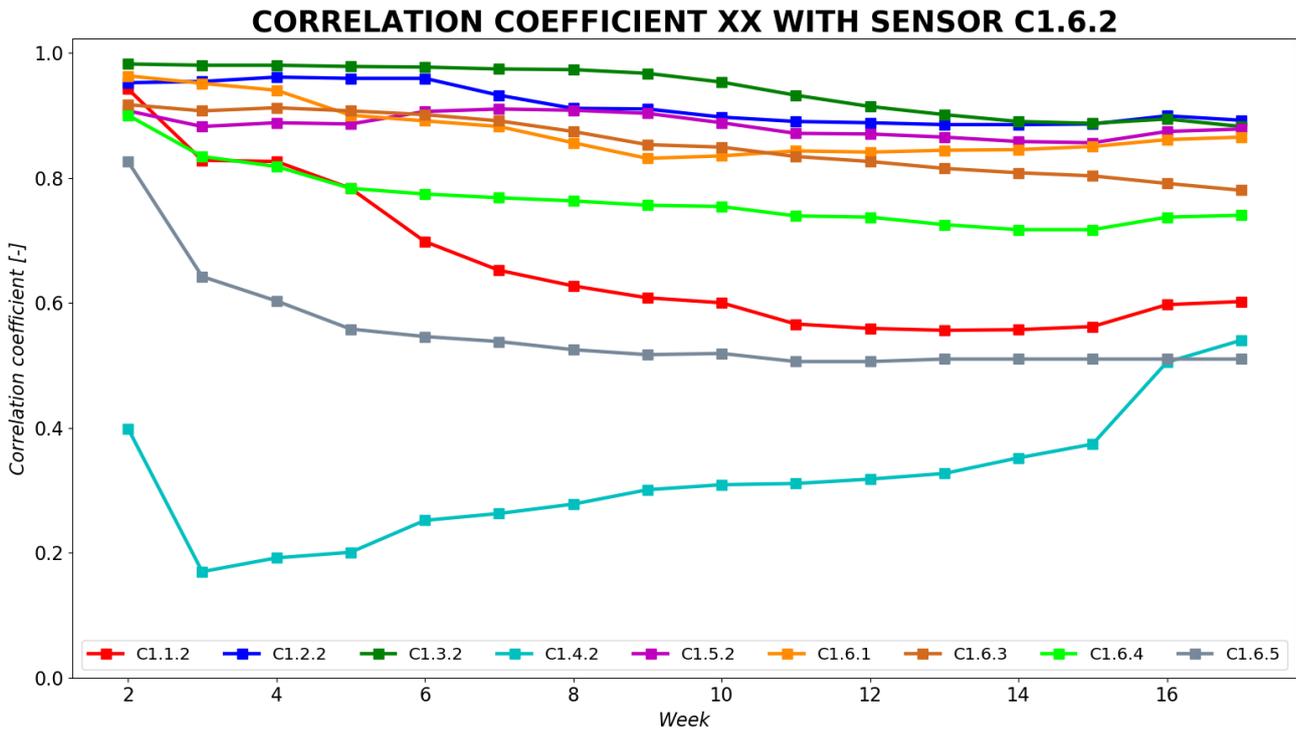


Figura 3.35 Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.6.2

		C1.1.2	C1.2.2	C1.3.2	C1.4.2	C1.5.2	C1.6.1	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
C1.6.2	3 settimane	-12,1%	+0,2%	-0,2%	-57,4%	-2,8%	-1,2%	-1,1%	-7,3%	-22,3%
	4 settimane	-0,2%	+0,7%	+0,0%	+12,9%	+0,7%	-1,2%	+0,6%	-1,9%	-6,1%
	5 settimane	-5,2%	-0,2%	-0,2%	+4,7%	-0,2%	-4,3%	-0,5%	-4,3%	-7,5%
	6 settimane	-10,9%	+0,0%	-0,1%	+25,4%	+2,3%	-1,0%	-0,7%	-1,1%	-2,2%
	7 settimane	-6,6%	-2,8%	-0,3%	+4,4%	+0,4%	-1,0%	-1,1%	-0,8%	-1,5%
	8 settimane	-3,8%	-2,3%	-0,1%	+5,7%	-0,2%	-2,9%	-1,9%	-0,7%	-2,4%
	9 settimane	-3,0%	-0,1%	-0,6%	+8,3%	-0,6%	-2,9%	-2,4%	-0,9%	-1,5%
	10 settimane	-1,3%	-1,4%	-1,4%	+2,7%	-1,7%	+0,5%	-0,5%	-0,3%	+0,4%
	11 settimane	-5,7%	-0,8%	-2,2%	+0,6%	-1,9%	+1,0%	-1,8%	-2,0%	-2,5%
	12 settimane	-1,2%	-0,2%	-1,9%	+2,3%	-0,1%	-0,2%	-1,0%	-0,3%	+0,0%
	13 settimane	-0,5%	-0,3%	-1,4%	+2,8%	-0,6%	+0,4%	-1,3%	-1,6%	+0,8%
	14 settimane	+0,2%	+0,0%	-1,2%	+7,6%	-0,8%	+0,1%	-0,9%	-1,1%	+0,0%
	15 settimane	+0,9%	+0,1%	-0,3%	+6,3%	-0,2%	+0,6%	-0,6%	+0,0%	+0,0%
	16 settimane	+6,2%	+1,5%	+0,8%	+35,0%	+2,1%	+1,3%	-1,5%	+2,8%	+0,0%
17 settimane	+0,8%	-0,8%	-1,3%	+6,9%	+0,5%	+0,5%	-1,4%	+0,4%	+0,0%	

Tabelle 3.36 Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.6.2

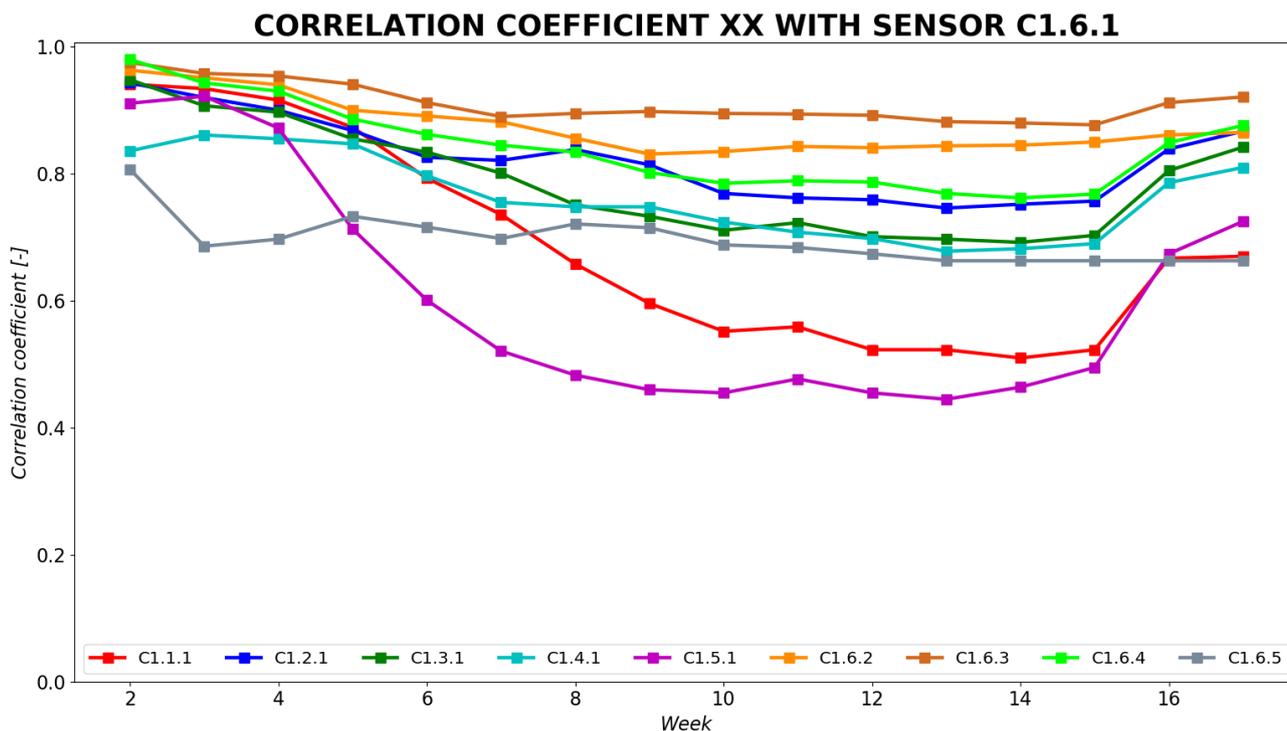


Figura 3.36 Andamento delle correlazioni con il segnale di rotazione X del sensore C1.6.1

		C1.1.1	C1.2.1	C1.3.1	C1.4.1	C1.5.1	C1.6.2	C1.6.3	C1.6.4	C1.6.5
C1.6.1	3 settimane	-0,7%	-2,4%	-4,3%	+3,0%	+1,2%	-1,2%	-1,7%	-3,8%	-15,0%
	4 settimane	-1,9%	-2,2%	-1,1%	-0,7%	-5,4%	-1,2%	-0,4%	-1,4%	+1,6%
	5 settimane	-4,7%	-3,6%	-4,7%	-0,9%	-18,2%	-4,3%	-1,4%	-4,7%	+5,2%
	6 settimane	-9,2%	-4,8%	-2,5%	-5,9%	-15,7%	-1,0%	-3,1%	-2,7%	-2,3%
	7 settimane	-7,2%	-0,6%	-4,0%	-5,3%	-13,3%	-1,0%	-2,4%	-2,0%	-2,5%
	8 settimane	-10,6%	+2,1%	-6,2%	-0,9%	-7,3%	-2,9%	+0,6%	-1,3%	+3,3%
	9 settimane	-9,4%	-2,9%	-2,4%	+0,0%	-4,8%	-2,9%	+0,3%	-3,8%	-0,8%
	10 settimane	-7,4%	-5,5%	-3,0%	-3,2%	-1,1%	+0,5%	-0,3%	-2,1%	-3,8%
	11 settimane	+1,3%	-0,9%	+1,7%	-2,2%	+4,8%	+1,0%	-0,1%	+0,5%	-0,6%
	12 settimane	-6,4%	-0,4%	-3,0%	-1,4%	-4,6%	-0,2%	-0,2%	-0,3%	-1,5%
	13 settimane	+0,0%	-1,7%	-0,6%	-2,9%	-2,2%	+0,4%	-1,1%	-2,3%	-1,6%
	14 settimane	-2,5%	+0,8%	-0,7%	+0,6%	+4,3%	+0,1%	-0,2%	-0,9%	+0,0%
	15 settimane	+2,5%	+0,7%	+1,6%	+1,2%	+6,7%	+0,6%	-0,3%	+0,8%	+0,0%
	16 settimane	+27,5%	+10,8%	+14,5%	+13,9%	+36,2%	+1,3%	+4,0%	+10,5%	+0,0%
17 settimane	+0,4%	+3,3%	+4,6%	+3,1%	+7,6%	+0,5%	+1,0%	+3,2%	+0,0%	

Tabelle 3.37 Variazioni percentuali di correlazione con il sensore C1.6.1

Capitolo 4

Conclusioni e sviluppi futuri

Nel presente lavoro, si è ideato e scritto un codice di calcolo in linguaggio Python per l'analisi di un dataset derivante da una campagna di monitoraggio realmente eseguita su un viadotto autostradale. Giunti al termine dello studio, è opportuno trarre delle conclusioni sui limiti e sulle potenzialità di questo codice nonché sui risultati ottenuti dalle analisi svolte.

4.1 Risultati dell'analisi

Riassumendo, l'analisi dei segnali di output è stata articolata in 3 macro-fasi: pulizia dagli errori strumentali (plateau, errori di traslazione e picchi), svincolamento dalle condizioni termigrometriche (derivate termiche e igrometriche istantanee e differite) e cross-correlazione tra sensori.

4.1.1 Pulizia dagli errori strumentali

Per prima cosa, i segnali sono stati ripuliti dagli errori e, in particolare, dalle porzioni costanti (paragrafo 2.1), dalle porzioni traslate (paragrafo 2.2) e dalle misurazioni che si distaccano dalla tendenza media (paragrafo 2.3). Nelle Tabelle 4.1, 4.2 e 4.3, si riportano i valori di media e scarto quadratico medio dei segnali analizzati prima e dopo l'esecuzione degli algoritmi di pulizia. Osservando i risultati, si nota immediatamente che, in generale, le misurazioni non sembrerebbero essere particolarmente affette dagli errori strumentali in quanto le medie e gli scarti quadratici medi non variano eccessivamente dopo la pulizia eccetto in alcuni casi. Tuttavia, pur essendo presenti pochi errori macroscopici, tutti i segnali subiscono un buon numero di modifiche che però, sulla scala temporale di 4 mesi, non sono visibili considerando anche che la tendenza media non si mantiene circa costante ma varia stagionalmente. Tra tutti i risultati, si evidenziano in particolar modo quelli relativi ai segnali di umidità degli strumenti C1.1.1, C1.1.4, C1.6.2 e C1.6.5 e il segnale di temperatura dello strumento C1.1.1, i quali subiscono un forte decremento dello scarto quadratico medio che, al termine della pulizia, si allinea con i valori degli altri sensori. Questa differenza è dovuta ai plateau di grande lunghezza (e che si distaccano molto dall'andamento medio delle curve) presenti all'interno dei segnali di umidità e temperatura. Nel caso degli altri segnali, invece, gli scarti quadratici medi subiscono delle modifiche molto blande crescendo o decrescendo in maniera apparentemente casuale e assestandosi su valori compresi tra 0.2 e 0.8 milliradianti nel caso delle rotazioni, tra 3 e 5 gradi centigradi nel caso delle temperature e tra il 2% e il 3% nel caso dell'umidità. In conclusione, tarando opportunamente parametri di input, l'utente riuscirà ad ottenere dei buoni risultati.

	Rotazione X				Rotazione Y				Temperatura				Umidità			
	μ_{raw}	μ_{corr}	σ_{raw}	σ_{corr}												
C1.1.1	21.32	21.33	0.83	0.71	-10.01	-9.99	0.26	0.23	21.14	21.72	6.02	3.95	63.6	64.60	8.75	2.66
C1.1.2	-4.77	-4.79	0.38	0.38	-29.43	-29.44	0.31	0.31	21.46	21.65	4.79	4.76	63.08	63.23	2.53	2.51
C1.1.3	-5.93	-5.95	0.46	0.47	-19.89	-19.91	0.28	0.29	21.13	21.52	4.72	4.79	66.5	66.87	3.23	3.23
C1.1.4	3.386	3.37	0.22	0.22	-30.04	-30.06	0.21	0.22	24.89	22.08	5.46	4.84	62.29	63.58	8.43	2.74
C1.1.5	14.16	14.13	0.82	0.85	-28.21	-28.20	0.58	0.60	21.78	21.94	4.84	5.04	57.11	57.40	2.53	2.51
C1.2.1	59.76	59.74	0.35	0.36	-29.02	-29.02	0.12	0.12	21.83	22.01	4.53	4.58	62.43	62.51	2.48	2.51
C1.2.2	48.50	48.43	0.77	0.79	-22.42	-22.48	0.55	0.56	21.24	21.95	4.65	4.79	49.56	49.58	2.15	2.29
C1.2.3	57.64	57.58	0.64	0.62	-9.21	-9.23	0.23	0.22	21.21	22.19	5.71	4.60	65.65	65.86	2.60	2.60
C1.2.4	68.72	68.70	0.34	0.34	-17.93	-17.95	0.21	0.21	21.92	22.17	4.62	4.64	56.13	56.31	2.54	2.55
C1.2.5	64.27	64.23	0.57	0.57	-43.07	-43.07	0.21	0.21	21.60	21.60	4.67	4.67	64.50	64.69	2.61	2.56

Tabella 4.1 Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e puliti dei sensori sulle travi 1 e 2

	Rotazione X				Rotazione Y				Temperatura				Umidità			
	μ_{raw}	μ_{corr}	σ_{raw}	σ_{corr}												
C1.3.1	70.53	70.51	0.33	0.34	-42.35	-42.36	0.26	0.27	21.61	21.86	4.46	4.54	51.31	51.49	2.43	2.42
C1.3.2	66.29	66.24	0.61	0.61	-34.33	-34.36	0.49	0.49	21.36	21.77	4.72	4.60	61.37	61.66	2.46	2.35
C1.3.3	64.46	64.41	0.57	0.56	-9.41	-9.45	0.43	0.42	21.72	22.12	4.73	4.70	64.06	64.41	2.72	2.61
C1.3.4	56.33	56.30	0.41	0.42	-19.91	-19.93	0.41	0.41	22.12	22.33	4.53	4.64	62.85	63.19	2.64	2.57
C1.3.5	72.63	72.63	0.60	0.61	-5.77	-5.77	0.49	0.50	21.61	21.54	4.53	4.59	59.72	59.91	2.51	2.46
C1.4.1	77.20	77.196	0.45	0.45	-24.65	-24.65	0.21	0.21	22.55	22.62	4.41	4.42	58.60	58.66	2.48	2.47
C1.4.2	52.83	52.79	0.56	0.59	-29.35	-29.38	0.41	0.41	21.93	22.37	4.76	4.81	53.70	54.10	2.48	2.39
C1.4.3	61.66	61.66	0.22	0.22	-28.86	-28.87	0.29	0.27	21.63	21.86	4.63	4.55	60.36	60.55	2.69	2.67
C1.4.4	69.40	69.38	0.22	0.22	0.11	0.09	0.32	0.32	21.33	21.67	4.55	4.56	59.53	59.76	2.72	2.76
C1.4.5	64.23	64.22	0.62	0.63	-24.92	-24.92	0.49	0.50	21.97	22.05	4.56	4.67	62.70	62.96	2.70	2.68

Tabella 4.2 Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e puliti dei sensori sulle travi 3 e 4

	Rotazione X				Rotazione Y				Temperatura				Umidità			
	μ_{raw}	μ_{corr}	σ_{raw}	σ_{corr}												
C1.5.1	57.53	57.48	0.79	0.80	-37.91	-37.94	0.49	0.49	22.94	23.26	4.42	4.37	59.77	60.02	2.58	2.53
C1.5.2	61.70	61.69	0.29	0.30	-11.03	-11.05	0.48	0.49	21.04	21.62	5.49	4.90	57.89	59.12	7.88	2.57
C1.5.3	65.14	65.09	0.82	0.82	-19.08	-19.10	0.32	0.32	22.01	22.68	5.47	4.73	41.47	42.41	5.80	2.24
C1.5.4	56.03	56.01	0.23	0.24	-27.09	-27.12	0.46	0.46	21.65	21.99	4.56	4.58	49.32	49.57	2.37	2.31
C1.5.5	43.55	43.54	0.85	0.88	-17.57	-17.58	0.54	0.55	22.30	22.37	4.42	4.54	62.00	62.19	2.76	2.72
C1.6.1	69.26	69.24	0.33	0.33	-6.15	-6.17	0.25	0.25	21.83	22.47	4.98	4.63	58.39	58.48	2.57	2.66
C1.6.2	31.91	31.84	0.45	0.45	-38.58	-38.60	0.16	0.17	21.19	22.14	5.34	4.58	45.10	46.15	6.34	2.58
C1.6.3	58.54	58.49	0.48	0.47	-29.93	-29.96	0.26	0.26	20.87	21.30	4.62	4.57	59.84	60.03	3.01	3.04
C1.6.4	60.96	60.93	0.49	0.50	-13.30	-13.32	0.33	0.34	20.52	20.90	4.71	4.79	60.29	60.53	2.93	2.90
C1.6.5	38.12	38.42	0.73	0.49	-38.43	-38.20	0.59	0.45	14.77	20.05	9.26	3.29	46.91	63.67	28.08	2.10

Tabella 4.3 Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e puliti dei sensori sulle travi 5 e 6

4.1.2 Svincolamento dalle condizioni termo-igrometriche

Al termine della pulizia, i segnali vengono ulteriormente modificati rimuovendo l'effetto istantaneo e differito di temperatura e umidità (paragrafo 3.1). Nelle Tabelle 4.4, 4.5 e 4.6 si riportano i valori di media e scarto quadratico medio dei segnali di rotazione X e rotazione Y dopo gli algoritmi di svincolamento. Osservando i risultati, si vede che la correzione dei segnali porta ad una netta riduzione dello scarto quadratico medio e ad una scarsa alterazione della media. Questa tendenza, accoppiata con i grafici di output mostrati nel paragrafo 3.1, suggerisce la buona riuscita dell'algoritmo poiché il contributo maggiore alla variabilità del segnale sembrerebbe essere dovuto alle condizioni termo-igrometriche. In particolare, il decremento dovuto all'effetto termico (pari mediamente al 62% per la rotazione X e al 75% per la rotazione Y) è decisamente superiore di quello dovuto all'effetto igrometrico (pari mediamente al 17% per la rotazione X e al 6% per la rotazione Y). Analizzando gli algoritmi di svincolamento, è anche necessario sottolineare la differenza tra l'effetto delle derivate strumentali istantanee e differite. Infatti, come mostrato in Figura 3.4 e nelle Tabelle 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11, la correzione dalla deriva strumentale differita è da considerarsi di carattere puramente speculativo poiché il ritardo temporale a cui è associato l'effetto (termico o igrometrico) è eccessivamente variabile al punto da suggerire delle tendenze errate. In realtà, come già specificato, l'algoritmo risulta essere corretto e le oscillazioni del coefficiente di correlazione al variare di ritardo esistono effettivamente ma ad una scala inferiore alla soglia di rumore dello strumento; nonostante ciò, l'algoritmo effettua la correzione dei segnali. A titolo di esempio, in Figura 4.1, si riporta l'andamento dello scarto quadratico medio dei segnali di rotazione X relativi agli strumenti installati sulla prima trave in funzione dell'avanzare dell'algoritmo.

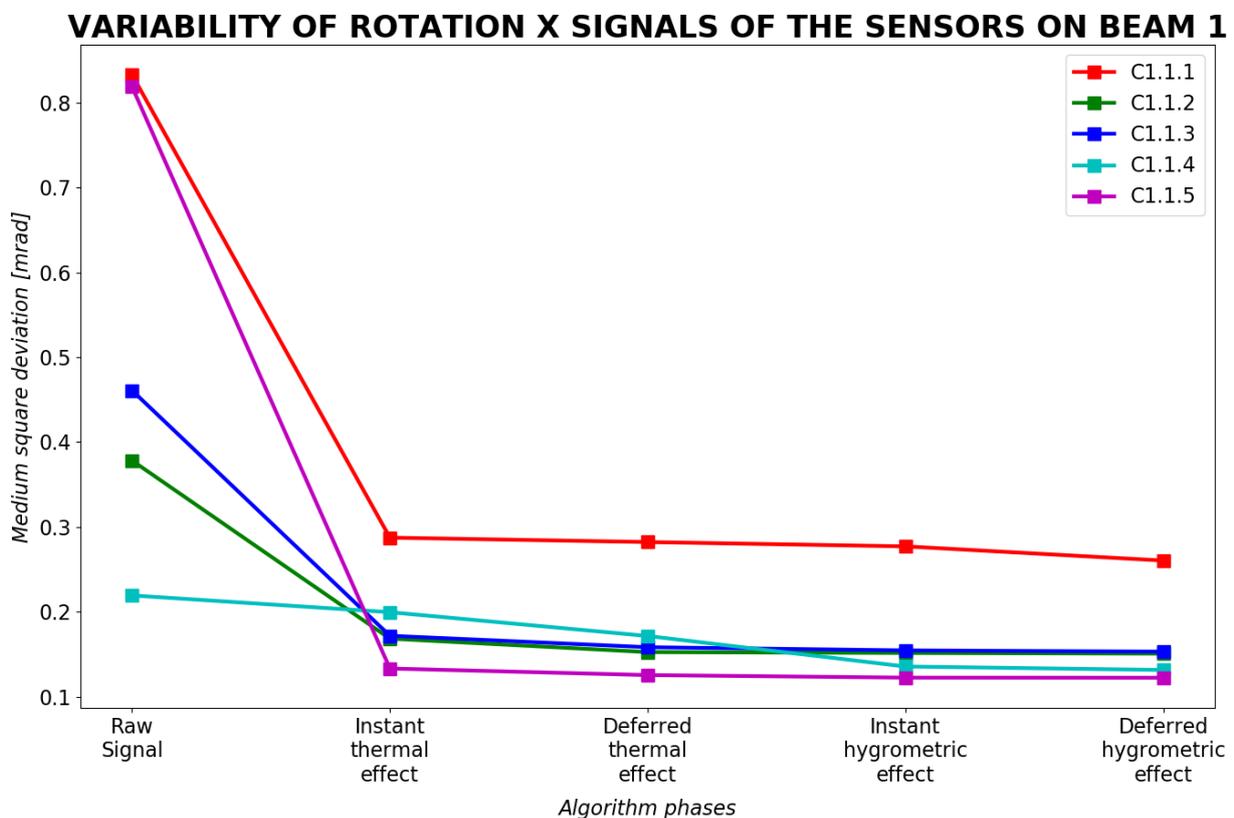


Figura 4.1 Andamento dello scarto quadratico medio dei sensori della trave 1

	rotazione X						rotazione Y					
	μ_{raw}	μ_{temp}	μ_{umid}	σ_{raw}	σ_{temp}	σ_{umid}	μ_{raw}	μ_{temp}	μ_{umid}	σ_{raw}	σ_{temp}	σ_{umid}
C1.1.1	21.32	21.34	21.34	0.832	0.288	0.277	-10.01	-9.99	-9.99	0.257	0.088	0.073
C1.1.2	-4.77	-4.79	-4.79	0.378	0.169	0.152	-29.43	-29.44	-29.44	0.309	0.058	0.058
C1.1.3	-5.93	-5.95	-5.95	0.461	0.172	0.155	-19.89	-19.91	-19.91	0.282	0.065	0.058
C1.1.4	3.39	3.36	3.37	0.219	0.200	0.136	-30.04	-30.06	-30.06	0.213	0.074	0.069
C1.1.5	14.16	14.14	14.14	0.818	0.133	0.123	-28.21	-28.19	-28.19	0.577	0.212	0.168
C1.2.1	59.76	59.74	59.74	0.352	0.066	0.063	-29.02	-29.02	-29.02	0.119	0.059	0.059
C1.2.2	48.50	48.44	48.44	0.766	0.256	0.214	-22.42	-22.47	-22.47	0.553	0.059	0.053
C1.2.3	57.64	57.58	57.58	0.639	0.218	0.149	9.21	-9.23	-9.23	0.226	0.060	0.058
C1.2.4	68.72	68.70	68.70	0.341	0.219	0.138	-17.93	-17.95	-17.95	0.209	0.050	0.049
C1.2.5	64.27	64.23	64.23	0.574	0.420	0.299	-43.07	-43.07	-43.07	0.208	0.066	0.066

Tabella 4.4 Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e svincolati dei sensori sulle travi 1 e 2

	rotazione X						rotazione Y					
	μ_{raw}	μ_{temp}	μ_{umid}	σ_{raw}	σ_{temp}	σ_{umid}	μ_{raw}	μ_{temp}	μ_{umid}	σ_{raw}	σ_{temp}	σ_{umid}
C1.3.1	70.53	70.51	70.51	0.334	0.111	0.101	-42.35	-42.36	-42.36	0.26	0.081	0.070
C1.3.2	66.29	66.24	66.24	0.614	0.212	0.168	-34.33	-34.36	-34.36	0.493	0.116	0.114
C1.3.3	64.46	64.41	64.41	0.568	0.238	0.144	-9.41	-9.44	-9.44	0.425	0.080	0.069
C1.3.4	56.32	56.30	56.30	0.407	0.070	0.068	-19.91	-19.93	-19.93	0.406	0.053	0.053
C1.3.5	72.63	72.63	72.63	0.602	0.154	0.138	-5.77	-5.76	-5.76	0.491	0.069	0.068
C1.4.1	77.20	77.20	77.20	0.453	0.141	0.123	-24.65	-24.64	-24.65	0.206	0.063	0.063
C1.4.2	52.83	52.79	52.79	0.563	0.222	0.160	-29.35	-29.38	-29.38	0.406	0.068	0.063
C1.4.3	61.66	61.65	61.61	2.190	1.624	1.294	-28.86	-28.88	-28.88	0.290	0.104	0.093
C1.4.4	69.40	69.38	69.38	0.221	0.074	0.056	0.11	0.09	0.09	0.321	0.051	0.050
C1.4.5	64.23	64.21	64.21	0.617	0.167	0.141	-24.93	-24.93	-24.93	0.487	0.109	0.087

Tabella 4.5 Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e svincolati dei sensori sulle travi 3 e 4

	rotazione X						rotazione Y					
	μ_{raw}	μ_{temp}	μ_{umid}	σ_{raw}	σ_{temp}	σ_{umid}	μ_{raw}	μ_{temp}	μ_{umid}	σ_{raw}	σ_{temp}	σ_{umid}
C1.5.1	57.53	57.48	57.47	0.794	0.237	0.170	-37.91	-37.95	-37.95	0.494	0.065	0.064
C1.5.2	61.70	61.69	61.69	0.294	0.073	0.066	-11.03	-11.05	-11.05	0.481	0.067	0.060
C1.5.3	65.14	65.09	65.09	0.816	0.259	0.257	-19.08	-19.10	-19.10	0.318	0.091	0.091
C1.5.4	56.03	56.01	56.01	0.232	0.117	0.114	-27.09	-27.12	-27.12	0.459	0.109	0.095
C1.5.5	43.55	43.53	43.53	0.850	0.225	0.207	-17.57	-17.59	-17.59	0.541	0.083	0.077
C1.6.1	69.26	69.24	69.24	0.327	0.137	0.120	-6.15	-6.17	-6.17	0.245	0.085	0.085
C1.6.2	31.91	31.85	31.84	0.451	0.269	0.167	-38.58	-38.60	-38.6	0.164	0.060	0.056
C1.6.3	58.54	58.49	58.49	0.476	0.140	0.139	-29.93	-29.96	-29.96	0.263	0.060	0.060
C1.6.4	60.96	60.93	60.92	0.485	0.090	0.079	-13.29	-13.32	-13.32	0.330	0.056	0.056
C1.6.5	38.12	38.41	38.41	0.731	0.179	0.146	-38.43	-38.20	-38.20	0.592	0.102	0.096

Tabella 4.6 Media e scarto quadratico medio dei segnali raw e svincolati dei sensori sulle travi 5 e 6

4.1.3 Cross-correlazione tra sensori

Come mostrato nelle Figure 3.23 e 3.24, le correlazioni tra i segnali dei diversi sensori decrescono con l'avanzamento del codice e in particolare con l'esecuzione degli algoritmi di svincolamento. Questo fenomeno è probabilmente dovuto al fatto che i segnali di rotazione X e di rotazione Y sono fortemente influenzati dalla temperatura (la quale dipende ovviamente dalla posizione del sensore) e in minor misura anche dall'umidità e dunque, ottimizzando il valore delle derivate termiche e igrometriche mediante la minimizzazione del coefficiente di correlazione, si ottiene l'effetto conseguente di rimuovere le correlazioni tra gli output degli inclinometri.

Pur ottenendo delle informazioni importanti dagli algoritmi di svincolamento, in fase di cross-correlazione, si ha la necessità di confrontare i segnali quando sono ancora molto correlati in modo da poter riconoscere nitidamente gli eventuali andamenti anomali. Per questa ragione, il codice prevede la cross-correlazione al termine di ognuna delle fasi dell'algoritmo in modo che, a seconda del caso specifico, l'utente possa scegliere quali risultati analizzare. Nel caso in studio, sono stati valutati i coefficienti di correlazione dei segnali in uscita dagli algoritmi di pulizia dagli errori strumentali, ai quali corrispondono dei valori molto elevati. In queste condizioni, sono evidenti i trend anomali relativi ai sensori C1.1.4, C1.2.4, C1.2.5, C1.4.3, C1.6.1, C1.6.2 mostrati nelle Tabelle da 3.12 a 3.22. Analizzando i segnali di rotazione X di questi sensori anomali su intervalli progressivamente crescenti si evidenziano tre tipi di comportamento.

Nel primo caso, i coefficienti di correlazione tendono a mantenersi circa costanti lungo tutto il periodo di monitoraggio subendo oscillazioni percentuali di segno opposto e di basso valore assoluto: tale comportamento è probabilmente indice del fatto che, a causa di problemi nell'installazione di questi sensori, essi manifestano sin dall'inizio delle differenze rispetto ai segnali dei sensori allineati; tuttavia, la tendenza pressochè induce a pensare che non siano avvenuti movimenti anomali.

Nel secondo caso, i coefficienti di correlazione partono con valori assoluti molto elevati, subiscono delle diminuzioni puntuali (in alcuni casi anche molto repentine) nello spazio di 2-3 settimane per poi ricrescere progressivamente tornando infine ai valori di partenza: tale comportamento suggerisce un temporaneo malfunzionamento di questi sensori; quando il problema viene infine risolto, il segnale contiene un buon numero di dati scorrelati ed è quindi la risalita delle correlazioni a valori normali richiede più tempo rispetto al decremento iniziale.

Nel terzo caso (e, nello specifico, nel caso del sensore C1.1.4) si ha un decremento costante per tutto il periodo di monitoraggio per poi subire un leggero rialzo nelle ultime 2 settimane. In questo caso le cause dell'anomalia potrebbero essere molteplici: installazione errata, malfunzionamento del firmware o effettivamente movimenti indesiderati rilevati dallo strumento.

Nel complesso, tutte le anomalie sembrerebbero essere causate da errori di acquisizione degli strumenti poiché la maggior parte degli strumenti ha una risposta molto correlata e, in ogni caso, nei segnali interessati da trend irregolari, le anomalie risultano essere scorrelate tra i vari strumenti.

Tuttavia, varrebbe la pena di ispezionare le zone della campata adiacenti alla posizione di questi sensori perchè essi sono allineati lungo una diagonale dell'impalcato (come mostrato in Figura 3.30).

4.2 Miglioramenti del codice di calcolo

Al momento, il codice di calcolo è in grado di gestire l'analisi di due tipologie di sensori. I sensori relativi al ponte in studio sono il caso più generale che è attualmente implementato poiché gli altri strumenti, chiamati 'di tipo B' all'interno del codice, restituiscono una rotazione e la temperatura.

La struttura del codice permette di generalizzare il codice per altre tipologie di output ma attualmente sarebbe necessario definire delle funzioni dedicate appositamente al numero di grandezze fisiche misurate. L'opzione migliore per rendere il codice completo da questo punto di vista generalizzandolo a tutti i sensori inclinometrici, sarebbe l'implementazione di un algoritmo di controllo che permetta di eseguire le operazioni descritte per il generico numero n di variabili definito a priori dall'utente del file di input. Infine, nell'ottica di praticare un monitoraggio attivo, si potrebbe pensare di implementare un codice che acquisisca e analizzi i dati in tempo reale. Infatti, anche in un sistema strutturato in questo modo, i criteri su cui si fondano gli algoritmi di pulizia dai picchi, dai plateau e dagli errori di traslazione possono ancora essere utilizzati per il riconoscimento di valori anomali che potrebbero venire verificati in tempo reale effettuando confronti e cross-correlazioni con i sensori allineati nelle direzioni trasversale e longitudinale come descritto nel paragrafo 3.3.

In conclusione, si può affermare che il codice implementato permette, con qualche iterazione, di ottenere dei buoni risultati in fase di post-processing dei dati e che, esso può essere eventualmente potenziato per effettuare interventi di monitoraggio attivo sulle strutture.

Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, desidero menzionare tutte le persone senza le quali non sarei qui. Innanzi tutto, ringrazio il Politecnico di Torino e tutti i docenti da cui ho avuto la possibilità di imparare qualcosa e, in particolar modo, il mio relatore, il Prof. Gabriele Bertagnoli, per avermi accompagnato con i suoi consigli e con la sua preparazione in quest'ultimo lavoro universitario stimolando sempre il mio interesse nei confronti dell'argomento studiato.

Un enorme ringraziamento va alla mia famiglia per aver sempre creduto in me e per avermi fornito un costante supporto morale ed economico in questi ultimi 5 lunghi anni di studio. Grazie alla mia fidanzata Irene e a tutti i miei amici per essermi vicino tutti i giorni.

Infine desidero ringraziare tutti i colleghi con cui ho avuto la fortuna di confrontarmi e lavorare durante la mia permanenza al Politecnico. In particolare, ringrazio Antonino, Daniele, Luigi, Mario e Mattia per aver condiviso con me la fatica e le soddisfazioni ottenute durante questi anni di studio.

