

POLITECNICO DI TORINO  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



Tesi di Laurea Magistrale

# Automatizzazione della prova di cicli termici per condotti sbarre

## **Relatori**

Chicco Gianfranco  
Roccatò Paolo Emilio

## **Candidato**

Emilio Tria

Luglio 2020



*”...si vince a 1000 punti.  
Il primo classificato vince un carro armato vero...  
...in tre casi si perdono tutti i punti.  
Li perdono: quelli che si mettono a piangere;  
quelli che vogliono vedere la mamma;  
quelli che hanno fame e vogliono la merendina,  
scordatevela!”*

*Da "La vita è bella" (film 1997)*



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INRIM: il Laboratorio Alte Tensioni e Forti Correnti</b>	<b>2</b>
2.1	Area per le prove di lunga durata . . . . .	3
<b>3</b>	<b>La prova di cicli termici: analisi e confronto tra diverse apparecchiature elettriche</b>	<b>8</b>
3.1	Generalità sulle prove di cicli termici . . . . .	8
3.2	Condotti sbarre . . . . .	11
3.2.1	Principali caratteristiche ed applicazioni . . . . .	11
3.2.2	Analisi della norma CEI EN 61439-6 . . . . .	13
3.2.3	Cicli termici: configurazione del sistema di test . . . . .	13
3.2.4	Cicli termici: procedura di prova . . . . .	15
3.3	Connettori a compressione e meccanici per cavi di energia: analisi della norma CEI EN 61328-1 . . . . .	18
3.3.1	Introduzione e definizioni generali . . . . .	18
3.3.2	Cicli termici: configurazione del sistema di test . . . . .	20
3.3.3	Cicli termici: procedura di prova . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Programmazione in LabVIEW™</b>	<b>26</b>
4.1	Introduzione al linguaggio LabVIEW™ . . . . .	26
4.2	Acquisizione di dati in LabVIEW . . . . .	27
4.3	Descrizione del framework utilizzato in LabVIEW™ . . . . .	29
4.3.1	Architettura ad attori e metodo di scambio delle informazioni . . . . .	29
4.3.2	Struttura principale del generico attore . . . . .	30
4.3.3	Esecuzione dell'applicazione e analisi delle principali funzioni degli attori comuni . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Progettazione e sviluppo del software</b>	<b>35</b>
5.1	Definizione delle specifiche di progetto . . . . .	35

5.2	Caratterizzazione dello script per la configurazione della prova . . . . .	37
5.3	Descrizione delle operazioni di programmazione e sviluppo dell'applicazione . . . . .	42
5.3.1	Estrapolazione dallo script dei parametri per la configurazione degli $n$ ingressi analogici ed implementazione dei task di acquisizione dati . . . . .	43
5.3.2	Estrapolazione ed analisi dei parametri dello script per la caratterizzazione delle sovratemperature dei singoli punti di misura sull'oggetto in prova . . . . .	47
5.3.3	Implementazione del comando per la prova su condotti sbarre e programmazione della <i>Macchina a Stati</i> per la gestione automatica delle operazioni . . . . .	51
5.3.4	Implementazione della logica MARCIA/ARRESTO dell'autotrasformatore e controllo delle correnti mediante la regolazione della tensione . . . . .	58
5.3.5	Visualizzazione sulla UI dei principali dati in tempo reale ed analisi del file di log dati . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Conclusioni finali e sviluppi futuri</b>	<b>64</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>66</b>

# Elenco delle figure

2.1	Spinterometro a sfere isolate in aria, presente nell'area Alte Tensioni del laboratorio, per la misura diretta del valore di picco di tensione . . . . .	2
2.2	Alternatore trifase <i>S.A. Brown Boveri</i> con motore asincrono trifase di lancio, nel piano seminterrato del laboratorio LATFC. . . . .	3
2.3	Pianta dell'area ES01 del LATFC, al piano seminterrato del LATFC, con le barriere protezioni installate. . . . .	4
2.4	Tabella A.2 tratta dalla norma CEI EN 50191:2001-09 relativa alle dimensioni della zona di guardia (s) in funzione della tensione di prova verso terra (U) (s è la distanza in aria dalle parti attive). . . . .	5
2.5	Tabella A.3 tratta dalla norma CEI EN 50191:2001-09 relativa alla distanza orizzontale in relazione all'altezza della barriera e alla distanza dal punto di pericolo dal pavimento (valori estrapolati dalla EN 294). . . . .	6
3.1	Circuito per prove di sovratemperatura su quadri elettrici o condotti sbarre . . . . .	9
3.2	Sistema di tre trasformatori elevatori di corrente: nella figura a destra è in configurazione <i>serie-parallelo-serie</i> con un uscita in tensione di 6 V e 5 kA in corrente . . . . .	10
3.3	Un tratto di condotto sbarra rettilineo a cui sono montati elementi complementari per il cambio di direzione orizzontale, ICEL Sistemi Elettrici . . . . .	12
3.4	Sistema di condotti sbarre per la distribuzione orizzontale tratto dal catalogo 2020, <i>Canalis KTA 800-5000 A, Schneider Electric</i> . . . . .	12
3.5	Rappresentazione del circuito di prova, vista dell'alto, allestito nell'area di Forti Correnti del LATFC con BTU disposta orizzontalmente su cavalletti di sostegno. . . . .	14
3.6	Rappresentazione dell'evoluzione della sovratemperatura nell'i-esimo punto di misura per un generico ciclo. . . . .	16
3.7	Flow chart della prova di cicli termici per condotti sbarre secondo la norma CEI EN 61439-6 . . . . .	17

3.8	A sinistra la schematizzazione di un connettore di derivazione, tratta dalla norma CEI EN 61328-1; a destra un capocorda di Rame con connessione per compressione . . . . .	19
3.9	Utensile crimpatore pneumatico utilizzato nel LATFC per cavi fino a $240\text{ mm}^2$ . . . . .	20
3.10	Due morsetti IPC per cavi di diverse sezioni tratti dal <i>catalogo Enel, Settore Energia – edizione Luglio 2014</i> . . . . .	20
3.11	Circuiti di prova tipici per <i>giunti testa-testa</i> e <i>capicorda</i> , tratti dalla norma <i>CEI EN 61328-1 – figura 1</i> . . . . .	21
3.12	Circuito di prova tipico per <i>connettori di derivazione</i> , tratto dalla norma <i>CEI EN 61328-1 – figura 2</i> . . . . .	21
3.13	Grafico temperatura-tempo dell’oggetto in test caratterizzato nel secondo ciclo termico, tratto dalla norma <i>CEI EN 61328-1 – figura 4</i> . . . . .	23
3.14	Indicazioni sui punti di misura della differenza di potenziale per il calcolo della resistenza per un giunto testa-testa, tratto dalla norma <i>CEI EN 61328-1 – figura 3a</i> . . . . .	25
4.1	Esempio di un semplice VI di LabVIEW . . . . .	26
4.2	Catena di dispositivi per l’acquisizione di una grandezza fisica tramite un PC [6]. . . . .	27
4.3	In figura è mostrato lo screenshot della pagina principale di NI MAX. . . . .	28
4.4	Schematizzazione della logica di comunicazione tra gli attori . . . . .	30
4.5	Screenshot della porzione di codice in cui l’attore destinatario effettua la sottoscrizione in <i>Router</i> per abilitarsi alla ricezione di quegli specifici messaggi. . . . .	30
4.6	Struttura del block diagram del generico attore utilizzato nel framework. . . . .	31
4.7	Uno screenshot della home page dell’interfaccia utente . . . . .	32
5.1	A sinistra la pulsantiera esterna del quadro di comando dell’autotrasformatore, a destra una foto del circuito interno. . . . .	36
5.2	In alto il tab <i>LowFrequency</i> , in basso il tab <i>HighFrequency</i> dello script per la configurazione degli ingressi analogici della prova. . . . .	39
5.3	A sinistra il tab di definizione della scala lineare per un ingresso in tensione, a destra il tab che specifica il tipo di termocoppia. . . . .	39
5.4	Una parte del tab <i>Script</i> del file excel dedicata alla definizione di alcuni dei parametri caratteristici della prova. . . . .	40
5.5	La parte del tab <i>Script</i> contenente il comando “ <i>busBarThermalCycles</i> ” per la caratterizzazione dei parametri dell’esecuzione ciclica. . . . .	42
5.6	Cluster delle variabili interne dell’attore <i>excelReader</i> in seguito all’acquisizione dei parametri dal file Excel. . . . .	43

5.7	Albero gerarchico degli oggetti dell'attore <i>vChannel</i> . . . . .	44
5.8	A sinistra sono evidenziati i metodi della classe della classe <i>DAQ.AI.multiType</i> , "figlia" della classe generica <i>DAQ</i> , a destra lo screenshot del file <i>.ctrl</i> contenente i dati privati della classe. . . . .	45
5.9	Inizializzazione dei dati dell'oggetto <i>DAQ.AI.multiType</i> con i corri- spondenti parametri estratti dallo script. . . . .	46
5.10	Il Vi " <i>createTask</i> " della classe <i>DAQ.AI.multiType</i> in cui sono visua- lizzate in sovrapposizione anche le altre pagine dei <i>Case Structure</i> . . .	46
5.11	In alto il VI " <i>SearchProperty</i> " della classe <i>cfg</i> per l'analisi del coman- do " <i>def.prop</i> ", in basso il suo subVI " <i>searchTempCtrlDef</i> " che esegue l'estrazione dei nomi e degli attributi relativi agli <i>n</i> punti di misura. .	48
5.12	Il VI " <i>extractFormulas&amp;TempAttributes</i> " individua ed estrapola le singole proprietà di ciascun punto a partire da una variabile di tipo <i>string</i> . . . . .	49
5.13	Il VI " <i>calculateTempControls</i> " che effettua il calcolo delle sovratem- perature di controllo. . . . .	49
5.14	Il subVI " <i>extractAllTCchsAttributes</i> " per la selezione delle variabili relative ai soli canali di termocoppie. . . . .	50
5.15	Grafo di Moore per l'esecuzione automatica della prova di cicli termici.	52
5.16	Il VI <i>exec</i> dell'oggetto <i>BusbarThermalCycles</i> per l'implementazione della macchina a stati. . . . .	53
5.17	La parte del codice di <i>exec.vi</i> corrispondente al caso " <i>Calculations</i> ". .	54
5.18	Il ciclo while parallelo per il calcolo continuativo delle sovraturetemperature.	54
5.19	La parte del codice di <i>exec.vi</i> corrispondente al caso " <i>Heating</i> ". . . .	55
5.20	La parte del codice di <i>exec.vi</i> corrispondente al caso " <i>Cooling</i> ". . . .	56
5.21	Una parte del codice LabVIEW™ dell'attore <i>CurrControl</i> . . . . .	58
5.22	Rappresentazione degli andamenti temporali dei segnali di comando durante la transizione tra le fasi di <i>Heating</i> e <i>Cooling</i> . . . . .	59
5.23	Una parte della UI, gestita dall'attore <i>toolbar</i> per la visualizzazione in primo piano dei principali parametri della prova. . . . .	60
5.24	La sezione <i>Tcontrol</i> della UI per la visualizzazione delle temperature.	61
5.25	La sezione <i>CurrControl</i> della UI per la visualizzazione degli aspetti relativi al controllo della corrente. . . . .	62
5.26	Una parte del file di log generato durante l'esecuzione della prova. . .	63

# Elenco delle tabelle

3.1	Dati di targa delle apparecchiature in uso per l'alimentazione del circuito di prova per cicli termici su condotti sbarre . . . . .	10
3.2	Tabella riassuntiva sulla disposizione dei componenti elettrici per la prova di cicli termici secondo la norma <i>CEI EN 61439-6</i> . . . . .	15
3.3	Tabella dei cicli di condizionamento dell'oggetto in test tratta dalla norma <i>CEI EN 61439-6 - Tabella 105</i> . . . . .	16
3.4	Tabella della durata minima di riscaldamento a corrente elevata per le varie sezioni dei conduttori, tratta dalla norma CEI EN 61328-1 . . . . .	24
3.5	Tabella degli intervalli in cui è richiesta la misurazione di resistenza e temperatura, estratta dalla norma CEI EN61328-1 . . . . .	25
5.1	Configurazione dei moduli di I/O montati sullo chassis cDAQ 9174. . . . .	36
5.2	Elenco ingressi digitali, modulo DIO NI 9375 . . . . .	37
5.3	Elenco uscite digitali di comando dell'autotrasformatore e per le spie di segnalazione, modulo DIO NI 9375 . . . . .	37



# Capitolo 1

## Introduzione

Il seguente lavoro di tesi, principalmente svolto presso il laboratorio Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC) dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) di Torino, ha come obiettivo la progettazione di un'applicazione per la gestione automatica delle prove di cicli termici su componenti elettrici, nello specifico condotti sbarre, tramite un sistema di acquisizione dati che si interfaccia con un codice LabVIEW™ sul PC.

La necessità di automatizzare questo tipo di verifiche in laboratorio è legata soprattutto alla lunga durata dell'intera prova che, in base a quanto previsto dalla normativa e a seconda dei componenti, arriverebbe a protrarsi anche per diverse settimane o addirittura mesi, essendo costituita da un numero elevato di ripetizioni per ogni fase del test. Un sistema automatico permette quindi l'esecuzione di una prova di cicli termici in maniera continuativa, anche durante l'orario notturno. In questo modo, l'operatore dopo aver preconfigurato il circuito di prova con i relativi strumenti di misura ed impostato, tramite uno script, il software con i parametri previsti per lo specifico oggetto in test, potrebbe svolgere in parallelo altri compiti in aree diverse del laboratorio mentre l'esecuzione dei cicli termici prosegue in maniera autonoma. La progettazione del software di controllo è basata su un framework di LabVIEW™ collaudata in altri sistemi di gestione di processi industriali che, data la sua architettura modulare, è stata modificata inserendo nuove parti di codice per soddisfare le specifiche richieste da questa applicazione.

Nei seguenti capitoli si analizzano e confrontano dal punto di vista normativo le prove di cicli termici relative a due tipi di apparecchiature elettriche, *condotti sbarre* e *connettori meccanici per cavi di energia*, mentre lo sviluppo dell'intero software sarà stato incentrato solo sulla procedura di prova dei condotti sbarre tenendo conto anche della necessità di scalarlo in futuro verso nuovi requisiti normativi.

In seguito, verrà anche descritta in maniera più approfondita la piattaforma software sulla quale si è basato questo studio oltre ad esplicitare e motivare le scelte intraprese nelle varie fasi della progettazione di questa applicazione.

## Capitolo 2

# INRIM: il Laboratorio Alte Tensioni e Forti Correnti

L'INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica), nato nel 2006 dalla fusione tra l'Istituto Elettrotecnico Nazionale (IEN) Galileo Ferraris e L'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti, è un ente pubblico nazionale di ricerca scientifica operante nell'ambito della metrologia con sede principale a Torino in Strada delle Cacce.



Figura 2.1: Spinterometro a sfere isolate in aria, presente nell'area Alte Tensioni del laboratorio, per la misura diretta del valore di picco di tensione

Il Laboratorio Alte Tensioni Forti Correnti (LATFC), situato invece nella sede storica dell'ex IEN in Corso Massimo d'Azeglio a Torino, svolge sia attività di ricerca in campo elettrotecnico che servizi di taratura e di verifica delle apparecchiature

elettriche come quadri, interruttori, fusibili, contattori, condotti sbarre, etc ed è principalmente suddiviso in due aree:

1. *Alte Tensioni*, in cui appunto si generano e misurano alte tensioni alternate o impulsive;
2. *Forti Correnti*, dove si eseguono le prove sovratemperatura e di cortocircuito su diversi tipi di componenti e/o sistemi elettrici in modo da verificare la loro idoneità sottoponendoli a stress termici e meccanici in diversi regimi di funzionamento.



Figura 2.2: Alternatore trifase *S.A. Brown Boveri* con motore asincrono trifase di lancio, nel piano seminterrato del laboratorio LATFC.

Nel LATFC è presente anche un impianto per la verifica del grado di protezione IP contro i liquidi.

## 2.1 Area per le prove di lunga durata

L'area del LATFC individuata per esecuzione delle prove di cicli termici si trova al piano seminterrato dell'edificio e, come si vede dalla planimetria in figura 2.3, è delimitata nel suo perimetro esterno da barriere di protezione, secondo quanto previsto dalla norma CEI EN 50191 "Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova".

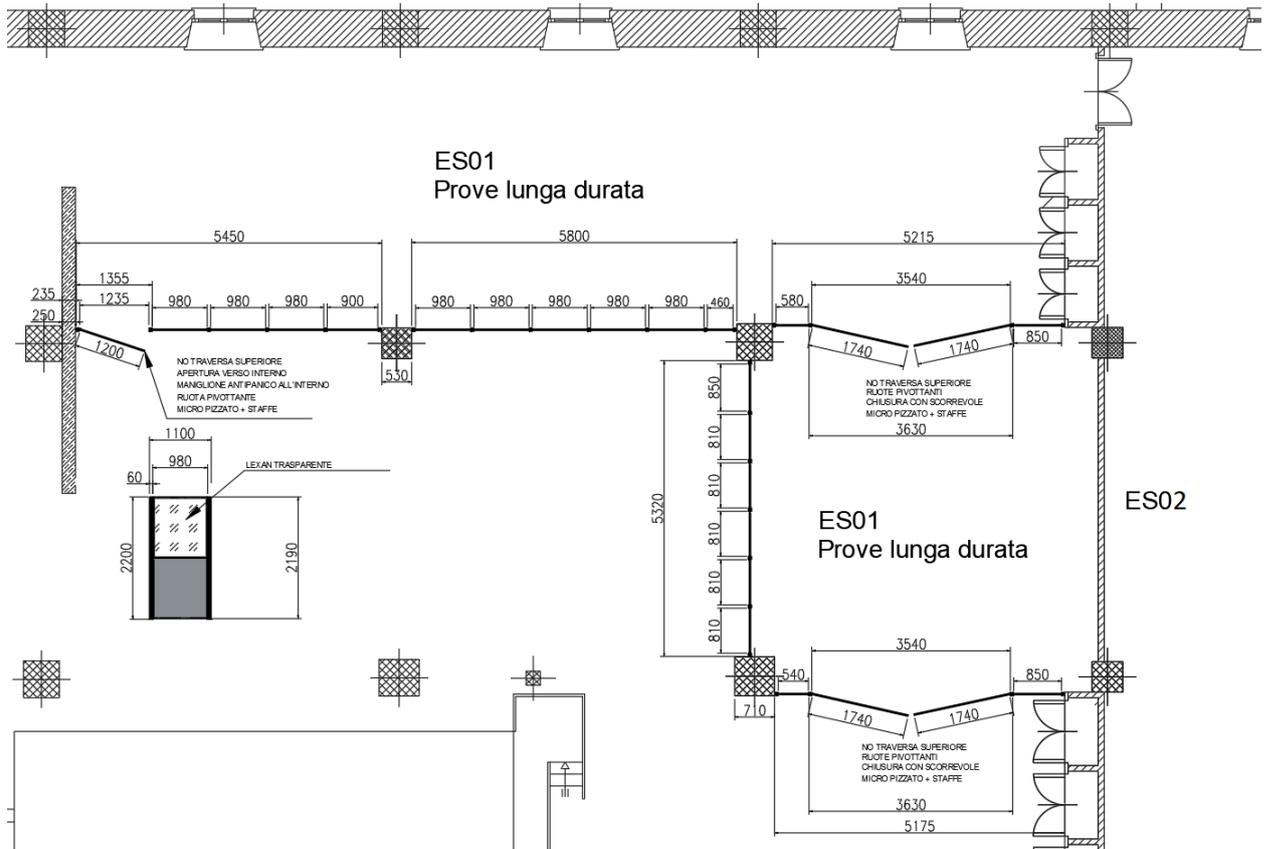


Figura 2.3: Pianta dell'area ES01 del LATFC, al piano seminterrato del LATFC, con le barriere protezioni installate.

La norma CEI EN 50191 specifica che l'operatore di laboratorio non può raggiungere i dispositivi degli impianti in esercizio nè con parti del suo corpo nè con attrezzi ed definisce a tal proposito un'area, chiamata "zona di guardia", la quale corrisponde al volume di aria attorno alle parti attive che non deve essere penetrato a meno che non sia presente una protezione completa contro i contatti diretti verso le stesse parti.

I confini della zona di guardia sono determinati in base al livello di alimentazione della prova conformemente a quanto indicato nella tabella A.2 della norma, riportata in figura 2.4, in cui si specifica anche che "per livelli di tensione fino a 1000 V, la superficie della parte attiva è considerata come confine della zona di guardia, mentre per tensioni superiori a 1 kV, raggiungere la zona di guardia è equivalente a toccare le parti attive".

**NORMA TECNICA**  
**CEI EN 50191:2001-09**

Tensione alternata di prova 50/60 Hz (valore efficace)		Tensione a impulso atmosferico 1,2/50 $\mu$ s (valore di picco)		Tensione a impulso di manovra 250/2500 $\mu$ s (valore di picco)	
<i>U</i> kV	<i>s</i> mm	<i>U</i> kV	<i>s</i> mm	<i>U</i> kV	<i>s</i> mm
$\leq 1$	nessun contatto <i>no contact</i>	20	100	500	2000
3	20	40	175	600	2600
5	30	60	250	700	3300
6	35	80	325	800	4100
10	60	100	400	900	4900
15	85	150	550	1000	5800
20	115	200	700	1100	8800
25	140	250	850	1200	7800
30	170	300	1000	1300	8900
35	195	350	1100	1400	10000
40	225	400	1200	1500	11200
45	250	450	1300	1600	12500
50	280	500	1400		
55	305	600	1650		
60	335	700	1950		
70	390	800	2200		
80	450	900	2450		
90	510	1000	2700		
100	560	1100	2950		
110	620	1200	3250		
130	740	1300	3500		
150	860	1400	3750		
170	980	1500	4000		
190	1100				
210	1240				
220	1300				
260	1550				
300	1850				
340	2150				
380	2450				
420	2750				
460	3100				
500	3500				
600	4500				
700	5600				
800	6900				
900	8300				
1000	9900				

Valori intermedi possono essere ottenuti mediante interpolazione, tuttavia, non è ammessa l'estrapolazione lineare oltre i valori massimi specificati.  
Per le tensioni di prova in c.c. fino a 1000 kV, la distanza *s* deve essere conforme al valore della tensione a impulso atmosferico.

Figura 2.4: Tabella A.2 tratta dalla norma CEI EN 50191:2001-09 relativa alle dimensioni della zona di guardia (*s*) in funzione della tensione di prova verso terra (*U*) (*s* è la distanza in aria dalle parti attive).

Inoltre, la normativa prevede anche una distanza minima tra le barriere di protezione dell'area di prova ed il confine della zona di guardia, determinata secondo la tabella A.3 della CEI EN 50191, riportata in figura 2.5.

Distanza del punto di pericolo dal pavimento <i>Distance of the danger point from the floor</i> <b>a</b> mm	Altezza del bordo dei mezzi di protezione (barriera) <b>b</b> <i>Height of the edge of the means of protection (barrier) b</i> mm							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
	Distanza orizzontale <b>c</b> tra i mezzi di protezione (barriera) e il punto di pericolo <i>Horizontal distance c between means of protection (barrier) and the danger point</i> mm							
2400	100	100	100	100	100	100	100	100
2200	600	600	500	500	400	350	250	
2000	1100	900	700	600	500	350		
1800	1100	1000	900	900	600			
1600	1300	1000	900	900	500			
1400	1300	1000	900	800	100			
1200	1400	1000	900	500				
1000	1400	1000	900	300				
800	1300	900	600					
600	1200	500						
400	1200	300						
200	1100	200						

I valori inferiori a 1000 mm dal bordo **b** non sono specificati in quanto ciò non permetterebbe un maggior allungo della mano e in più vi sarebbe il rischio di cadere nell'area di prova.

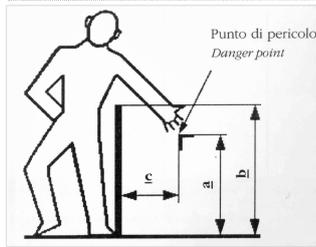


Fig. A.1 Spiegazione delle dimensioni indicate in Tab. A.3 (Valori estrapolati dalla EN 294)

**LEGENDA**

- a** Distanza tra il punto di pericolo e il pavimento (il punto di pericolo è il punto del confine della zona di guardia che ha la distanza più breve dal bordo dei mezzi di protezione)
- b** Altezza del bordo dei mezzi di protezione
- c** Distanza orizzontale tra il bordo dei mezzi di protezione e il punto di pericolo

Figura 2.5: Tabella A.3 tratta dalla norma CEI EN 50191:2001-09 relativa alla distanza orizzontale in relazione all'altezza della barriera e alla distanza dal punto di pericolo dal pavimento (valori estrapolati dalla EN 294).

In funzione di ciò, l'area del LATFC dedicata alle prove di cicli termici è delimitata da una recinzione costituita da elementi con telaio in acciaio sul quale sono montati pannelli alti 2.20 m a partire dal pavimento e realizzati nella parte inferiore con fogli di materiale composito mentre nella parte superiore in lexan trasparente, per consentire all'operatore una vista all'interno della zona di guardia durante l'esecuzione della prova.

All'area si può accedere da una porta ampia 1.20 m e dotata internamente di maniglione antipanico oppure, per consentire l'ingresso di carichi di grosse dimensioni, vi sono due portoni a doppio battente con luce utile di 3,50 m e senza traversa superiore per favorire il passaggio di carrelli elevatori.

Dalla planimetria in figura 2.3 si può inoltre notare che l'area ES01 è in realtà costituita da due ambienti distinti che possono essere resi comunicanti mediante l'apertura del portone intermedio consentendo, in configurazione di unico ambiente, prove su oggetti lunghi fino a 40 m.

Tutti i varchi della recinzione sono dotati di rilevatore in modo tale da interrompere l'alimentazione del circuito qualora uno di questi venisse aperto durante l'esecuzione della prova.

L'intero impianto di prova, secondo quanto previsto dalla normativa, è inoltre dotato di:

- dispositivi a comando manuale per l'interruzione di emergenza dell'alimentazione a tutto il circuito di prova, in un numero adeguato alle dimensioni dell'area di prova;
- dispositivi per la prevenzione dell'accensione non autorizzata e involontaria, ovvero chiavi di consenso senza le quali il quadro di comando sarebbe disabilitato;
- dispositivi di protezione contro le tensioni residue ed il trasferimento di tensioni.

## Capitolo 3

# La prova di cicli termici: analisi e confronto tra diverse apparecchiature elettriche

### 3.1 Generalità sulle prove di cicli termici

In generale, in una prova di cicli termici il campione in test è alimentato tramite uno specifico circuito per tempi e con livelli di corrente indicati nella norma tecnica del componente, in modo ciclico, in modo da verificare la sua idoneità nel sopportare l'elevato stress termico dovuto al susseguirsi dei numerosi riscaldamenti e raffreddamenti.

Nel caso di prove relative a componenti adibiti al trasporto e alla distribuzione di energia elettrica (condotti sbarre, cavi, connettori, etc..) il circuito di test può essere realizzato chiudendo in cortocircuito i morsetti di uscita del dispositivo, alimentandolo con una tensione inferiore a quella nominale e sufficiente per far fluire al suo interno la corrente nominale o comunque quella specificata dalla normativa. In questo caso la potenza erogata dalla sorgente di alimentazione, che per questo tipo di prove è la rete elettrica di distribuzione MT del LATFC, è la sola potenza Joule dissipata all'interno del componente oltre che le perdite della stessa sorgente. La sezione dei cavi del circuito di prova deve essere opportunamente scelta in modo da non influenzare termicamente l'oggetto in prova sottraendogli o cedendogli calore e, a tal proposito, nel caso dei quadri elettrici, la norma CEI EN 61439-1 contiene una tabella nel quale sono indicati i valori di sezione dei cavi da utilizzare in funzione della corrente nominale prevista per la prova.

Con riferimento al circuito riportato in figura 3.1 relativo alle prove di sovratemperatura su quadri elettrici, si elencano le apparecchiature elettriche utilizzate nel laboratorio dell'INRIM con le rispettive caratteristiche principali.

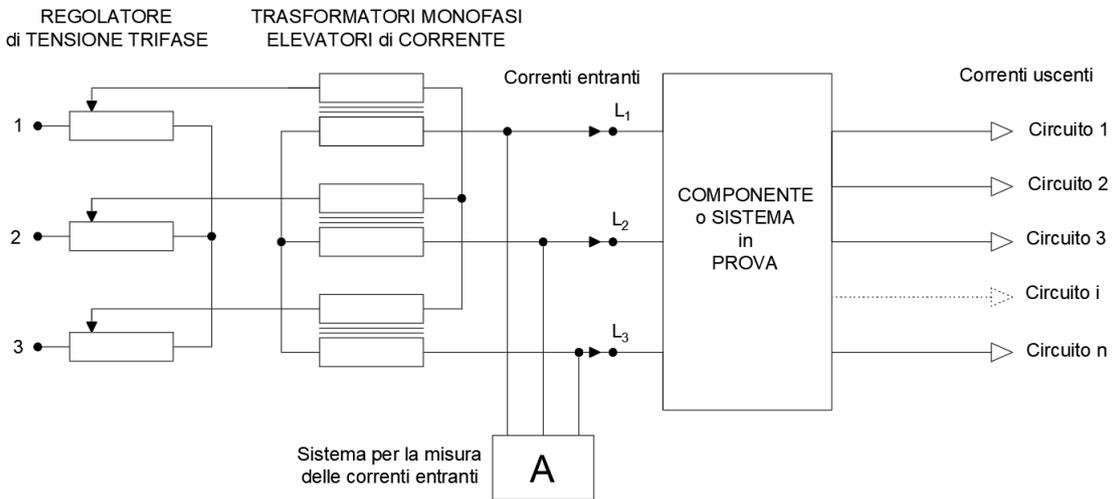


Figura 3.1: Circuito per prove di sovratemperatura su quadri elettrici o condotti sbarre

A monte del circuito, connesso alla sorgente di alimentazione, vi è un autotrasformatore a rapporto variabile che, attraverso la regolazione motorizzata del numero di spire dell'avvolgimento secondario e quindi della tensione, permette di controllare il valore di corrente impostato per lo specifico oggetto in test durante le fasi di alimentazione della prova, compensando quindi le variazioni di resistenza dovute al riscaldamento/raffreddamento del sistema.

A valle del regolatore di tensione è presente un sistema di tre trasformatori (Figura 3.2) elevatori di corrente tramite il quale, a seconda della configurazione (serie/parallelo) degli avvolgimenti, si adattano i valore di tensione e soprattutto di corrente da far fluire all'interno del componente in test.

I principali dati di targa di queste macchine elettriche sono riportati in tabella 3.1.

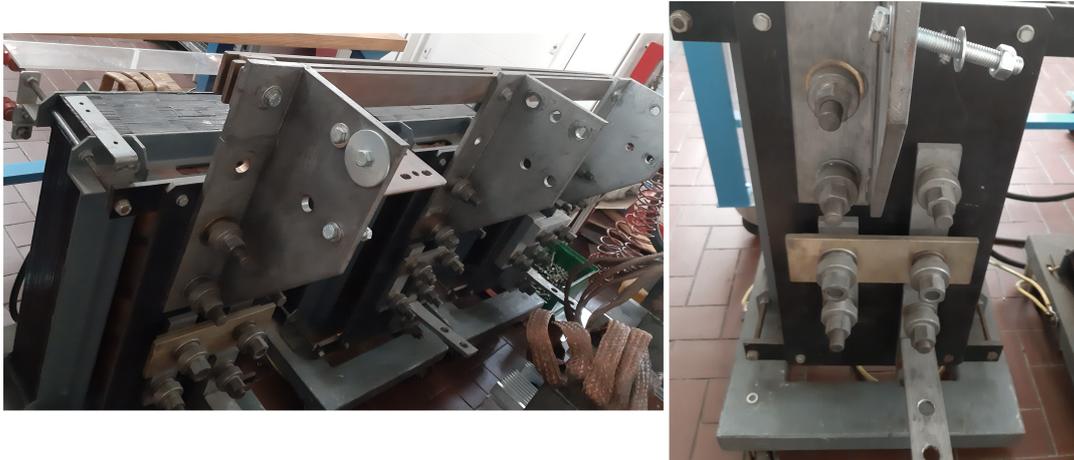


Figura 3.2: Sistema di tre trasformatori elevatori di corrente: nella figura a destra è in configurazione *serie-parallelo-serie* con un uscita in tensione di 6 V e 5 kA in corrente

<b>Regolatore di tensione</b>	
Regolatore di tensione 3F motorizzato	$S_N = 150 \text{ kVA}$ $V_{in,N} = 400 \text{ V}$ $V_{out,N} = 0 \div 400 \text{ V}$
<b>Trasformatore elevatori di corrente</b>	
Complesso di tre trasformatori 1F	$S_N = 3 \times 30 \text{ kVA}$ $V_{1,N} = 400 \text{ V } f_N = 50 \text{ Hz}$ $V_{2,N} = 3 \text{ V}, I_{2,N} = 10 \text{ kA}$ (con avv. in parallelo) $V_{2,N} = 12 \text{ V}, I_{2,N} = 2,5 \text{ kA}$ (con avv. in serie)

Tabella 3.1: Dati di targa delle apparecchiature in uso per l'alimentazione del circuito di prova per cicli termici su condotti sbarre

Per quanto riguarda la misura delle correnti in ingresso al componente, dati gli elevati valori in gioco, questa non avviene in maniera diretta ma tramite l'inserzione di *trasformatori amperometrici (TA)* si abbassa il valore di corrente in modo da renderlo compatibile con le portate degli strumenti di misura o comunque delle schede di acquisizione.

Per la lettura della corrente in fase di regolazione e per le linee uscenti si utilizzano invece *Bobine di Rogowski* o *pinze amperometriche*.

Le temperature sono acquisite tramite termocoppie con relativo voltmetro per leggere la differenza di potenziale generata ai loro capi oppure connesse direttamente alla morsettiera di un modulo di acquisizione dedicato, come accade in questa applicazione. Le termocoppie inoltre possono essere di diverso tipo a seconda del range di valori raggiunti nei vari punti in analisi.

La grandezza di interesse per questo tipo di verifiche termiche non è la temperatura assoluta in un punto, bensì la sua sovratemperatura rispetto alla temperatura ambiente che a sua volta può essere la media tra le misurazioni in più punti della temperatura dell'aria ambiente: in questo modo le valutazioni di tipo termico sono indipendenti dal valore di temperatura ambiente registrata al momento della prova.

L'evoluzione temporale di tutte le variabili acquisite durante l'esecuzione del test (correnti, tensioni e temperature) sono monitorate e registrate per poi essere valutate nelle modalità previste dalla norma relativa al componente o sistema elettrico in esame.

Nelle seguenti sottosezioni sono analizzate le norme tecniche di due diversi componenti elettrici:

1. CEI EN 61439-6 (2013-07): Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT), Parte 6 – Condotti sbarre;
2. CEI EN 61238-1 (2004-05): Connettori a compressione e meccanici per cavi di energia per tensioni nominali fino a 36kV.

E' bene sottolineare che l'analisi delle norme tecniche di prodotto riportata in questa tesi è limitata sostanzialmente alla valutazione degli aspetti legati alla procedura di prova dei cicli termici sulla quale si è poi basato il lavoro di sviluppo del software di gestione automatica della stessa.

## 3.2 Condotti sbarre

### 3.2.1 Principali caratteristiche ed applicazioni

I condotti sbarre [2] sono adibiti alla distribuzione dell'energia elettrica per tutti i tipi di carichi, principalmente in applicazioni industriali e commerciali con potenze medio-elevate.

Sono composti principalmente da un sistema di conduttori rigidi in rame od in alluminio racchiusi in un involucro (o condotto) di alluminio verniciato o ferro zincato (Figura 3.3), isolati tra loro e dall'involucro che, a seconda dell'applicazione nel quale è installato, può fungere anche da conduttore di protezione (PE).



Figura 3.3: Un tratto di condotto sbarra rettilineo a cui sono montati elementi complementari per il cambio di direzione orizzontale, ICEL Sistemi Elettrici

Un *sistema di condotti sbarre* comprende l'insieme delle unità modulari prefabbricate connesse tra loro sulle quali possono all'occorrenza essere montati dispositivi accessori che assolvono a differenti funzioni (Figura 3.4), come ad esempio testate di alimentazione, dispositivi di fissaggio (staffe murali o a sospensione), dispositivi di derivazione (spine precablate o a morsetti, cassette per interruttori modulari, scatolati o per fusibili) ed elementi complementari per il cambio di direzione (elementi flessibili, angoli orizzontali, verticali, elementi a T, Z).



Figura 3.4: Sistema di condotti sbarre per la distribuzione orizzontale tratto dal catalogo 2020, *Canalis KTA 800-5000 A*, Schneider Electric

I sistemi di condotti sbarre offrono diversi vantaggi rispetto ad un equivalente impianto elettrico realizzato con posa in cavo, tra i quali una maggiore versatilità

e compattezza e, in applicazioni ad elevato rischio di incendio, offrono anche una maggiore resistenza al calore e soprattutto un bassissimo carico di incendio rispetto a cavi di pari portata.

### 3.2.2 Analisi della norma CEI EN 61439-6

Dal punto di vista normativo [4], il condotto sbarre è trattato per molti aspetti come un quadro elettrico essendo incluso nella famiglia delle “Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione”. Nello specifico, la norma CEI EN 61439-6 contiene le prescrizioni meccaniche ed elettriche a cui i condotti sbarre per livelli di tensione fino a  $1000Vc.a.$  o  $1500Vc.c.$ , devono essere conformi, fornendone anche i metodi di verifica.

Nella norma CEI EN 61439-1 sono invece presenti le direttive tecniche comuni a tutti i prodotti della famiglia delle apparecchiature assiemate: qualora la specifica norma di prodotto (in questo caso la parte 6) non contenga articoli specifici allora si è rimandati ad applicare integralmente le prescrizioni della parte 1.

### 3.2.3 Cicli termici: configurazione del sistema di test

Per la prova di cicli termici indicata dalla norma CEI EN 61439-6, il campione in test è costituito da un'unità di condotto sbarre (BTU), disposto orizzontalmente o verticalmente, sul quale vi è connessa una unità (o cassetta) di derivazione, come mostrato in figura 3.5.

L'obiettivo di questa prova è infatti quello di verificare il comportamento degli elementi di connessione interni tra i due componenti elettrici connessi, in seguito ad un elevato stress termico.

Affinché la verifica termica su un solo oggetto campione possa essere estesa anche ad una gamma di unità di derivazione con correnti nominali o dispositivi di protezioni diversi, il componente elettrico in esame deve essere equipaggiato con i fusibili o con l'interruttore dalle caratteristiche massime specificate dal costruttore originale.

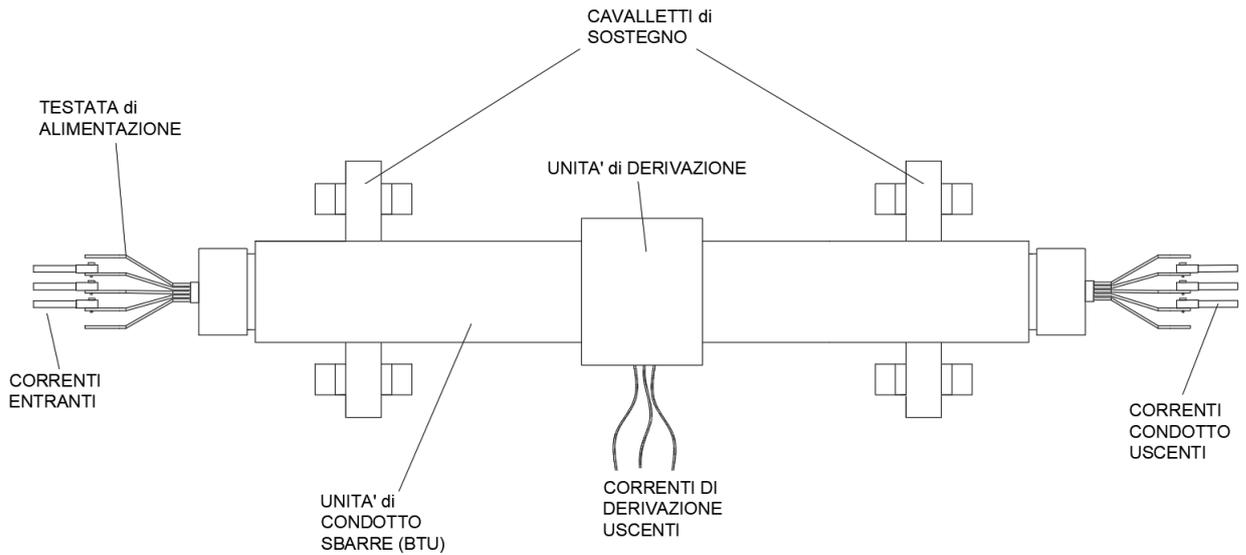


Figura 3.5: Rappresentazione del circuito di prova, vista dell'alto, allestito nell'area di Forti Correnti del LATFC con BTU disposta orizzontalmente su cavalletti di sostegno.

Come si vede in figura 3.5, la corrente in ingresso al condotto sbarre si divide in una o più linee di uscita e per ottenere il valore prefissato in ciascuna di esse si interviene variandone la lunghezza dei collegamenti di cortocircuito oppure l'induttanza, mediante l'inserzione di nuclei magnetici.

Il circuito di prova, schematizzato in figura 3.1, dev'essere alimentato con un livello di tensione tale per cui la cassetta di derivazione deve poter portare la sua corrente nominale  $I_{N,der}$ , mentre nell'unità di condotto sbarre deve fluire una corrente  $I_N > 2 \cdot I_{N,der}$  fino al punto in cui è presente la derivazione.

La norma indica come possibili punti di misura delle temperatura le giunzioni dei conduttori e i morsetti degli apparecchi nel circuito principale; tuttavia il committente può comunque richiedere di monitorare il comportamento termico di particolari punti critici del componente.

In ogni caso, nella tabella sono riassunte le altre prescrizioni della norma tecnica relative ai punti di misura delle temperature ambiente in base alla disposizione verticale o orizzontale del BTU in fase di test.

BTU orizzontale	BTU verticale
BTU posizionata a 1 m dal pavimento	BTU lunga più di 4 m
Unità di derivazione in posizione centrale sulla BTU	Unità di derivazione posizionata a circa 1.5 m verso il basso rispetto all'estremo superiore del condotto
$T_{amb}$ rilevate ad altezza della BTU, in zona centrale, ad 1 m da entrambi i lati dell'involucro	$T_{amb}$ rilevate ad altezza dell'unità di derivazione ad 1m da entrambi i lati dell'involucro

Tabella 3.2: Tabella riassuntiva sulla disposizione dei componenti elettrici per la prova di cicli termici secondo la norma *CEI EN 61439-6*

Le sovratemperature  $\Delta T_i$  dell'*i-esimo* punto di misura per la prova sono determinate dalla seguente relazione

$$\Delta T_i = T_i - \frac{T_{amb,1,i} + T_{amb,2,i}}{2} \quad (3.1)$$

dove, alla misurazione della temperatura assoluta in un punto  $T_i$  si sottrae la media tra due diverse misurazioni di temperatura dell'aria ambiente,  $T_{amb,1,i}$  e  $T_{amb,2,i}$ .

Durante gli intervalli di alimentazione del circuito ( $t_{ON}$ ) è inoltre richiesto il controllo delle correnti in entrata all'interno di una *banda di tolleranza*, in seguito alla variazione di resistenza elettrica dovuta al riscaldamento/raffreddamento del sistema.

Nello specifico, la norma CEI EN 61439-1 prevede che "il valor medio delle correnti di prova in entrata deve essere compreso tra  $-0\%$  e  $+3\%$  del valore previsto mentre ciascuna fase deve essere compresa tra  $\pm 5\%$  del valor medio delle tre fasi".

### 3.2.4 Cicli termici: procedura di prova

Durante una prova di cicli termici l'unità assiemata, configurata come descritto nella sezione precedente, è sottoposta, tramite un'alimentazione di tipo discontinuo (fasi di ON che si alternano a fasi di OFF), ad un continuo susseguirsi di intervalli di riscaldamento e raffreddamento (Figura 3.6) per un numero di cicli tale da indurre sugli elementi di connessione interni un elevato stress termico.

In questa sezione si analizza la procedura ciclica della prova, sulla base dalla quale si svilupperà poi il sistema di gestione automatico.

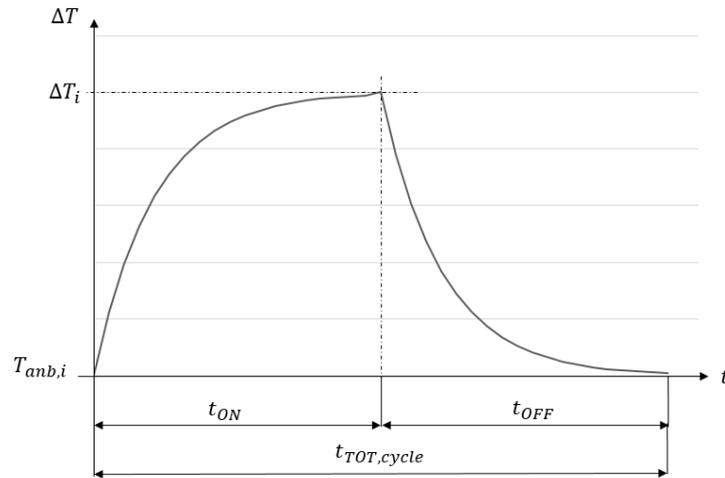


Figura 3.6: Rappresentazione dell'evoluzione della sovratemperatura nell'i-esimo punto di misura per un generico ciclo.

Prima della prova, l'operatore effettua operazioni preliminari per il condizionamento del campione con una serie di inserzioni e rimozioni dell'unità di derivazione senza corrente di carico e per un numero di volte indicato in tabella 3.3 a seconda della sua corrente nominale.

Corrente nominale [A]	Numero di cicli di inserzione e rimozione
$I_{nc} \leq 63$	25
$63 < I_{nc} \leq 200$	10
$200 < I_{nc}$	5

Tabella 3.3: Tabella dei cicli di condizionamento dell'oggetto in test tratta dalla norma *CEI EN 61439-6 – Tabella 105*.

In seguito, si passa alla fase di *caratterizzazione del profilo termico* di ciascun punto preso in analisi sull'oggetto alimentando il circuito con la corrente di prova fino a che non si raggiunge la *condizione di equilibrio* in tutti i punti di misura, ovvero fin quando la variazione di temperatura registrata nella fase di riscaldamento diventa inferiore al valore di 1 K/h.

Il campione viene poi sottoposto a 84 cicli consecutivi, ognuno dei quali è costituito da una fase di riscaldamento e da una di raffreddamento per intervalli di tempo che dipendono dall'evoluzione delle temperature rispetto alla temperatura di equilibrio

registrata nella fase iniziale.

Il diagramma di flusso riportato in figura 3.7 riassume la struttura principale della fase ciclica del test, in cui le condizioni presenti nei blocchi decisionali devono essere verificate contemporaneamente per tutti i punti del componente presi in esame dall'inizio della prova.

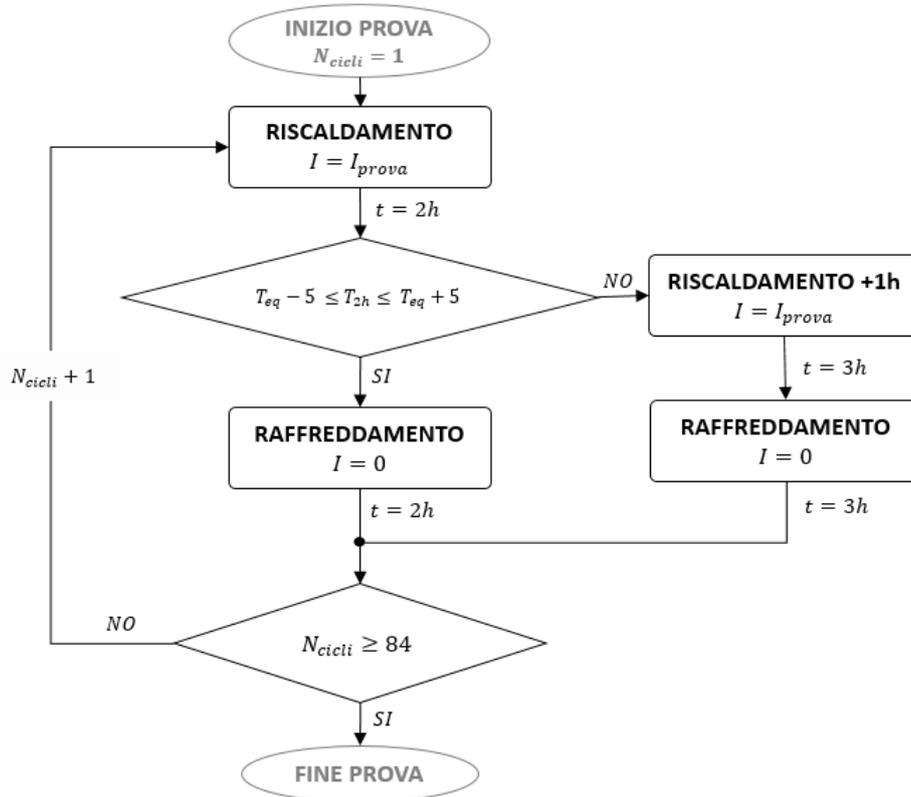


Figura 3.7: Flow chart della prova di cicli termici per condotti sbarre secondo la norma CEI EN 61439-6

Per quanto riguarda i parametri di confronto delle temperature, a seconda che i punti in analisi siano più o meno critici dal punto di vista termico, possono essere concordati tra il laboratorio e committente.

Per ritenere verificate le caratteristiche di progetto del campione in prova è necessario che dopo l'84esimo ciclo le temperature non devono superare più di 5 K le temperature di equilibrio prese nella fase di caratterizzazione del profilo termico.

### 3.3 Connettori a compressione e meccanici per cavi di energia: analisi della norma CEI EN 61328-1

#### 3.3.1 Introduzione e definizioni generali

La norma[5] CEI EN 61328 si applica ai connettori a compressione e meccanici per cavi fino a 36 kV di sezioni maggiori o uguali a  $10 \text{ mm}^2$  per cavi in rame o fino a  $16 \text{ mm}^2$  in alluminio, interrati o installati in edifici, comunque con temperature massime assolute inferiori a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Le prove di tipo meccanico ed elettrico trattate nella parte 1 della norma hanno l'obiettivo di verificare l'adeguatezza dei materiali ed in generale la bontà del progetto del componente in tutte le condizioni previste di funzionamento. Affinché le prescrizioni siano rispettate devono verificarsi durante il servizio le seguenti principali condizioni:

1. resistenza della connessione deve mantenersi costante;
2. la temperatura del connettore deve essere di un ordine di grandezza non superiore a quella del conduttore;
3. la resistenza meccanica deve essere adeguata all'uso previsto;
4. durante la prova di corto circuito (qualora fosse prevista) non deve influenzare quanto detto al punto 1 e 2.

In ogni caso, dato che non è possibile definire in modo preciso tutte le possibili condizioni di funzionamento per ogni campo di applicazione, la norma individua due macro categorie di connettori:

- *Classe A*, comprendente i connettori in uso nella maggior parte delle applicazioni, destinati alle reti industriali o di distribuzione che pertanto devono essere sottoposti a prove di corto circuito di intensità e durata relativamente elevate;
- *Classe B*, comprendente i connettori utilizzati in specifiche applicazioni industriali dove sovraccarichi o cortocircuiti vengono rapidamente eliminati dai dispositivi di protezione installati nella rete.

dove per i componenti di classe A sono previste prove di cicli termici inframezzate con prove di cortocircuito, mentre per quelli di classe B soltanto cicli termici.

Nella norma tecnica si distinguono inoltre diversi tipi di connettori:

- *Giunto testa-testa*, per la connessione di due tratti consecutivi di conduttore;
- *Connettore di derivazione*, per la connessione di un cavo, tramite un giunto testa-testa, ad un conduttore principale in un suo punto intermedio come schematizzato in figura 3.8;
- *Capocorda*, per la connessione di un cavo ad altre apparecchiature metalliche mediante un bullone (Figura 3.8).



Figura 3.8: A sinistra la schematizzazione di un connettore di derivazione, tratta dalla norma CEI EN 61328-1; a destra un capocorda di Rame con connessione per compressione

Questi tipi di connettori metallici possono essere accoppiati al conduttore *per compressione*, effettuata da un apposito utensile che imprime al colletto del connettore con dentro il cavo una deformazione permanente (Figura 3.9), o *per serraggio meccanico* mediante un bullone o una vite.



Figura 3.9: Utensile crimpatore pneumatico utilizzato nel LATFC per cavi fino a  $240 \text{ mm}^2$

Esistono anche connettori *a perforazione d'isolante* (Insulation Piercing Connector o IPC) in cui delle sporgenze metalliche del morsetto, perforando lo strato isolante del cavo, raggiungono il conduttore garantendo quindi il contatto elettrico.



Figura 3.10: Due morsetti IPC per cavi di diverse sezioni tratti dal *catalogo Enel, Settore Energia – edizione Luglio 2014*.

### 3.3.2 Cicli termici: configurazione del sistema di test

I circuiti per la prova di cicli termici designati dalla norma CEI EN 61328-1 per *giunti testa-testa* e *capicorda* sono riportati in figura 3.11 e devono essere installati in un area del laboratorio in cui l'aria è calma e la temperatura ambiente deve essere compresa tra i  $15^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$ .

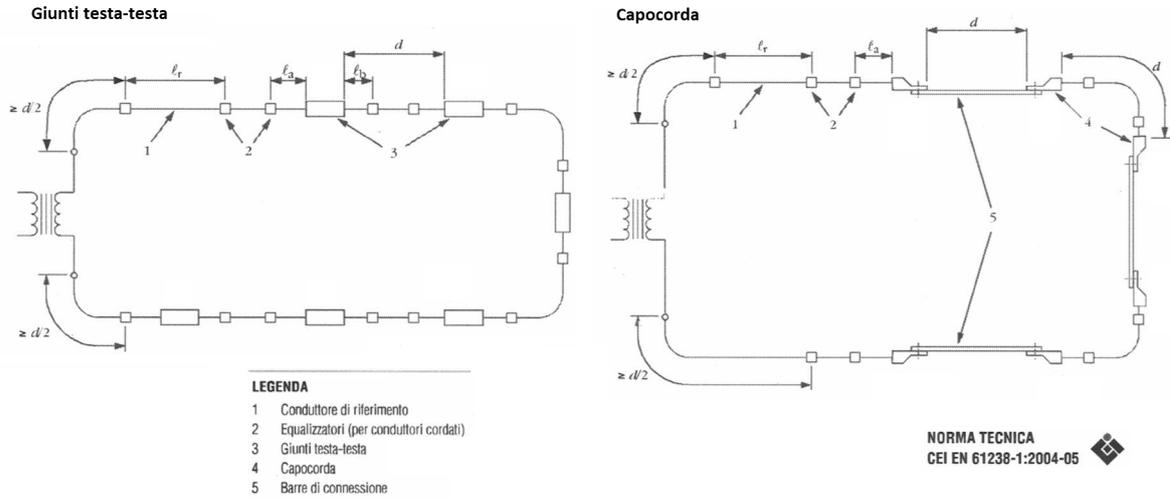


Figura 3.11: Circuiti di prova tipici per *giunti testa-testa* e *capicorda*, tratti dalla norma CEI EN 61328-1 – figura 1.

Come si vede dalle indicazioni in figura 3.11, il circuito di test, alimentato in corrente alternata, comprende l'inserzione di sei connettori montati sui cavi secondo le indicazioni fornite dal costruttore.

I *connettori di derivazione* sono invece trattati come giunti testa-testa se il cavo di derivazione ha una sezione uguale (immediatamente superiore o inferiore) a quella del cavo principale mentre in tutti gli altri casi si fa riferimento al circuito in figura 3.12.

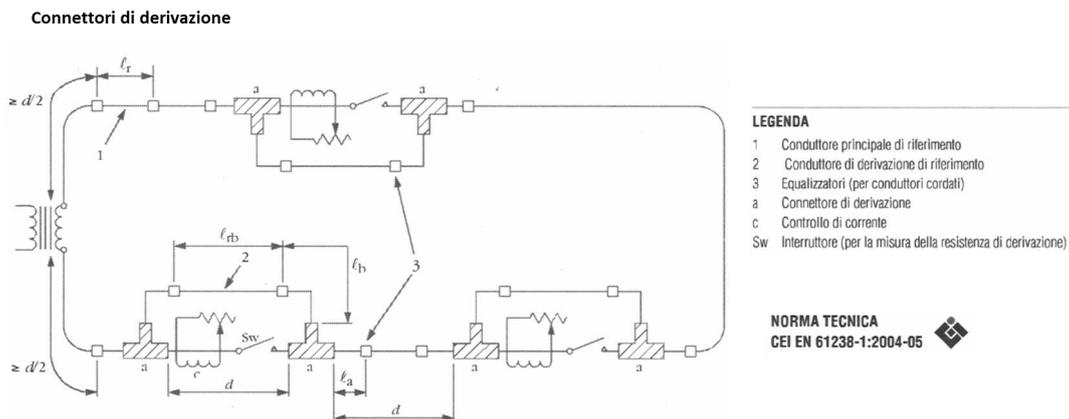


Figura 3.12: Circuito di prova tipico per *connettori di derivazione*, tratto dalla norma CEI EN 61328-1 – figura 2.

### 3.3.3 Cicli termici: procedura di prova

La procedura di prova non è unica per tutti i connettori ma presenta diverse differenze a seconda del tipo di connettore in analisi.

Nel primo ciclo termico vengono effettuate le seguenti operazioni preliminari, valide poi per i cicli termici successivi:

1. determinazione della temperatura del *conduttore di riferimento* all'equilibrio termico,  $\theta_R$ ;
2. determinazione del *connettore mediano*

dove il *conduttore di riferimento* (Figure 3.11 e 3.12) è un conduttore nudo o con isolante rimosso, di lunghezza prescritta dalla norma, su quale si deve misurare la *temperatura di riferimento* e la *resistenza di riferimento* nei modi esplicitati in seguito; il *connettore mediano*, invece, è quello (dei sei totali nel circuito di test) che durante il primo ciclo termico fa registrare il terzo valore più elevato di temperatura.

Si riportano di seguito le modalità di svolgimento di operazioni per ciascun tipo di connettore descritto in precedenza:

- per i *giunti testa-testa* e nei *capocorda* si alimenta il circuito con la corrente di prova fino al raggiungimento di una temperatura di  $120\text{ }^\circ\text{C}$  all'equilibrio, equilibrio termico che è individuato da una variazione della temperatura inferiore a  $\pm 2\text{ K}$  per  $15\text{ min}$  sul punto di misura del conduttore di riferimento. Per i cicli termici successivi, la temperatura del conduttore di riferimento deve essere ritenuta sempre pari a  $120\text{ }^\circ\text{C}$  solo se la temperatura registrata dal conduttore mediano non è inferiore a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  altrimenti si deve aumentare la corrente di prova finché non si raggiunge questa condizione oppure se il conduttore di riferimento supera i  $140\text{ }^\circ\text{C}$  non si interviene ulteriormente e si procede con le temperature raggiunte all'equilibrio.
- per i *conduttori di derivazione* (non IPC), nel caso in cui venga utilizzato il circuito di test di figura 3.12, oltre al conduttore principale di riferimento ci sono i tre conduttori di derivazione di riferimento perciò quanto detto prima per i giunti testa-testa vale anche per questo tipo di connettori, estendendo in questo caso i limiti anche alle derivazioni.  
Si precisa inoltre che la corrente di prova deve essere regolata in ciascuna derivazione mediante adattamento delle impedenze o iniezione di corrente.

Nel secondo ciclo termico (Figura 3.13), invece, si determinano i seguenti parametri di riferimento per i cicli termici successivi:

1. la durata totale del singolo ciclo termico,  $t_1 + t_2$ ;
2. il profilo di temperatura.

Nel circuito di test si fa fluire la corrente di prova finchè la temperatura del connettore mediano non raggiunge una fase di stabilizzazione definita come una variazione di temperatura inferiore a  $2\text{ K}$  nell'arco di  $10\text{ min}$ , e la temperatura del conduttore di riferimento deve essere contenuta in una banda di  $[0, +6]\text{ K}$  rispetto alla sua temperatura  $\theta_R$ , come si osserva dal grafico in figura 3.13.

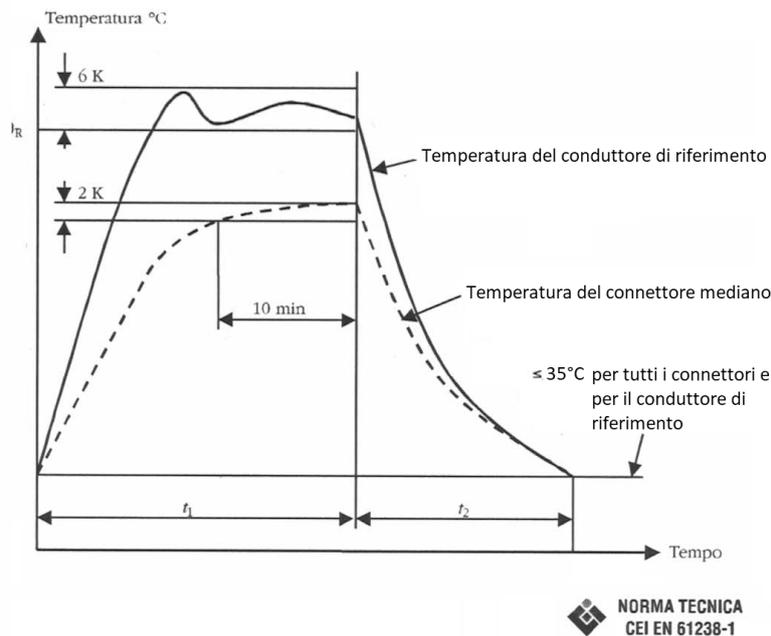


Figura 3.13: Grafico temperatura-tempo dell'oggetto in test caratterizzato nel secondo ciclo termico, tratto dalla norma *CEI EN 61328-1* – figura 4

Per ridurre la fase di riscaldamento è possibile impostare una corrente superiore alla  $I_N$  normalmente utilizzata per la prova, in base alla sezione dei cavi del circuito di prova e per un tempo indicato in tabella 3.4.

In generale, è comunque possibile effettuare più di un "secondo ciclo termico" se non si raggiungono le condizioni di temperatura prima descritte al primo tentativo. Dopo la fase  $t_1$  si riscalda si passa all'intervallo di raffreddamento (eventualmente anch'esso accelerato) in cui si attende che tutti componenti del circuito di test, conduttore di riferimento e connettori, raggiungano una temperatura di base inferiore ai  $35^\circ\text{C}$ .

	Sezione nominale del conduttore $A$ [mm <sup>2</sup> ]	Durata [min]
Al Cu	$16 \leq A \leq 50$ $10 \leq A \leq 35$	5
Al Cu	$50 \leq A \leq 150$ $35 \leq A \leq 95$	10
Al Cu	$150 \leq A \leq 630$ $95 \leq A \leq 400$	15
Al Cu	$A < 630$ $A < 400$	20

Tabella 3.4: Tabella della durata minima di riscaldamento a corrente elevata per le varie sezioni dei conduttori, tratta dalla norma CEI EN 61328-1

E' bene precisare che il parametro di controllo per i cicli è la temperatura del conduttore di riferimento  $\theta_R$  in modo tale da rendere indipendenti le misurazioni dalle fluttuazioni della temperatura ambiente.

Dopo l'intervallo di raffreddamento del secondo ciclo termico (o dei secondi cicli termici, se sono più di uno), si passa quindi all'esecuzione dei cicli termici successivi e, secondo quanto prescritto dalla norma tecnica, le modalità di prova sono differenti a seconda della classe di appartenenza dei componenti in test, in base alla classificazione fatta nel paragrafo 3.3.1.

In particolare, oltre alla differente struttura ciclica della prova, per i componenti di classe A sono previste anche delle prove di cortocircuito.

Il numero totale di cicli termici a cui si sottopone il campione è di 1000, ciascuno caratterizzato da una fase di riscaldamento ed una di raffreddamento come definito nel secondo ciclo.

La normativa prevede anche che vengano effettuate misurazioni di temperatura e resistenza ad intervalli regolari durante la procedura ciclica, come indicato nella tabella 3.5.

La misura di resistenza deve essere effettuata facendo fluire nei connettori e nel conduttore di riferimento una corrente continua fino al 10% della corrente di test in modo tale da non influenzarne la loro temperatura. Si misura quindi la differenza di potenziale tra due specifici punti del componente elettrico indicati dalla norma tecnica in base connettore, come ad esempio è riportato nella figura 3.14 relativa ai giunti testa-testa. Il valore di resistenza tra quei due punti è dato dal rapporto tra la

Classe A		Classe B	
0	prima del primo ciclo termico	0	prima del primo ciclo termico
200	prima e dopo del cortocircuito	250	
250			

poi ogni 75 cicli (14 misure in totale)    poi ogni 75 cicli (12 misure in totale)

Tabella 3.5: Tabella degli intervalli in cui è richiesta la misurazione di resistenza e temperatura, estratta dalla norma CEI EN61328-1

differenza di potenziale misurata e la corrente continua che attraversa il componente. La temperatura, invece, deve essere misurata preferibilmente tramite termocoppie (con una precisione di lettura di  $\pm 2 K$ ) in un punto centrale del conduttore di riferimento e sui campioni in test.

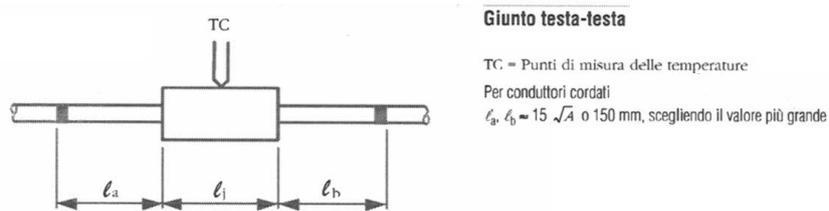


Figura 3.14: Indicazioni sui punti di misura della differenza di potenziale per il calcolo della resistenza per un giunto testa-testa, tratto dalla norma CEI EN 61328-1 – figura 3a.

La prove di cortocircuito, previste soltanto per i connettori di classe A, sono in totale sei e sono effettuate dopo il 200<sup>esimo</sup> ciclo termico, con una corrente massima di  $25kA$  per una durata di  $(1 \pm 0,5)s$ , in modo da portare il conduttore nudo di riferimento ad una temperatura compresa tra  $250^{\circ}C$  e  $270^{\circ}C$ . In seguito a queste prove di cortocircuito, il circuito di test deve essere disalimentato per un tempo tale da permettere ai componenti di riacquisire una temperatura inferiore ai  $35^{\circ}C$ .

# Capitolo 4

## Programmazione in LabVIEW™

### 4.1 Introduzione al linguaggio LabVIEW™

LabVIEW™ (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) è un linguaggio di programmazione grafico, sviluppato dalla National Instruments, tramite il quale si può realizzare una vasta gamma di applicazioni, anche autonome, adibite a test su componenti e/o all'osservazione di fenomeni fisici, che includono quindi l'acquisizione, l'analisi e l'elaborazione di parametri e/o segnali fisici in ingresso, generando risultati in uscita con, eventualmente, anche rapporti di prova.

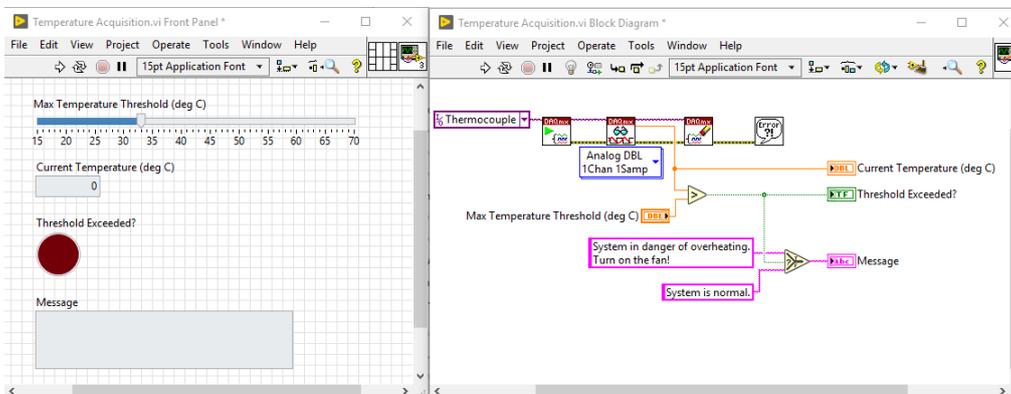


Figura 4.1: Esempio di un semplice VI di LabVIEW

A differenza di quanto accade nei linguaggi di programmazione testuali, in cui le istruzioni definite con una o più righe di testo sono eseguite in maniera sequenziale dalla prima all'ultima, nell'ambiente LabVIEW invece, l'esecuzione del programma è scandita dal flusso di dati in una struttura di blocchi connessi tra loro che, per certi versi, può essere assimilata ad un flowchart.

L'ambiente di lavoro adibito alla programmazione LabVIEW, chiamato anche *Virtual Instruments* o *VI*, è principalmente costituito da due finestre distinte:

- il Front Panel
- il Block Diagram.

Come si osserva in figura 4.1, nel *Front Panel* sono presenti gli strumenti virtuali di input dei parametri e di output dei risultati, chiamati rispettivamente *controls* e *indicators*, a ciascuno dei quali corrisponde univocamente ad una variabile all'interno del *block diagram*.

Nel *block diagram*, invece, si scrive il codice di programmazione grafico LabVIEW, collegando opportunamente dei blocchi tra loro, ciascuno dei quali assolve ad una o più funzioni.

## 4.2 Acquisizione di dati in LabVIEW

La misura di segnali fisici esterni avviene tramite una serie di dispositivi in cascata tra loro chiamato sistema di acquisizione dati o DAQ, schematizzato in figura 4.2, il quale è fondamentalmente composto dai seguenti elementi:

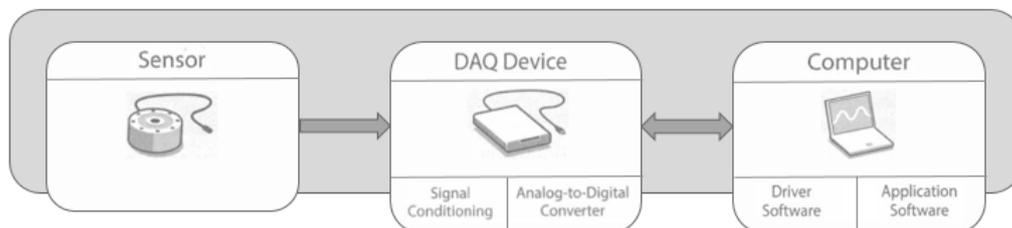


Figura 4.2: Catena di dispositivi per l'acquisizione di una grandezza fisica tramite un PC [6].

- trasduttore: dispositivo sensibile ad una grandezza fisica che la converte in un segnale elettrico misurabile;
- dispositivo di condizionamento del segnale: filtra ed adatta il segnale elettrico in ingresso per renderlo compatibile con l'ingresso del convertitore A/D a valle;
- scheda di acquisizione: converte il segnale analogico pre-condizionato in un dato digitale con una risoluzione predefinita;

- software: installato su PC che, tramite driver dedicati consente di scalare ed in generale elaborare i dati ricevuti dal dispositivo DAQ con il quale può essere connesso in diversi modi, tra cui tramite cavo PCI, PCI Express, PXI o tramite porta USB o porta IEEE 1394.

In particolare, i dispositivi DAQ di National Instruments si interfacciano con l'applicazione software tramite il driver NI-DAQmx.

Dal punto di vista hardware, invece, per questo progetto, le varie schede di I/O dedicate alle specifiche grandezza da misurare (o generare in uscita) sono inserite in uno chassis CompactDAQ connesso al PC tramite USB.

National Instruments mette a disposizione, tra le altre cose, anche l'applicazione NI MAX (Measurement & Automation Explorer) adibita alla configurazione e ai test preliminari dei vari moduli I/O installati sul dispositivo di acquisizione.

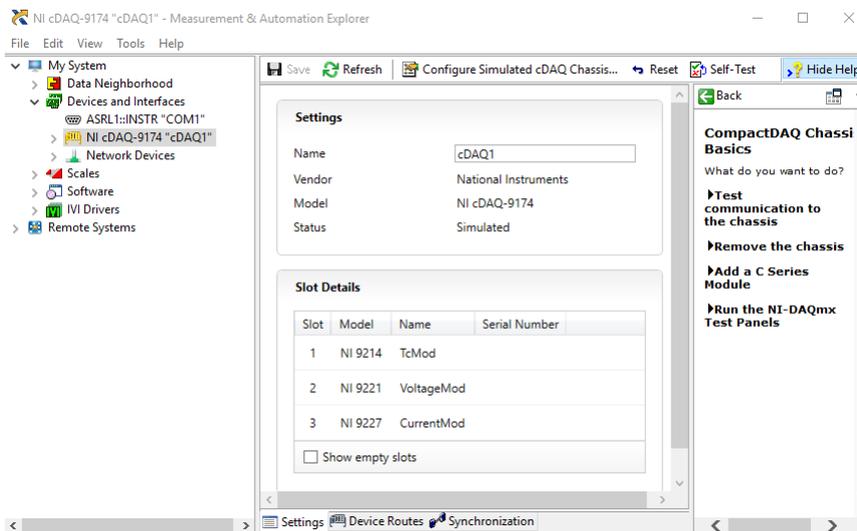


Figura 4.3: In figura è mostrato lo screenshot della pagina principale di NI MAX.

Nella fasi di sviluppo del software non è necessario connettere il dispositivo DAQ fisico al PC, per cui tramite NI MAX se ne può creare uno virtuale in parallelo con gli andamenti dei vari ingressi simulati: in questo modo si consente al programmatore di scrivere e sviluppare il codice software in una sede diversa da quella in cui poi verrà definitivamente installato il sistema da controllare.

La configurazione hardware scelta per il dispositivo di acquisizione in base agli ingressi ed uscite del sistema è analizzata nei capitoli successivi.

## 4.3 Descrizione del framework utilizzato in LabVIEW™

La progettazione dell'applicazione di gestione automatica dei cicli termici si è basata su un'architettura LabVIEW™ già esistente e collaudata in diverse altre applicazioni di test, misurazione e gestione automatica di processi industriali. In questo capitolo si passeranno in rassegna le principali logiche di funzionamento e vari componenti del framework utilizzato, ponendo l'attenzione sulla sua struttura modulare che di fatto permette di riscrivere o aggiungere parti di codice per adattarlo ad applicazioni anche totalmente differenti sia per le funzionalità che per l'hardware.

### 4.3.1 Architettura ad attori e metodo di scambio delle informazioni

Il framework utilizzato è costituito da un'insieme di moduli distinti, comunemente chiamati anche *attori*, ciascuno dei quali svolge determinate operazioni comunicando, se necessario, con altri attori tramite l'invio/ricezione di messaggi in formato testuale.

L'attore *router*, realizzato con l'uso dei VI della libreria AMC (Asynchronous Message Communication) di National Instruments, gestisce la comunicazione tra i vari elementi della piattaforma con una particolare logica ispirata al meccanismo di newsletter di una attività commerciale, in cui il messaggio di posta elettronica viene inviato soltanto ai clienti che hanno manifestato il proprio interesse effettuando la sottoscrizione al servizio.

Infatti, in maniera pressoché analoga, tutti i messaggi inviati dai vari attori dell'applicazione convergono nell'attore di comunicazione *Router* (Figura 4.4), che a sua volta li inoltra a coloro che si sono registrati per poterli ricevere (Figura 4.5), implementando così un tipo di comunicazione "*Attore Mittente - Router - Attore Destinatario*".

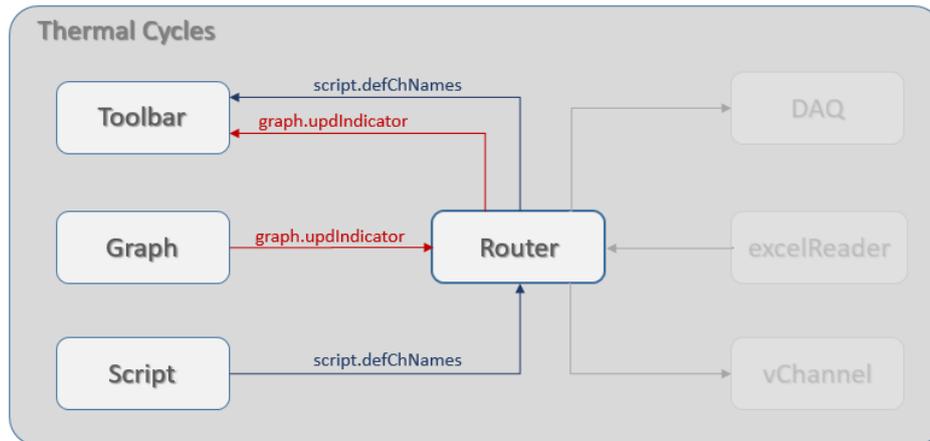


Figura 4.4: Schematizzazione della logica di comunicazione tra gli attori

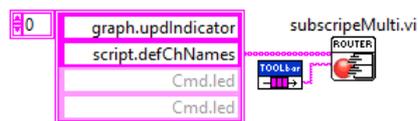


Figura 4.5: Screenshot della porzione di codice in cui l'attore destinatario effettua la sottoscrizione in *Router* per abilitarsi alla ricezione di quegli specifici messaggi.

La funzione di dialogo tra i processi di uno stesso modulo e tra i vari attori del framework è realizzata tramite un sistema di gestione di code di messaggi in formato testuale, *Queue Message Handler*, contenenti le seguenti informazioni: *nome coda*, *nome messaggio* e *contenuto del messaggio*.

Al fine facilitare la comprensione dello schema di scambio dati tra gli attori, per il nome del messaggio è utilizzata una sintassi standard del tipo "*attore mittente.nome messaggio*" (Figure 4.4 e 4.5).

### 4.3.2 Struttura principale del generico attore

Tutti i moduli del framework sono realizzati con una struttura e regole di base comuni: si analizza a tal proposito il block diagram del VI principale di ciascuno di essi (Figure 4.6).

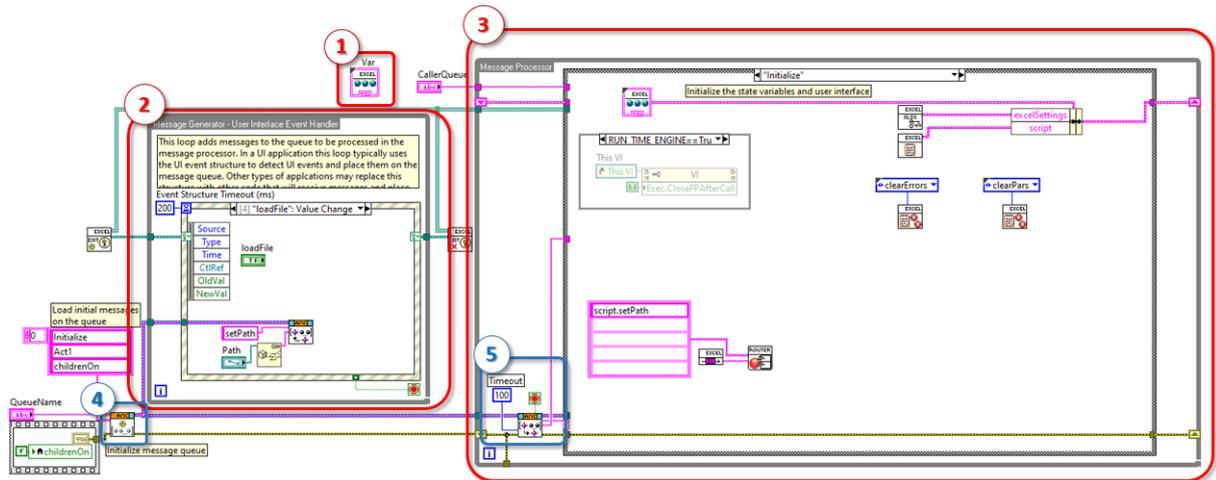


Figura 4.6: Struttura del block diagram del generico attore utilizzato nel framework.

Esso è strutturato sulla base del modello *Producer - Consumer* e i principali elementi che lo compongono sono:

1. *Variabili* utilizzate all'interno dell'attore, raggruppate e salvate nel file *Var.ctrl*;
2. *Message generator*: è il *producer* dell'evento, cioè dove viene generato un evento (è il *producer*), ad esempio in seguito ad un'azione dell'operatore sulla UI, che tramite i VI della libreria AMC richiama uno specifico caso del *Message Processor*;
3. *Message Processor*: è il *l'event consumer*, costituito da un ciclo while principale che racchiude un case structure in cui vengono elaborati sia i messaggi ricevuti dal *Message Generator*, sia quelli provenienti da altri attori del progetto;
4. *Local queue message*: crea, per ciascun attore, un elenco (o coda) contenente i messaggi che, uno alla volta, vengono processati nel *case structure* del *Message Processor*. Ogni coda di messaggi viene pre-caricata con un elenco standard di elementi per richiamare gli omonimi stati del processo generalmente adibiti ad operazioni di inizializzazione; permette la lettura dei messaggi caricati nella coda dell'attore restituendone contenuto e nome del messaggio in base al quale gestisce gli stati del *case structure*, all'interno del *message processor*, con il quale è connesso.

### 4.3.3 Esecuzione dell'applicazione e analisi delle principali funzioni degli attori comuni

La simultaneità delle operazioni all'interno dell'applicazione, quindi l'esecuzione contemporanea dei vari attori, è garantita dall'attore *LoadApp* che provvede al caricamento ed avvio dinamico dei moduli ed alla loro chiusura al termine dell'esecuzione dell'applicazione, con una particolare logica *padre - figlio*.

In questo modo ogni attore, dopo essersi avviato, manda in esecuzione altri attori, chiamati per l'appunto *figli* e in maniera analoga ne comanda il loro arresto, prima di fermarsi in seguito al comando di chiusura dell'applicazione.

A seconda delle funzioni che svolgono, gli attori del framework possono essere classificati in due macro categorie, *attori silenti* ed *attori non silenti*, dove i primi effettuano operazioni non visibili dall'utente finale; i secondi, invece, compongono la User Interface (UI) acquisendo e gestendo i comandi impartiti dall'operatore attraverso appositi pulsanti e controlli virtuali, oltre a visualizzare i risultati dell'elaborazione dati sul monitor del PC.

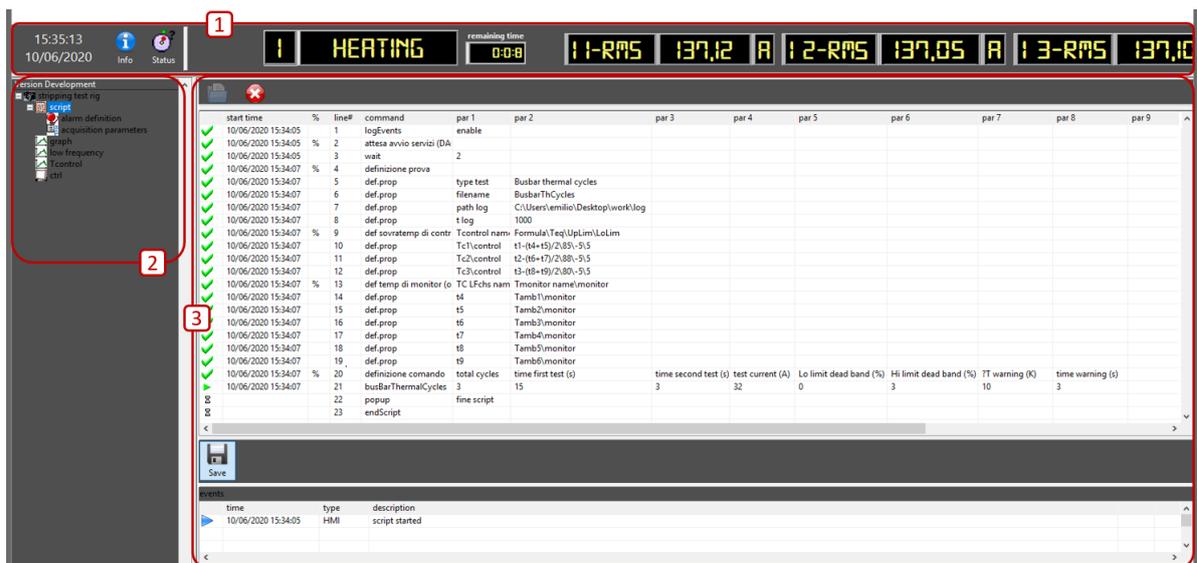


Figura 4.7: Uno screenshot della home page dell'interfaccia utente

La struttura di base della User Interface (Figura 4.7) ricalca lo stile grafico ad “albero” delle cartelle di Windows ed è principalmente composta dai seguenti elementi:

1. *toolbar*, implementata dall'omonimo attore, è posizionata nella parte alta dell'interfaccia e contiene comandi e indicatori per la visualizzazione di info generali sull'applicazione tra i quali data e ora, stato del sistema, segnalazione presenza errori sul sistema di acquisizione e permette di avere sempre in primo piano i valori di alcune principali grandezze acquisite;
2. *albero di selezione*, costituito da rami principali e secondari espandibili, mostra l'articolazione delle varie pagine dell'applicazione e ne consente la selezione;
3. spazio occupato dalla specifica pagina selezionata dall'utente che, a seconda della sua scelta, mostra diverse informazioni specifiche sull'esecuzione dell'applicazione, tra cui lo script di comando caricato piuttosto che gli andamenti dei segnali nel tempo oppure ancora i canali di Analog Input (AI) attivi con i relativi allarmi predisposti. Ogni pagina della HMI è implementata dall'omonimo attore non silente.

Per quanto riguarda invece gli attori silenti, di seguito se ne elencano e descrivono brevemente i principali:

- *excelReader*, adibito all'interpretazione ed a una prima elaborazione dei dati contenuti nel file Excel, verificando che questi siano stati immessi correttamente, individuando quindi eventuali errori di battitura dell'operatore di laboratorio;
- *executeScript*, ha la funzione di eseguire dei comandi inseriti tramite script. Ad ogni comando ammissibile da script corrisponde un oggetto di *executeScript*. Questo tipo di programmazione ad oggetti dona all'attore un'elevata modularità e così per aggiungere un nuovo comando basta duplicarne e successivamente modificarne uno già esistente.
- *DAQ*, a cui è demandato il compito di acquisizione dei segnali analogici in ingresso. Anch'esso come *executeScript* è strutturato in oggetti in modo tale da potersi interfacciare, come si vedrà nei prossimi capitoli, con diversi tipi di schede di Analog Input e soprattutto con frequenze di campionamento differenti.  
I dati acquisiti dai canali fisici di ingresso tramite questo attore sono poi inviati a *router* o comunque messi a disposizione di qualsiasi altro attore del framework mediante l'uso di variabili globali.
- *DIO*, la cui funzione è quella di acquisire i segnali digitali in ingresso e generare i segnali digitali di uscita.

Nel prossimo capitolo saranno illustrate tutte le varie fasi della progettazione del software di gestione automatica dei cicli termici di condotti sbarre.

# Capitolo 5

## Progettazione e sviluppo del software

### 5.1 Definizione delle specifiche di progetto

In questo capitolo saranno illustrate i vari passi della progettazione del software di gestione automatica per la prova di cicli termici su condotti sbarre, secondo quanto previsto dalla norma tecnica *CEI EN 61439-6*, analizzata nei capitoli precedenti.

E' stata realizzata un'applicazione che, pur essendo comunque strutturata sulla base della procedura di prova prevista dalla normativa attualmente vigente, abbia un certo numero di gradi di libertà per quanto riguarda i parametri caratteristici come, ad esempio, i tempi di esecuzione, il numero totale di cicli, i metodi di definizione delle sovratemperatures, gli intervalli di log dati e così via, in modo tale da potersi adattare ad eventuali e sensibili modifiche future della normativa stessa o a specifiche richieste da parte del committente.

E' stato quindi previsto che tutti i parametri per l'esecuzione automatica della prova devono essere inseriti, con una specifica sintassi, in uno script di comando in formato testuale, illustrato in dettaglio nei prossimi sottocapitoli.

Gli ingressi analogici sono in numero variabile, in base ai punti di misura richiesti per lo specifico oggetto in prova e sono pertanto definiti dall'operatore in un'apposita sezione dello dello script di configurazione, come si vedrà nel paragrafo seguente.

A tal proposito, in tabella 5.1 sono riportate le schede di I/O montate sullo chassis cDAQ 9174, con le loro principali caratteristiche.

E' bene precisare che, per la prova di cicli termici su condotti sbarre, non è richiesta una misura di tensione pertanto la scheda di tensione è inserita soltanto a fini di predisposizione dell'applicazione per prove su altri tipi di componenti.

Slot	Modello	Nome	Descrizione
1	NI 9214	TcMod	Modulo input di temperatura isotermico a 16 canali, 68 S/s, $\pm 78$ mV
2	NI 9221	VoltageMod	Modulo di input di tensione a 8 canali, $\pm 60$ V, 800 kS/s, a 12 bit
3	NI 9227	CurrentMod	Modulo di input di corrente a 4 canali, 24 bit, 50 kS/s/ch, 5 Arms
4	NI 9375	DIOMod	Modulo di I/O digitali, con 16 canali di input e 16 canali di output

Tabella 5.1: Configurazione dei moduli di I/O montati sullo chassis cDAQ 9174.

Il modulo NI 9375 di I/O digitali ha in totale 32 canali, in cui ciascun canale di ingresso è compatibile con livelli logici a 24 V mentre le linee in uscita generano segnali digitali che da 6 V a 30 V, a seconda dell'alimentazione esterna. E' necessario inserire un circuito di condizionamento a valle della scheda di uscita in modo da amplificare i livelli di tensione generati per renderli compatibili con il circuito di comando dell'autotrasformatore (Figura 5.1) che è alimentato a 230 V.



Figura 5.1: A sinistra la pulsantiera esterna del quadro di comando dell'autotrasformatore, a destra una foto del circuito interno.

Gli ingressi e le uscite digitali previsti per questa applicazione (Tabelle 5.2 e 5.3), a differenza degli ingressi analogici, sono in numero fisso e pertanto non c'è la necessità di definirli nello script prima dell'inizio delle operazioni.

Canale fisico	Nome canale	Descrizione
DIO/port0/line0	Emerg	Pulsante a fungo di Emergenza
DIO/port0/line1	SSmog	Sensore fumo area di prova
DIO/port0/line2	SDoor	Contatto porta aperta area di prova

Tabella 5.2: Elenco ingressi digitali, modulo DIO NI 9375

Canale fisico	Nome canale	Descrizione
DIO/port1/line0	Marcia	Comando autotrasformatore alimentaz. ON
DIO/port1/line1	Arresto	Comando autotrasformatore alimentaz. OFF
DIO/port1/line2	Up	Comando autotrasformatore incremento tensione
DIO/port1/line3	Down	Comando autotrasformatore decremento tensione
DIO/port1/line4	GreenLight	Luce di segnalaz. verde – Esecuzione prova in corso, nessun errore
DIO/port1/line5	RedLight	Luce di segnalaz. rossa – Presenza errore o anomalia

Tabella 5.3: Elenco uscite digitali di comando dell’autotrasformatore e per le spie di segnalazione, modulo DIO NI 9375

## 5.2 Caratterizzazione dello script per la configurazione della prova

Lo script per la configurazione della prova è in formato Excel ed è strutturato in maniera tale da renderlo compatibile con l’attore *excelReader* e con il resto degli attori già implementati nel framework.

Il file Excel dello script è costituito da diversi fogli, ciascuno dedicato alla configurazione di uno specifico aspetto della prova, come viene illustrato di seguito:

- *Low Frequency* (Figura 5.2), in cui si definiscono la frequenza di campionamento e tutti gli ingressi analogici da acquisire nel processo di bassa frequenza che, per questa applicazione, sono i segnali delle termocoppie con la predisposizione anche per segnali di tensione.

Nello specifico, la prima colonna della tabella riportata in figura 5.2 contiene il comando “*ch-def*” mentre nelle colonne adiacenti, di seguito passate in rassegna, si inseriscono gli altri parametri di definizione degli ingressi analogici:

- “*Physical channel*”: con la sintassi “*Nome Scheda AI/ ingresso*” si definiscono il nome della scheda di AI e i nomi dei canali fisici in uso nell’applicazione;

- “*Type*”: si definisce il tipo di scheda di AI al quale sono connessi gli strumenti di misura (es. i segnali dei TA sono acquisiti tramite schede di corrente) o i trasduttori (per le termocoppie si utilizzano schede di AI dedicate) al fine di preconfigurare l’attore *DAQ* ad acquisire i vari segnali analogici in modo appropriato, come si vedrà nella prossima sezione;
  - “*Virtual name*”: l’operatore assegna a ciascun ingresso un nome diverso dall’indirizzo fisico del canale. Per come è stata sviluppata questa applicazione software, per le termocoppie si devono utilizzare nomi del tipo “*a1, a2, a3, ... , a9*” in modo tale da adottare una nomenclatura semplificata per le variabili che verranno in seguito richiamate nella formula per la definizione delle sovratemperature.
  - “*Scale name*”: contiene il nome del corrispondente tab (Figura 5.3) in cui è definito il tipo di scala da utilizzare per ciascuna misurazione o, nel caso delle termocoppie, il tipo di termocoppia connessa al cDAQ.
- *High Frequency* (Figura 5.2), in cui si definiscono, in modo del tutto analogo a quanto già detto per il tab *LowFrequency*, la frequenza di campionamento e tutti degli ingressi analogici da acquisire nel task di alta frequenza. In questa applicazione, l’acquisizione dei segnali di corrente è effettuata in alta frequenza per poterne poi calcolare il valore efficace, valore di controllo attraverso la regolazione della tensione di alimentazione del circuito di prova.
  - *S.voltage, S.current, K.thermocouple* e *J.thermocouple* contengono rispettivamente la definizione del tipo di scala, in questo caso lineare, adottata per gli ingressi di ciascun modulo AI e il tipo di termocoppie connesse al relativo modulo di acquisizione.

Come si può osservare in figura 5.3, i tab di scala e di tipo di termocoppia hanno una struttura di base identica nell’ottica di rendere l’applicazione il più modulare possibile, consentendo quindi all’operatore di aggiungere eventualmente ulteriori tipi scale direttamente in questo file di script e senza modificare parti del codice LabVIEW™.

	A	B	C	D	E	F	G
1	%	Physical channel	Type	Virtual name	Scale name	Unit	Note
2							
3	SampleRate	50					
4							
5	ch-def	VoltageMod/ai0	Voltage	v1	S.voltage	V	Ingresso libero scheda di tensione
6	ch-def	TcMod/ai0	TC	t1	K.thermocouple	degC	TC misura punto 1
7	ch-def	TcMod/ai1	TC	t2	K.thermocouple	degC	TC misura punto 2
8	ch-def	TcMod/ai2	TC	t3	J.thermocouple	degC	TC misura punto 3
9	ch-def	TcMod/ai3	TC	t4	K.thermocouple	degC	TC temp. Ambiente 1
10	ch-def	TcMod/ai4	TC	t5	K.thermocouple	degC	TC temp. Ambiente 2
11	ch-def	TcMod/ai5	TC	t6	J.thermocouple	degC	TC temp. Ambiente 3
12	ch-def	TcMod/ai6	TC	t7	K.thermocouple	degC	TC temp. Ambiente 4
13	ch-def	TcMod/ai7	TC	t8	K.thermocouple	degC	TC temp. Ambiente 5
14	ch-def	TcMod/ai8	TC	t9	J.thermocouple	degC	TC temp. Ambiente 6
15	ch-def	TcMod/ai9	TC	t10	K.thermocouple	degC	Slot termocoppia disponibile
16	ch-def	TcMod/ai10	TC	t11	K.thermocouple	degC	Slot termocoppia disponibile
17	ch-def	TcMod/ai11	TC	t12	J.thermocouple	degC	Slot termocoppia disponibile
18	ch-def	TcMod/ai12	TC	t13	J.thermocouple	degC	Slot termocoppia disponibile
19	ch-def	TcMod/ai13	TC	t14	K.thermocouple	degC	Slot termocoppia disponibile
20	ch-def	TcMod/ai14	TC	t15	K.thermocouple	degC	Slot termocoppia disponibile
21	ch-def	TcMod/ai15	TC	t16	J.thermocouple	degC	Slot termocoppia disponibile
22							

LowFrequency S.voltage K.thermocouple J.thermocouple HighFreque ... + : <

	A	B	C	D	E	F	G
1	%	Physical channel	Type	Virtual name	Scale name	Unit	Note
2							
3	SampleRate	10.000					
4							
5	ch-def	CurrentMod/ai0	Current	I1	S.current	A	Ingresso Analogico Corrente linea 1
6	ch-def	CurrentMod/ai1	Current	I2	S.current	A	Ingresso Analogico Corrente linea 2
7	ch-def	CurrentMod/ai2	Current	I3	S.current	A	Ingresso Analogico Corrente linea 3

LowFrequency S.voltage K.thermocouple J.thermocouple HighFrequency S.current ... <

Figura 5.2: In alto il tab *LowFrequency*, in basso il tab *HighFrequency* dello script per la configurazione degli ingressi analogici della prova.

	A	B
1	%	
2		
3	Linear	
4		
5	m	20
6	q	0
7		

S.voltage

	A	B
1	%	
2		
3	TC	
4		
5	Type	K
6		
7		

K.thermocoup

Figura 5.3: A sinistra il tab di definizione della scala lineare per un ingresso in tensione, a destra il tab che specifica il tipo di termocoppia.

%	line#	Command	Par 1	Par 2
	1	logEvents	enable	
%	2	attesa avvio servizi (DAQ,...)		
	3	wait	2	
%	4	<b>definizione prova</b>		
	5	def.prop	type test	Busbar thermal cycles
	6	def.prop	filename	BusbarThCycles
	7	def.prop	path log	C:\Users\emilio\Desktop\work\log
	8	def.prop	t log	1000
%	9	<b>def sovratemp</b>	Tcontrol name\control	Formula\Teq\UpLim\LoLim
	10	def.prop	Tc1\control	$t1-(t4+t5)/2\85\5\5$
	11	def.prop	Tc2\control	$t2-(t6+t7)/2\88\5\5$
	12	def.prop	Tc3\control	$t3-(t8+t9)/2\80\5\5$
%	13	<b>def temp monitor</b>	TC LFchs names	Tmonitor name\monitor
	14	def.prop	t4	Tamb1\monitor
	15	def.prop	t5	Tamb2\monitor
	16	def.prop	t6	Tamb3\monitor
	17	def.prop	t7	Tamb4\monitor
	18	def.prop	t8	Tamb5\monitor
	19	def.prop	t9	Tamb6\monitor

Figura 5.4: Una parte del tab *Script* del file excel dedicata alla definizione di alcuni dei parametri caratteristici della prova.

- tab *Script* (Figure 5.4 e 5.5): è suddiviso in più sezioni, di seguito illustrate, in cui ciascun comando è implementato dall’omonimo oggetto dell’attore *ExecuteScript*, come si vedrà più avanti.

1. *Definizione prova*: in questa sezione si utilizza il comando “*def.prop*” per definire i parametri relativi al log dati su file, quali il percorso di salvataggio del file, il nome e la frequenza di salvataggio dei dati della prova che, per questa applicazione è di 60 secondi;
2. *Definizione sovratemperature*: richiamando il comando “*def.prop*” si caratterizzano anche le sovratemperature di controllo della prova, ma per questa operazione è necessario seguire una specifica sintassi durante la definizione dei parametri.

Nello specifico, nella colonna *Par1* si deve inserire il nome scelto per la *i*-esima sovratemperatura seguita dalla parola chiave “*control*”. In questo modo si predispose l’applicazione LabVIEW ad acquisire, secondo una sintassi predefinita, il contenuto della colonna adiacente *Pars* in cui sono contenuti, nella forma indicata nell’intestazione di questa sezione della tabella in figura 5.4, i seguenti parametri:

- formula di definizione della sovratemperatura per l'i-esimo punto di misura sull'oggetto in prova, come previsto dalla norma CEI EN 61439-6 con l'espressione 3.1 del capitolo 3.2.3;
- la sovratemperatura di equilibrio dell'i-esimo punto in analisi, registrata dall'operatore alla fine del periodo di stabilizzazione durante la fase preliminare della prova;
- il limite superiore ed inferiore dell'intervallo caratteristico per l'i-esimo punto di misura, come indicato in figura 3.7 nel capitolo 3.2.4.

In questo modo, oltre a realizzare un'applicazione relativamente flessibile a sensibili evoluzioni future della normativa, si da anche la possibilità all'operatore di impostare diversi parametri e limiti relativi alle temperature, a seconda che il punto di misura sull'oggetto in test sia più o meno critico oppure in base ad una specifica richiesta del committente.

3. *Definizione temperature di monitor*: per facilitare la comprensione dei dati sia durante la visualizzazione sulla UI che in fase di analisi del file di log della prova, in questa sezione dello script si associa una nomenclatura più completa in luogo di quella più compatta definita inizialmente nel foglio *LowFrequency* per i segnali di termocoppie dedicati alla rilevazione delle temperature ambiente nei vari punti previsti dalla normativa tecnica. Per come è stato implementato il codice LabVIEW, questa operazione richiede una sintassi del tipo “*Nome segnale TC\monitor*” (Figura 5.4).
4. *Definizione comando* (Figura 5.5): “*busBarThermalCycles*” è il comando dedicato alla prova di cicli termici per i condotti sbarre ed è implementato dall'omonimo oggetto dell'attore *ExecuteScript* che verrà illustrato nel paragrafo successivo. In questa riga dello script, l'operatore inserisce in ciascuna colonna i parametri di caratterizzazione dell'esecuzione ciclica, quali:
  - numero totale di cicli;
  - tempo di verifica per le sovratemperature;
  - tempo dell'eventuale surriscaldamento dell'oggetto in prova;
  - setpoint del valore di corrente di test;
  - limite inferiore dell'intervallo di variazione della corrente;
  - limite superiore dell'intervallo di variazione della corrente;
  - valore di sovratemperatura di soglia per la verifica del corretto riscaldamento dell'oggetto in prova;
  - tempo di verifica di inizio riscaldamento dell'oggetto in prova.

%	line#	Command	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	Par 5	Par 6	Par 7	Par 8
%	20	<b>definizione comando</b>	total cycles	t check (h)	t overheating (h)	test current (A)	Lo Lim (%)	Hi Lim (%)	$\Delta T$ warning (K)	t warning (m)
	21	busBarThermalCycles	84	2	3	32,00	0,00	3,00	10	30
	22	popup	fine script							
	23	endScript								

Figura 5.5: La parte del tab *Script* contenente il comando “*busBarThermalCycles*” per la caratterizzazione dei parametri dell’esecuzione ciclica.

Per i comandi inseriti tramite script è stata anche implementata la funzione di riconoscimento errori in modo segnalare all’operatore l’eventuale anomalia ed il relativo probabile motivo, al fine di evitare un avvio delle operazioni cicliche automatiche con parametri non corretti, fuori scala o con una sintassi errata a causa, ad esempio, di un errore accidentale di digitazione.

Gli oggetti dell’attore *executeScript* sviluppati in questo progetto per l’esecuzione dei comandi fin’ora illustrati saranno analizzati in dettaglio nella prossima sezione.

### 5.3 Descrizione delle operazioni di programmazione e sviluppo dell’applicazione

In questo paragrafo dell’elaborato si passeranno in rassegna le parti di codice LabVIEW™ del progetto più significative nell’ottica di descrivere e motivare le scelte effettuate ed i metodi utilizzati per la programmazione del software di gestione automatica della prova su condotti sbarre.

Per semplificarne la trattazione, si suddivide il lavoro di programmazione nelle seguenti aree di sviluppo:

1. Estrapolazione ed analisi dei parametri dello script per la configurazione degli  $n$  ingressi analogici ed implementazione dei task di acquisizione dati;
2. Estrapolazione ed analisi dei parametri dello script per la caratterizzazione delle sovratemperature dei punti di misura sull’oggetto in prova;
3. Implementazione del comando per la configurazione dell’esecuzione automatica della prova su condotti sbarre seguendo il modello di programmazione della *Macchina a Stati*;
4. Implementazione della logica MARCIA/ARRESTO dell’autotrasformatore e controllo delle correnti mediante la regolazione della tensione;
5. Visualizzazione sulla UI dei principali dati in tempo reale ed analisi del file di log dati.

### 5.3.1 Estrapolazione dallo script dei parametri per la configurazione degli $n$ ingressi analogici ed implementazione dei task di acquisizione dati

Con la pressione del tasto virtuale “*Open*” nella sezione “*script*” della UI, si avvia l’attore *excelReader* che acquisisce i dati inseriti nei vari tab del file Excel memorizzandoli opportunamente nelle sue corrispondenti variabili interne (Figura 5.6).

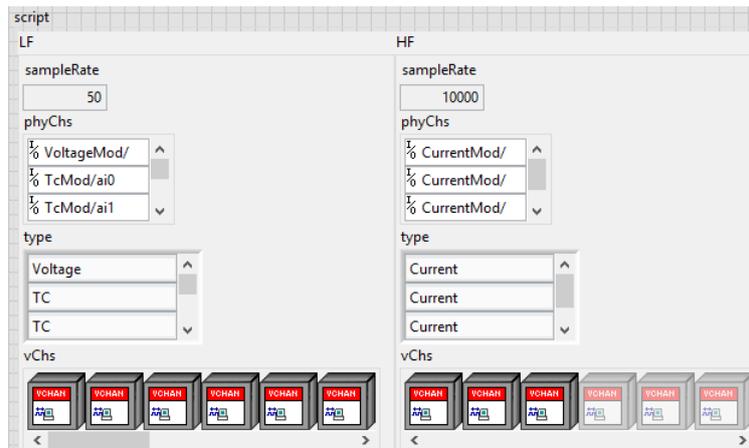


Figura 5.6: Cluster delle variabili interne dell’attore *excelReader* in seguito all’acquisizione dei parametri dal file Excel.

L’attore *excelReader*, dopo aver ricevuto in fase di inizializzazione il layout del file Excel, legge i vari campi e sezioni dello script con delle specifiche logiche ed invia i dati acquisiti agli attori non silenti *script* e *acqPars* che ne mostrano il contenuto nelle omonime sezioni richiamandole dall’albero di selezione, nella parte sinistra della UI.

In questa sezione ci si concentrerà sulle modifiche apportate a questo attore atte ad implementare la configurazione degli ingressi analogici di diverso tipo (termocoppie, tensioni e correnti) in modo dinamico.

I parametri di configurazione degli  $n$  ingressi analogici estratti dai tab Excel *Lowfrequency* e *Highfrequency* non sono inviati direttamente all’attore *DAQ* poiché *excelReader* effettua un passaggio intermedio caricandoli in specifici oggetti dell’attore *vChannel* in modo da rendere più manipolabili gli stessi dati, facilitandone le operazioni di debug durante la fase di sviluppo del codice.

Gli oggetti di *vChannel* sono organizzati secondo lo schema gerarchico mostrato

in figura 5.7, in modo tale che ad ogni livello gerarchico, partendo dall'alto e proseguendo verso il basso, corrisponda un ulteriore grado di specializzazione per la configurazione del generico canale di input analogico.

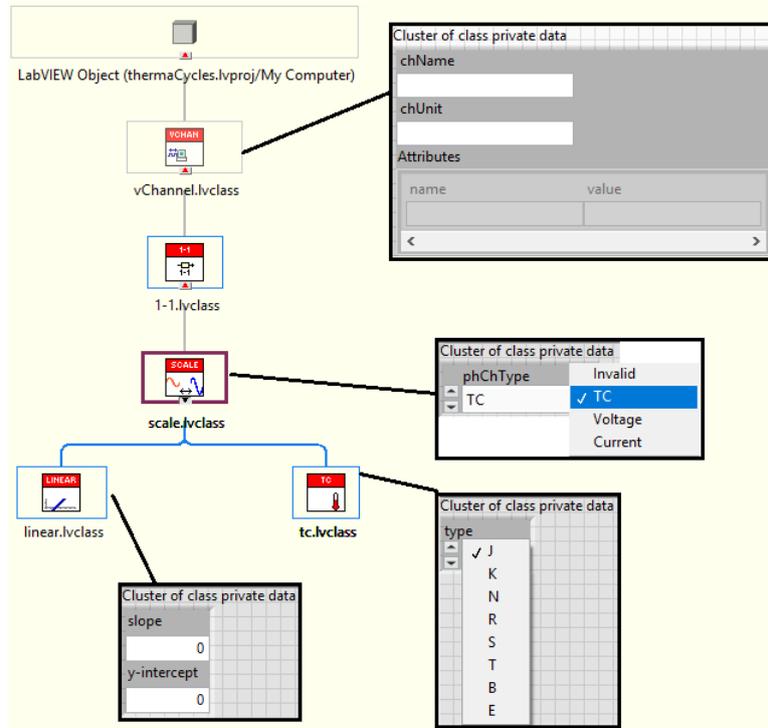


Figura 5.7: Albero gerarchico degli oggetti dell'attore `vChannel`

L'attore `DAQ`, adibito all'acquisizione di segnali analogici, è anch'esso organizzato con una struttura ad oggetti, ciascuno dei quali avente i propri dati e metodi, in modo da poterlo utilizzare in qualsiasi circostanza semplicemente aggiungendo una nuova classe che lo specializzi ad acquisire altri eventuali tipi di segnali.

In particolare, per la prova di cicli termici su condotti sbarre si acquisiscono con una frequenza di campionamento bassa  $n$  termocoppie, eventualmente di diverso tipo, ed  $m$  segnali di corrente in alta frequenza per poterne poi calcolare il valore efficace.

E' stata perciò creata una nuova classe chiamata "`DAQ.AI.multiType`", figlia della generica classe `DAQ`, dove con questo nome si è voluto indicare la principale funzione di creare e gestire un task per l'acquisizione sincrona di segnali multi-tipo quali termocoppie e correnti, con predisposizione anche per i segnali di tensione.

Questi oggetti sono utilizzati anche dall'attore `DAQHF` che implementa invece il processo di acquisizione in alta frequenza dedicato ai segnali di corrente in ingresso

all’oggetto in prova.

Per poter consentire quindi ad entrambi gli attori di richiamare, anche in maniera simultanea, i metodi della classe *DAQ.AI.multiType*, è stata impostata per questi VI un’esecuzione di tipo “*Shared clone reentrant execution*”: in questo modo LabVIEW™ crea un insieme di cloni del VI da condividere con gli attori chiamanti, consentendone quindi l’esecuzione parallela.

Dalla figura 5.8 si può inoltre notare che fanno parte dei dati privati della suddetta classe anche gli oggetti di *vChannels* (hanno la stessa icona della classe in cima all’albero gerarchico di figura 5.7) che, come detto in precedenza, vengono inizializzati dall’attore *excelReader* con i parametri di configurazione degli ingressi analogici durante la fase di lettura del file di script.

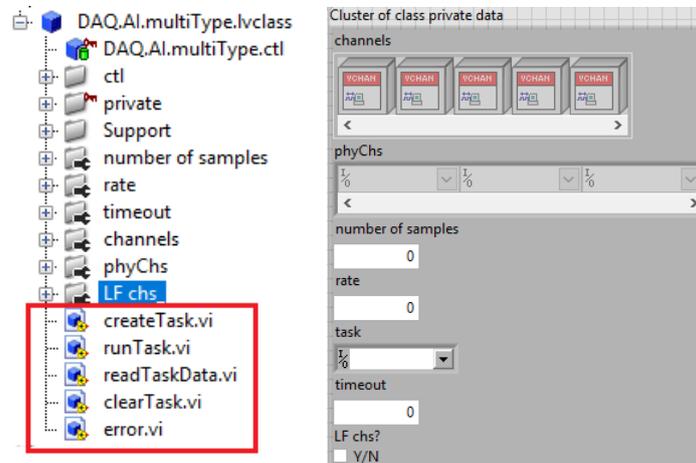


Figura 5.8: A sinistra sono evidenziati i metodi della classe della classe *DAQ.AI.multiType*, “figlia” della classe generica *DAQ*, a destra lo screenshot del file *.ctrl* contenente i dati privati della classe.

In figura 5.8 è riportata la lista dei metodi della classe, ovvero dei VI che ne implementano le funzioni che essa può svolgere, di cui se ne analizza in particolare il “*createTask.vi*” (Figura 5.10) al fine di illustrare com’è stato strutturato il codice LabVIEW™ per consentire la creazione di un processo di acquisizione che supporta diversi tipi di segnali analogici (temperatura, corrente, tensione).

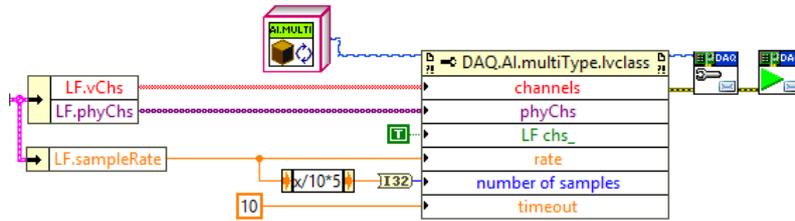


Figura 5.9: Inizializzazione dei dati dell’oggetto *DAQ.AI.multiType* con i corrispondenti parametri estratti dallo script.

Il VI *createTask* riceve dall’attore *Graph* i parametri di configurazione estratti dal file di script (Figura 5.9) e crea i processi generici di acquisizione di bassa ed alta frequenza, rinominandoli in modo diverso per differenziarli tra loro. In seguito, a seconda del parametro contenuto nella colonna “*type*” del file Excel, “*linear*” o “*tc*”, si richiama l’omonima pagina del *case structure* esterno, rispettivamente mostrate nei riquadri (A) e (B).

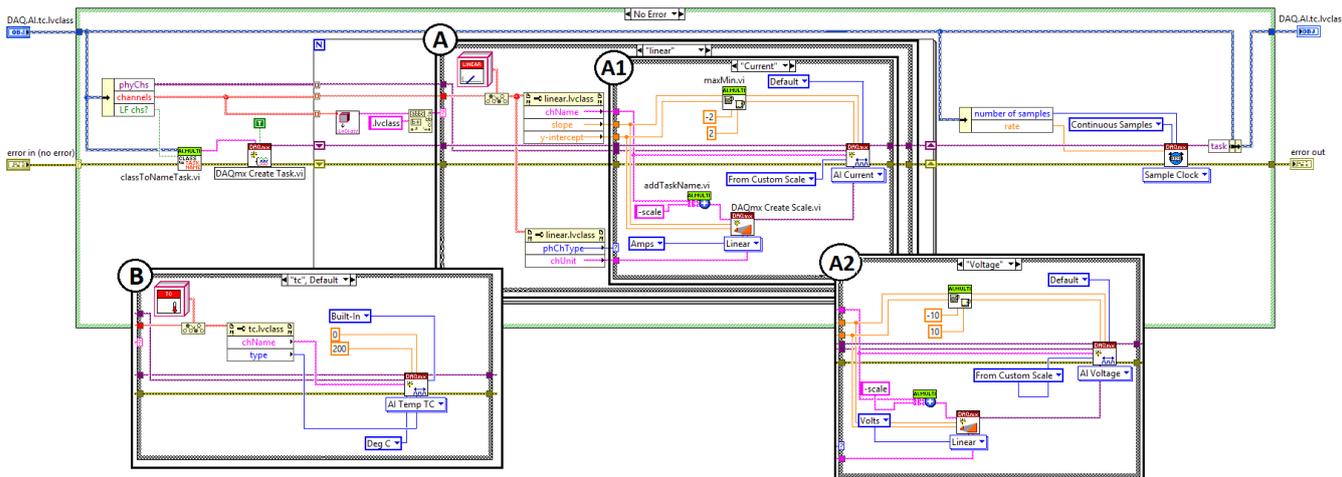


Figura 5.10: Il Vi “*createTask* della classe *DAQ.AI.multiType* in cui sono visualizzate in sovrapposizione anche le altre pagine dei *Case Structure*.

Il caso “*tc*” (riquadro (B) della figura 5.10) è dedicata alla creazione del sub-task di acquisizione di *n* termocoppie in cui, attraverso un ciclo for, si inserisce il tipo di trasduttore in uso per ciascun canale in funzione della configurazione definita dall’operatore nello script. Nel caso “*linear*” è invece presente un’ulteriore suddivisione tra “*current*” (A1) e “*voltage*” (A2) dove, in maniera pressoché analoga, si configurano sia le scale lette dallo script, attraverso le corrispondenti variabili “*slope*” e “*y-intercept*”, sia il tipo

di acquisizione con i relativi valori massimi e minimi.

Gli altri metodi della classe (Figura 5.8) implementano rispettivamente le funzioni di avvio del task, lettura dei dati in ingresso e di arresto dell'attività di acquisizione.

L'avvio dell'acquisizione dati può essere impartito manualmente premendo il tasto virtuale *LF* o *HF* sulla UI al fine di testare che tutto il comparto di acquisizione dati funzioni correttamente prima dell'esecuzione delle operazioni automatiche; tuttavia, si attiva automaticamente in seguito all'esecuzione dello script con la pressione del tasto virtuale *Play* nella sezione *Script* selezionata dall'albero di selezione.

I segnali analogici sono acquisiti sotto forma di vettori unidimensionali di tipo *waveform* e vengono rispettivamente associati alle variabili globali “*daq.unscaled*” e “*daqhf.unscaled*” in modo da poterle richiamare in qualsiasi VI del progetto.

### **5.3.2 Estrapolazione ed analisi dei parametri dello script per la caratterizzazione delle sovratemperature dei singoli punti di misura sull'oggetto in prova**

Nel foglio “*script*” del file Excel si inseriscono, come illustrato nel capitolo 5.2, tutti i parametri che caratterizzano ogni singolo punto di misura sull'oggetto in prova, tra cui anche le formule per la definizione delle sovratemperature di controllo (Figura 5.4-2).

L'oggetto “*cfg*” ha un ruolo di supporto per tutti i comandi figli del generico comando “*cmd.lvclass*” e svolge principalmente la funzione di estrazione dei nomi e delle relative proprietà associate al comando “*def.prop*”.

Per questa applicazione è stato modificato (Figura 5.11) ampliandone le sue funzionalità, in modo da consentire un'estrazione dinamica dal file Excel dei nomi delle sovratemperature di controllo con i relativi attributi.

Per attivare questo meccanismo dinamico di acquisizione dei parametri è necessario che la colonna dedicata alla definizione dei nomi delle sovratemperature sia compilata con una sintassi del tipo “*nome sovratemp.\control*” altrimenti viene generato un errore che segnala all'utente lo specifico comando non corretto.

Nomi ed attributi delle sovratemperature sono estratti e salvati in due variabili vettoriali di tipo *string* (Figura 5.11), prima dell'avvio delle operazioni cicliche della prova, per poi essere prese in carico dal VI riportato in figura 5.12 che si occupa a sua volta di distinguerne i diversi campi di inserimento delle proprietà di ciascun

punto di misura quali formule, sovratemperature di equilibrio e ne calcola i limiti superiori ed inferiori.

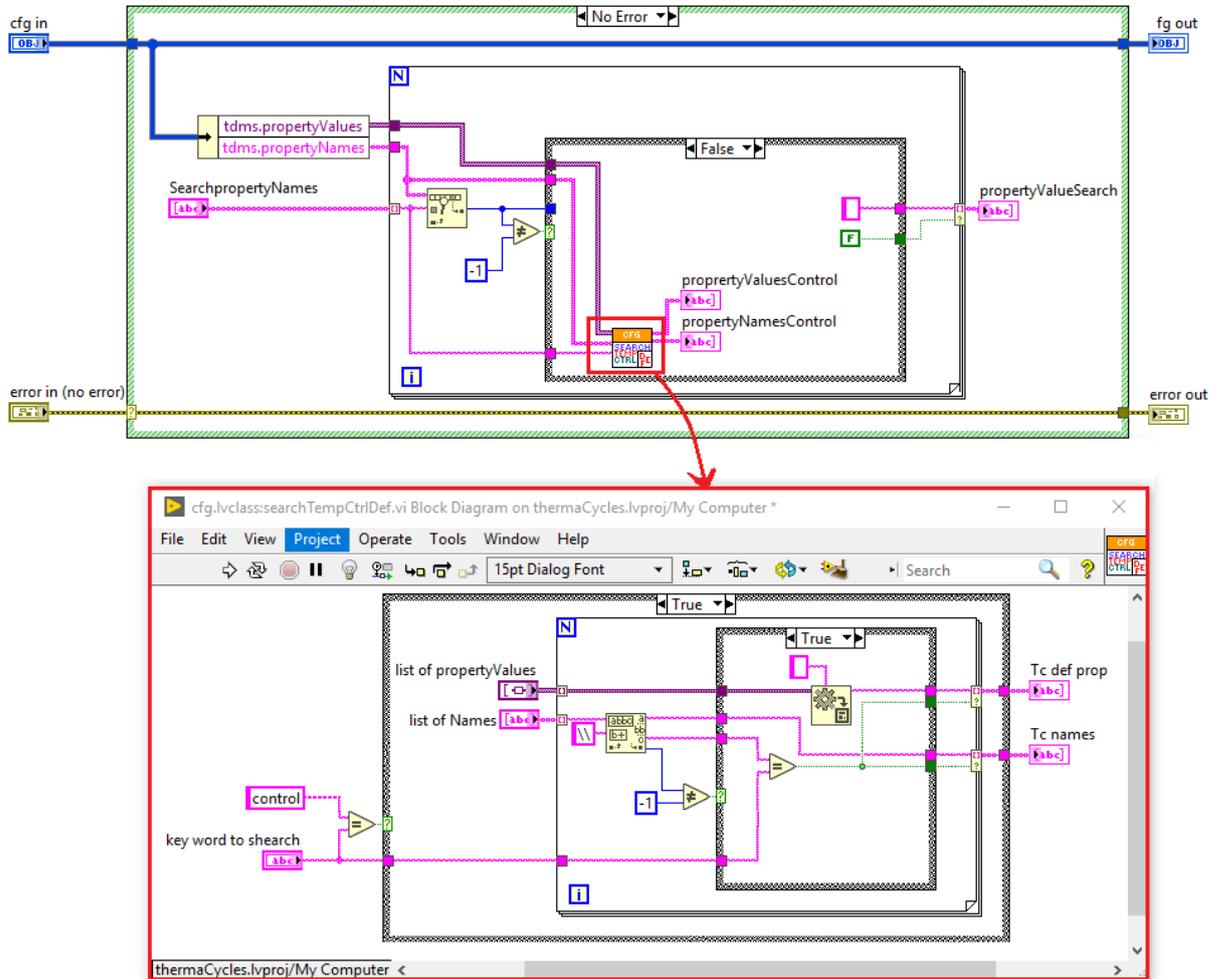


Figura 5.11: In alto il VI “*SearchProperty*” della classe *cfg* per l’analisi del comando “*def.prop*”, in basso il suo subVI “*searchTempCtrlDef*” che esegue l’estrazione dei nomi e degli attributi relativi agli *n* punti di misura.

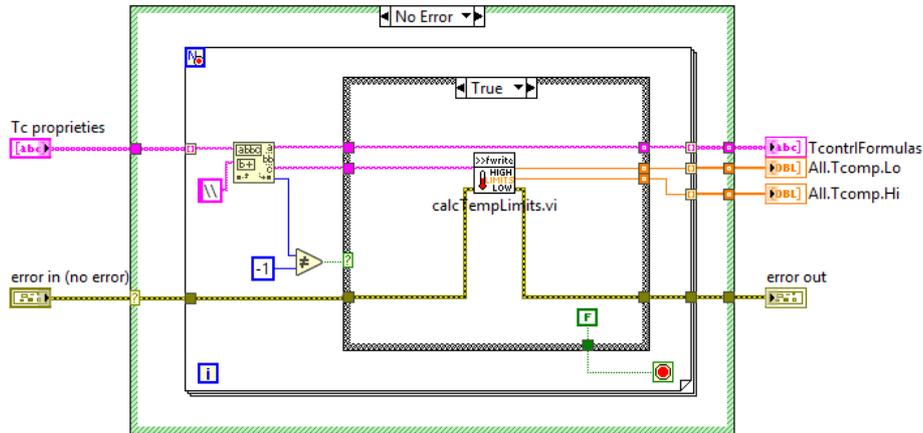


Figura 5.12: Il VI “*extractFormulas&TempAttributes*” individua ed estrapola le singole proprietà di ciascun punto a partire da una variabile di tipo *string*.

In figura 5.13 è riportato invece il codice che implementa la funzione di calcolo delle sovratemperature a partire dalle formule estratte dallo script di configurazione. La variabile globale *daq.unscaled*, che contiene potenzialmente ingressi analogici di vario tipo, viene opportunamente “filtrata” (mediante il VI in figura 5.14) in modo da inviare in ingresso al VI per calcolo delle sovratemperature soltanto i canali di termocoppie.

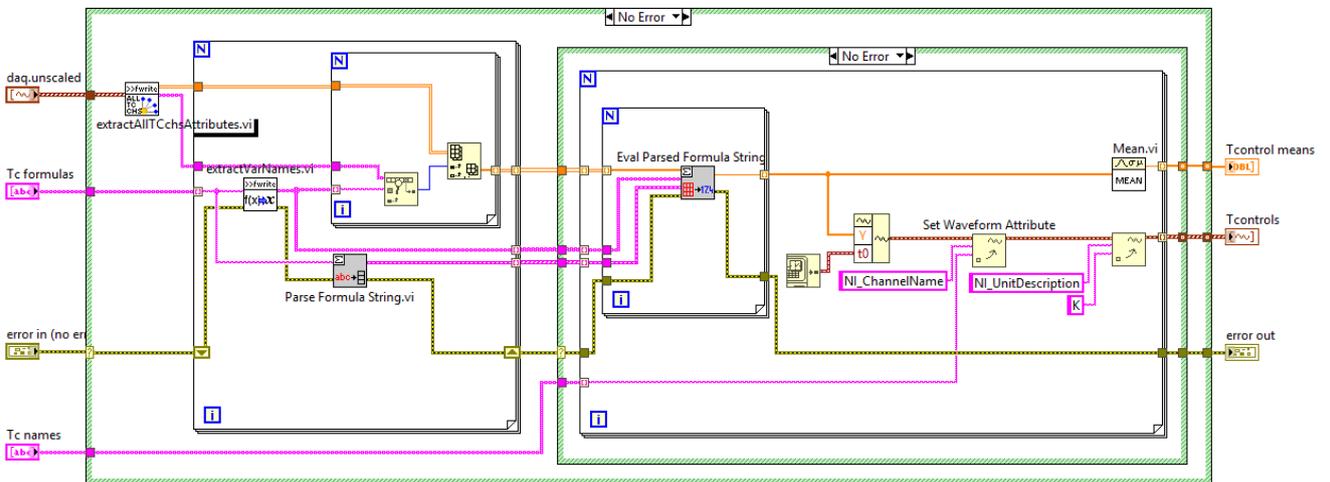


Figura 5.13: Il VI “*calculateTempControls*” che effettua il calcolo delle sovratemperature di controllo.

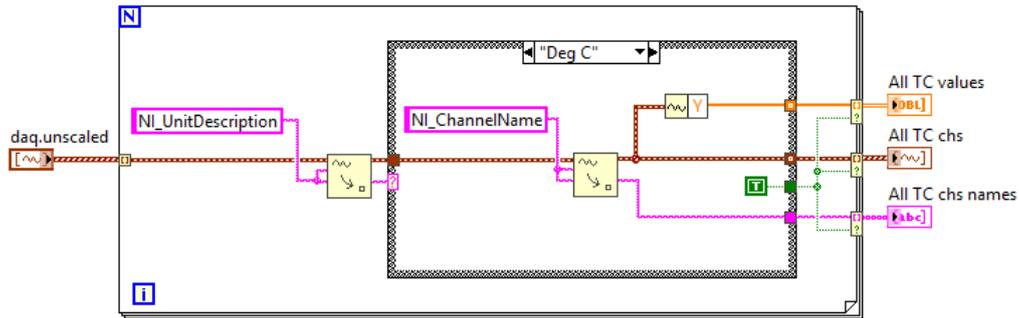


Figura 5.14: Il subVI “*extractAllTCchsAttributes*” per la selezione delle variabili relative ai soli canali di termocoppie.

Per tutte le operazioni fin qui illustrate è in ogni caso prevista una funzione di individuazione e segnalazione di presenza errori che all’occorrenza interrompono l’esecuzione dello script. Nello specifico, questa applicazione software è in grado di rilevare diversi tipi errori per quanto riguarda la sezione dello script di definizione prova, tra i quali:

- sintassi non corretta per la definizione degli attributi dei punti di misura;
- formula non supportata;
- limiti di temperatura inconsistenti;
- variabile definita nella formula non trovata tra i segnali acquisiti in ingresso.

### 5.3.3 Implementazione del comando per la prova su condotti sbarre e programmazione della *Macchina a Stati* per la gestione automatica delle operazioni

Il comando “*busBarThermalCycles*” (Figura 5.5), illustrato nel capitolo 5.2, è specifico per l’esecuzione automatica della prova di cicli termici su condotti sbarre ed è stato implementato creando un nuovo oggetto dell’attore *executeScript* che, analogamente a tutti gli oggetti figli della classe *cmd*, presenta i seguenti due VI principali:

- *str2instr*: acquisisce la riga di comando e converte i parametri nelle corrispondenti variabili LabVIEW; inoltre riconosce un campo vuoto o non coerente della riga di comando generando un errore;
- *exec*: contiene il codice LabVIEW per l’esecuzione delle operazioni associate al determinato comando in cui, per questa applicazione di gestione automatica delle prove su condotti sbarre, è stata implementata la macchina a stati descritta dal *grafo di Moore* in figura 5.15.

Il diagramma di stato riportato in figura 5.15, strutturato sulla base del flow chart di figura 3.7 per la procedura di prova ciclica, è costituito da sette stati distinti più uno di “*error*” nel quale si può giungere da qualsiasi altro stato in seguito al verificarsi di determinate condizioni.

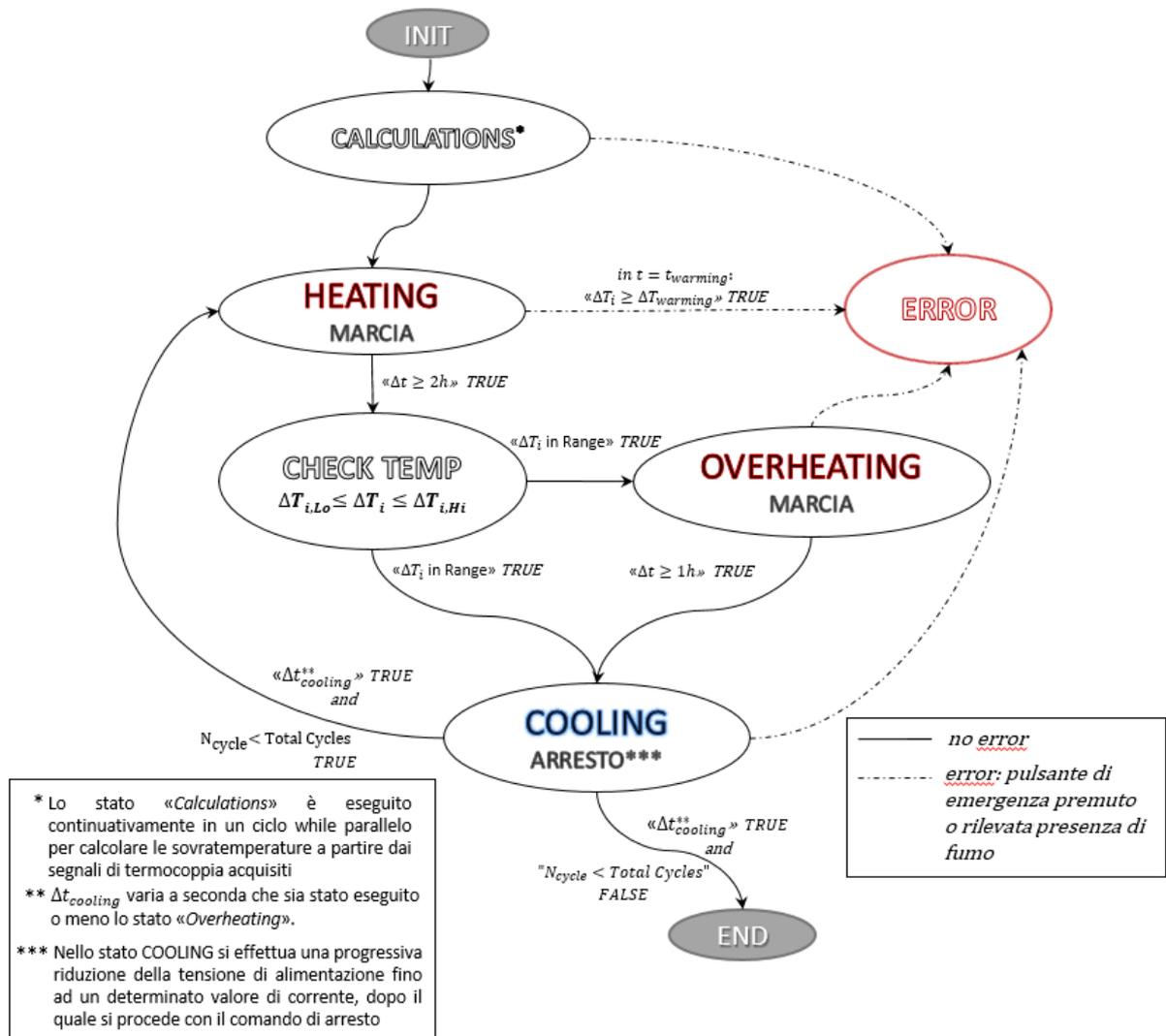


Figura 5.15: Grafo di Moore per l’esecuzione automatica della prova di cicli termici.

Il codice LabVIEW che implementa la macchina a stati (Figura 5.16) è costituito fondamentalmente da un ciclo *while* che racchiude il *case structure* comandato dalla variabile “states” di tipo *typedef*, in cui ciascun caso rappresenta uno stato del diagramma di Moore in figura 5.15.

Come già visto per gli attori, il file *Var.ctrl* contiene le variabili interne del VI, opportunamente inizializzate nello stato “Init” e passate da uno stato all’altro tramite l’uso dello *shift register* per il ciclo while principale.

In questo VI è implementata anche la funzione di log dei dati su file.

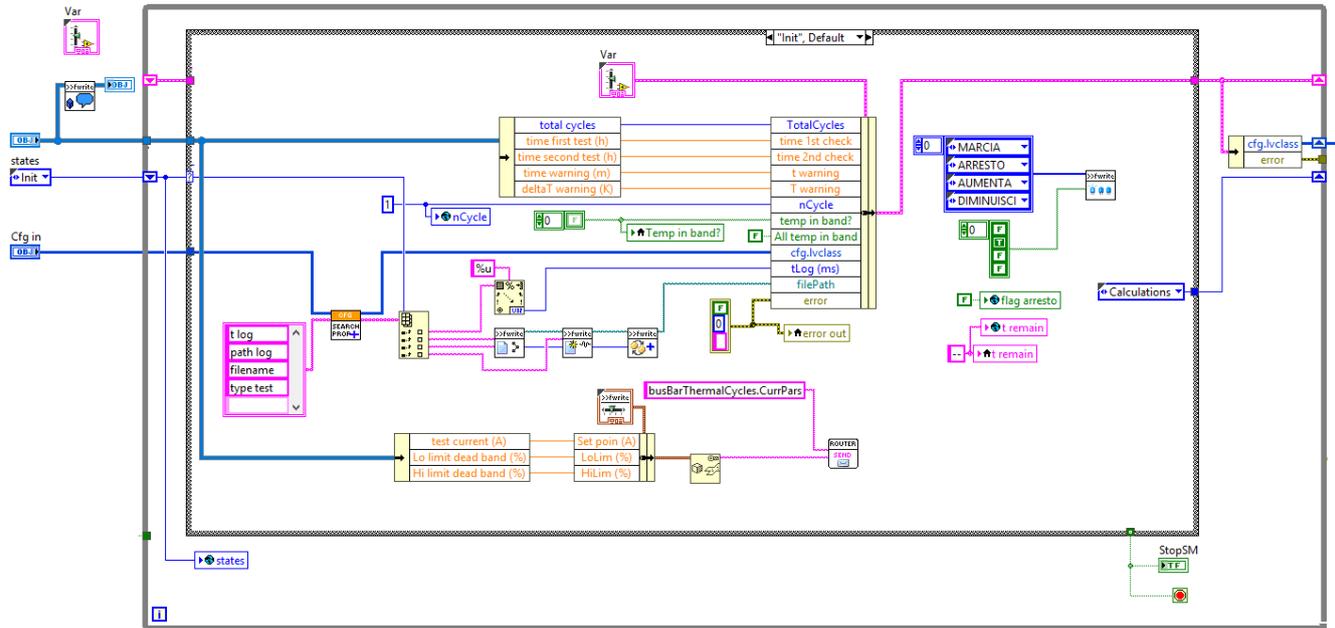


Figura 5.16: Il VI *exec* dell'oggetto *BusbarThermalCycles* per l'implementazione della macchina a stati.

Di seguito si passano in rassegna gli stati del diagramma di figura 5.15, illustrandone le principali caratteristiche e le condizioni di passaggio tra i vari nodi connessi, con riferimento agli screenshot delle corrispondenti parti di codice LabVIEW.

- stato “*Init*” (Figura 5.16): qui si inizializzano le variabili interne del VI con i parametri acquisiti dal comando di script o con dei valori di default, si preconfigura il file di log dati e si inviano i parametri relativi al controllo della corrente (set point e limiti di banda) all'attore *CurrControl*;
- stato “*Calculations*”: contiene i VI descritti nel capitolo 5.3.2 che eseguono l'estrazione dei parametri relativi alla definizione di ciascun punto di misura, quali formule per il calcolo delle sovratemperature, sovratemperature di equilibrio e relativi scostamenti (Figura 5.17).

Le operazioni di calcolo delle sovratemperature, appartenenti sempre allo stato *Calculations*, vengono invece eseguite in maniera continuativa per la durata dell'intera prova in un ciclo while parallelo a quello principale (Figura 5.18), sovrapponendosi quindi all'esecuzione degli altri stati.

In questo stato emergono anche gli eventuali errori di inserimento dei parametri dello script prima citati e si procede passando in “*error*” prima ancora dell'inizio delle lunghe operazioni cicliche della prova.

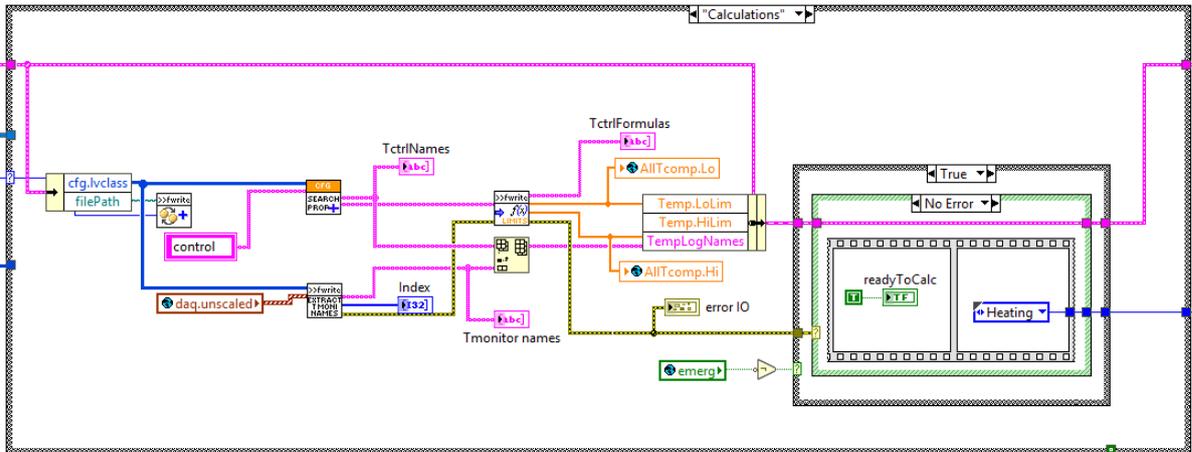


Figura 5.17: La parte del codice di *exec.vi* corrispondente al caso “Calculations”.

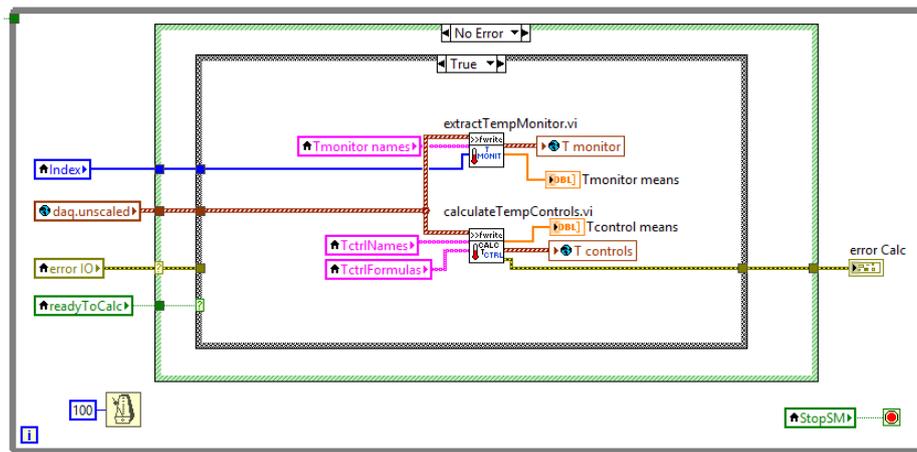


Figura 5.18: Il ciclo while parallelo per il calcolo continuativo delle sovratemperature.

- stato “*Heating*”: in questo stato (Figura 5.19) si attiva il comando di MARCIA tramite l’invio diretto di un messaggio all’attore *DIO*, contenente nome dell’uscita e relativo livello logico: l’oggetto in prova viene alimentato dando così inizio alla fase di riscaldamento.

In questa applicazione è stato previsto anche un controllo dell’effettivo inizio del riscaldamento andando a verificare che dopo un certo intervallo di tempo

preimpostato si misuri almeno un determinato valore di soglia di sovratemperatura.

In assenza di errori, si continua ad eseguire ciclicamente questo stato finché non trascorre il tempo previsto per il check delle sovratemperature, effettuato in “*check Temp*”. Si passa invece allo stato di *error* in seguito alla pressione del pulsante a fungo di emergenza o in seguito al rilevamento di fumo nell’area di prova.

Tutte le temperature del sistema di prova sono registrate su un file di testo, la cui struttura sarà illustrata più avanti, attraverso il subVI “*LogAllTempValues*” con una frequenza preimpostata dall’operatore attraverso il comando “*t log*” dello script.

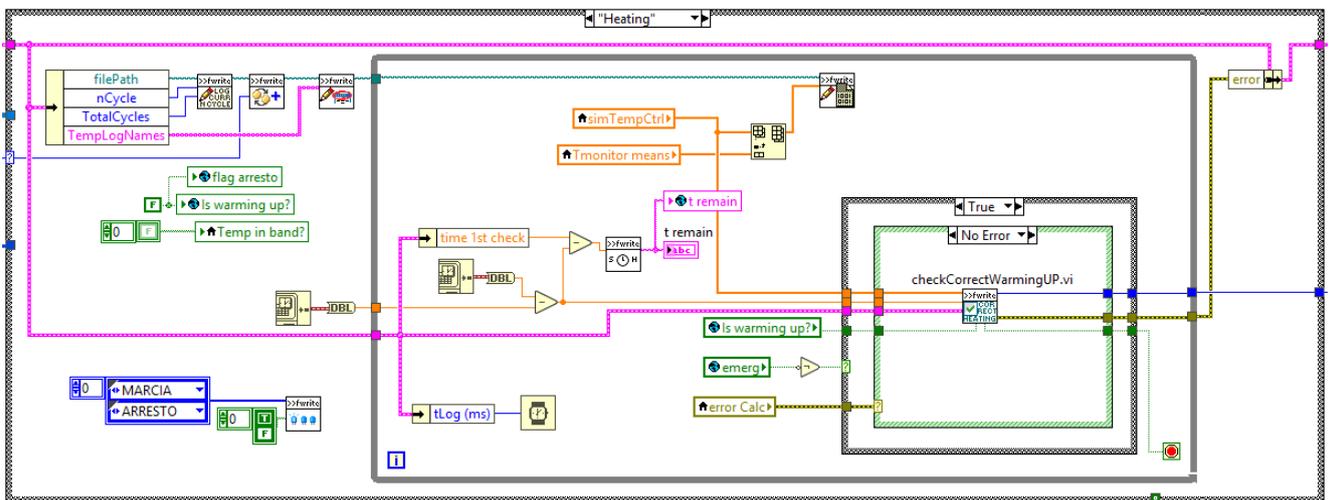


Figura 5.19: La parte del codice di *exec.vi* corrispondente al caso “*Heating*”.

- stato “*Check Temp*”: in questo stato verifica che le temperature siano contenute nella banda di valori indicata per ciascun punto di misura e, a seconda dell’esito del confronto, il sistema passa direttamente alla fase di raffreddamento oppure viene eseguito una ulteriore fase di riscaldamento.

Inoltre, a differenza di quanto previsto dalla normativa, il superamento del limite superiore in fase di confronto delle sovratemperature non attiva nessun segnale di anomalia poiché, in seguito ai ripetuti riscaldamenti e raffreddamenti, si verificano spesso incrementi tollerabili di temperatura che rientrerebbero comunque in banda dopo un certo tempo di assestamento dei materiali.

Tuttavia, un eccessivo riscaldamento durante il periodo di *heating*, che comporterebbe un importante scostamento delle temperature dal profilo termico dell’oggetto in prova, sarebbe comunque individuato dall’operatore nel supervisionare l’esecuzione della prova o, in casi più estremi con principi di incendi, dal sensore di presenza fumo.

- stato “*Overheating*”: viene eseguito ciclicamente fin quando, in modo analogo allo stato *Heating*, si verifica il raggiungimento della condizione temporale prevista.
- stato “*Cooling*”: si procede con il raffreddamento dell’oggetto in prova disalimentando il circuito fino al raggiungimento del tempo previsto che varia a seconda che sia stato effettuato o meno la fase di surriscaldamento (Figura 5.20).

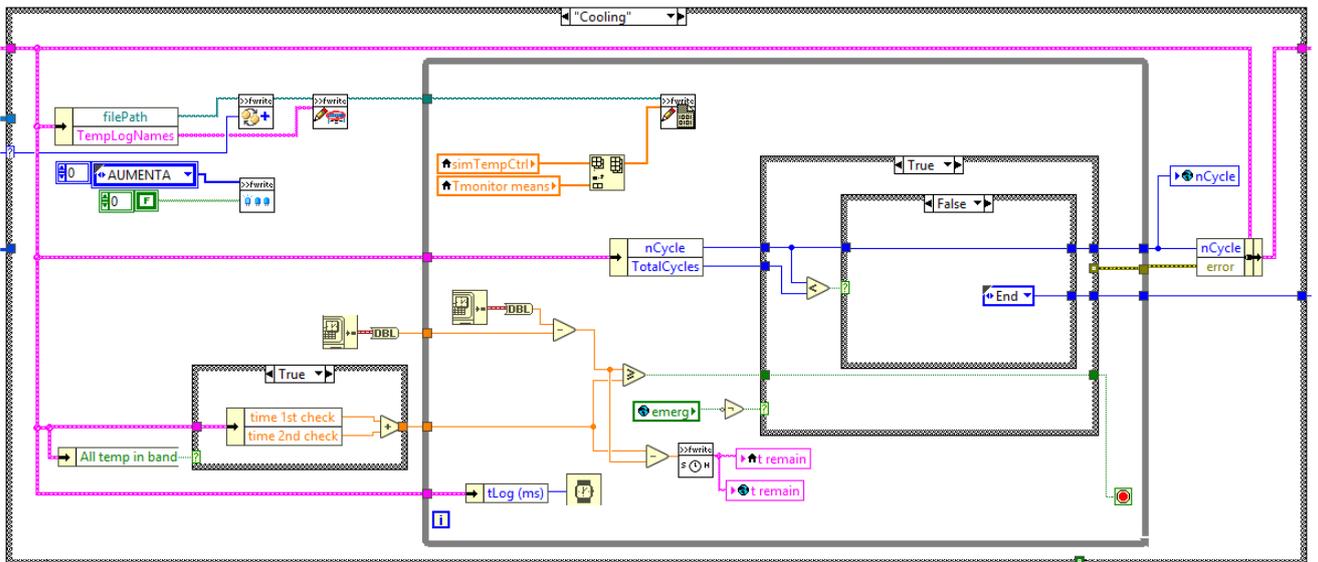


Figura 5.20: La parte del codice di *exec.vi* corrispondente al caso “*Cooling*”.

Per evitare di interrompere l’alimentazione in corrispondenza della piena corrente di prova, provocando l’intervento delle protezioni del sistema a monte nell’istante in cui viene rialimentato il circuito per la successiva fase di “*Heating*”, si procede in un primo momento con il comando DIMINUISCI per poi passare a quello di *ARRESTO* dopo un certo valore di soglia della corrente preimpostato. Queste procedure sono però demandate all’attore *CurrControl* che verrà analizzato in seguito.

Nello stato di raffreddamento si attende quindi il trascorrimento del tempo previsto che in questo caso varia a seconda che sia stato effettuato o meno il surriscaldamento e dopodiché si effettua la verifica del numero di cicli effettuati: se si è raggiunto il numero totale di cicli previsto il sistema passa allo stato di “*End*”, viceversa incrementa di un’unità il contatore e si riporta nello stato di riscaldamento per dare inizio ad un nuovo ciclo.

Come per gli stati di *Heating* ed *Overheating* si innesca lo stato di errore tramite la pressione del pulsante di emergenza o con l’attivazione dei sensori di fumo.

- stati “*End*” ed “*Error*”: determinano il termine dell’esecuzione dello script, in cui si manda il segnale *ARRESTO TRUE* in uscita.

Nello stato di errore si registra sul file di log dati il messaggio ed il relativo codice dell’anomalia verificatasi.

E’ inoltre possibile, ma non consigliato, terminare l’esecuzione dello script in qualsiasi momento premendo il tasto virtuale di stop sulla UI avviando così la procedura di interruzione.

### 5.3.4 Implementazione della logica MARCIA/ARRESTO dell'autotrasformatore e controllo delle correnti mediante la regolazione della tensione

L'attore “*CurrControl*”, a seconda della specifica fase della procedura di prova in cui ci si trova, svolge le funzioni di:

- controllo delle correnti in ingresso durante le fasi di riscaldamento, in cui l'oggetto in prova è alimentato, mediante la regolazione della tensione con i comandi “*AUMENTA*” e “*DIMINUISCI*” dell'autotrasformatore (Figura 5.1);
- riduzione graduale della tensione di alimentazione fino alla disalimentazione totale, con il comando “*ARRESTO*” dell'autotrasformatore, dopo un determinato valore di corrente di soglia, durante le fasi di raffreddamento.

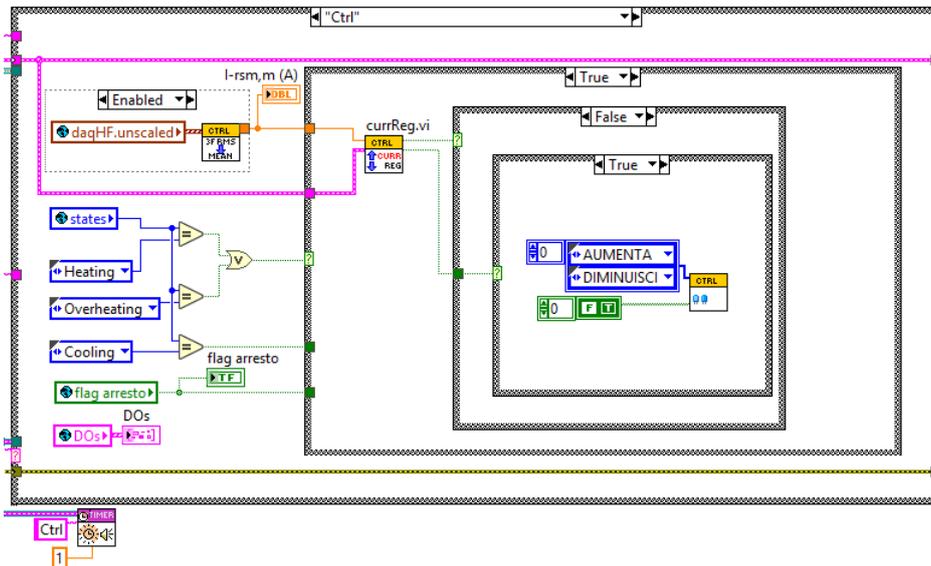


Figura 5.21: Una parte del codice LabVIEW™ dell'attore *CurrControl*

L'obiettivo del controllo è quello di tenere il valore delle correnti all'interno di una determinata banda di tolleranza. Infatti, durante le fasi di riscaldamento, l'aumento della temperatura dei materiali conduttori comporta un incremento della loro resistenza elettrica provocando di conseguenza una corrispondente riduzione della corrente di prova. In questo caso, per ripristinare lo scostamento tra la grandezza controllata ed il valore di riferimento preimpostato, l'applicazione invia il comando di incrementare il numero di spire del circuito secondario dell'autotrasformatore, aumentando di fatto la tensione di alimentazione per compensare la riduzione della

corrente di test.

L'autotrasformatore utilizzato in questa applicazione non è però dotato di un sistema di regolazione di tensione indipendente per le tre fasi quindi il controllo è effettuato sul valore efficace medio della terna di correnti.

Nelle fasi di raffreddamento, invece, si opera una progressiva riduzione della corrente con il comando “*DIMINUISCI*” (Figura 5.22) dell'autotrasformatore per evitare un'interruzione brusca del circuito quando in esso fluisce la piena corrente di test (può essere di valore più o meno elevato a seconda del tipo di condotto sbarra in esame) e di fatto predisponendo il sistema alla successiva fase di alimentazione, posizionando sullo “*zero*” il sistema di regolazione del numero di spire dell'avvolgimento secondario, per evitare un possibile intervento delle protezioni a monte in corrispondenza della successiva rialimentazione del circuito. In questo modo, all'inizio della fase di riscaldamento, il comando di “*MARCIA*” viene sempre eseguito in corrispondenza di un livello di tensione minimo, quasi nullo, che man mano verrà progressivamente incrementato, gestito dal codice LabVIEW previsto per le fasi di *Heating*, fino al raggiungimento del valore di riferimento di corrente impostato nello script di comando.

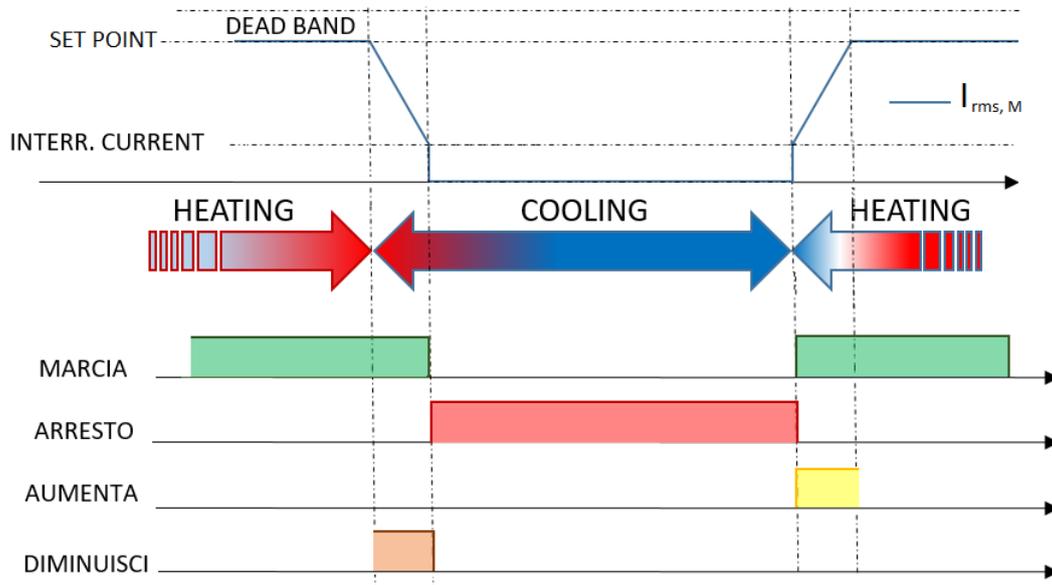


Figura 5.22: Rappresentazione degli andamenti temporali dei segnali di comando durante la transizione tra le fasi di *Heating* e *Cooling*.

In fase di debug del software, per verificare il corretto funzionamento della logica di controllo delle correnti, è stato utilizzato un VI che emulasse l'andamento delle

correnti di prova in seguito all’azione del sistema di regolazione dell’autotrasformatore ed ai relativi comandi impartitagli.

### 5.3.5 Visualizzazione sulla UI dei principali dati in tempo reale ed analisi del file di log dati

Il framework prevedeva già degli attori “non silenti” che implementano la UI, tra cui:

- *acqPars*: visualizza nell’omonima pagina dell’albero di selezione la configurazione attualmente in uso degli ingressi analogici;
- *script*: visualizza l’elenco di tutti i comandi da eseguire estratti dal corrispondente foglio del file Excel;
- *toolbar*: consente la visualizzazione sempre in primo piano di alcuni principali segnali acquisiti o di parametri elaborati;
- *lfTable* e *graph*: consentono la visualizzazione degli andamenti temporali dei segnali acquisiti in ingresso rispettivamente con il processo di bassa ed alta frequenza.

Di seguito si illustra come questi siano stati opportunamente modificati ed affiancati con nuovi attori al fine di realizzare un’interfaccia grafica dedicata all’applicazione per la gestione automatica della prova di cicli termici su condotti sbarre.

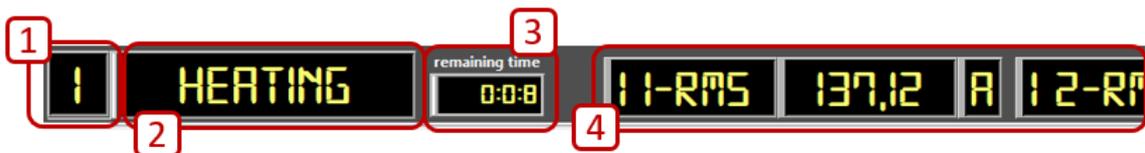


Figura 5.23: Una parte della UI, gestita dall’attore *toolbar* per la visualizzazione in primo piano dei principali parametri della prova.

In figura 5.23 è riportato un ingrandimento della parte alta della UI, mostrata per intero in figura 4.7, che è gestita dall’attore *toolbar* e che resta sempre in primo piano durante l’esecuzione dell’applicazione consentendo la visualizzazione in primo piano dei seguenti dati della prova:

1. numero di cicli eseguiti;

2. fase dell'*i*-esimo ciclo attualmente in esecuzione;
3. tempo restante all'esecuzione della fase successiva;
4. valori efficaci della terna di correnti in ingresso all'oggetto in prova.

La funzione di visualizzazione degli andamenti temporali delle sovratemperature nei vari punti dell'oggetto in test, calcolate come già illustrato precedentemente, dei rispettivi limiti (Figura 5.24-2) e delle temperature di monitoraggio della prova (Figura 5.24-1), è stata invece demandata al nuovo attore *TControlTable*.

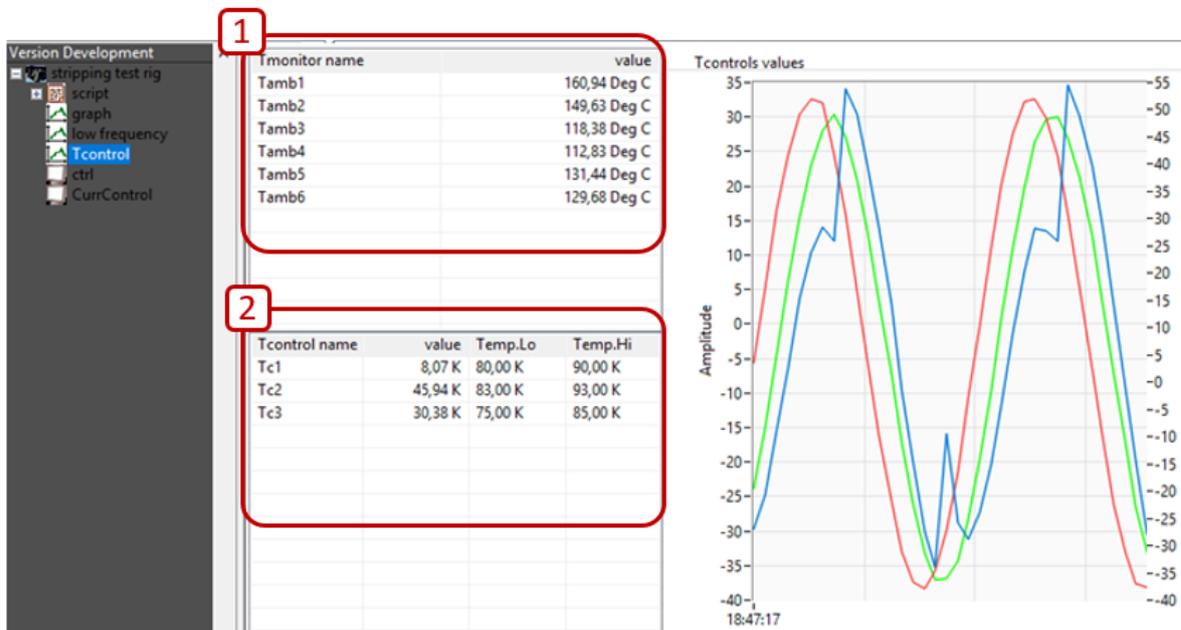


Figura 5.24: La sezione *Tcontrol* della UI per la visualizzazione delle temperature.

Gli andamenti riportati nello screenshot di figura 5.24 sono però quelli generati da NI MAX per la simulazione del dispositivo cDAQ con le sue schede virtuali di ingressi analogici.

L'attore *CurrControl*, che si occupa del controllo della corrente durante le fasi di riscaldamento e della logica di disalimentazione nella fase di raffreddamento come descritto nel capitolo 5.3.4, consente anche la visualizzazione dei seguenti parametri (Figura 5.25), con una frequenza di aggiornamento di 1 secondo:

1. valore di riferimento della corrente, limiti inferiore e superiore della banda di tolleranza, acquisiti da script di comando;

2. valore efficace medio attuale delle tre correnti acquisite in ingresso;
3. valore di soglia oltre il quale il sistema opera la disalimentazione totale dopo una prima fase di decremento graduale della corrente, nello stato *Cooling*;
4. elenco dello stato dei segnali digitali di comando.

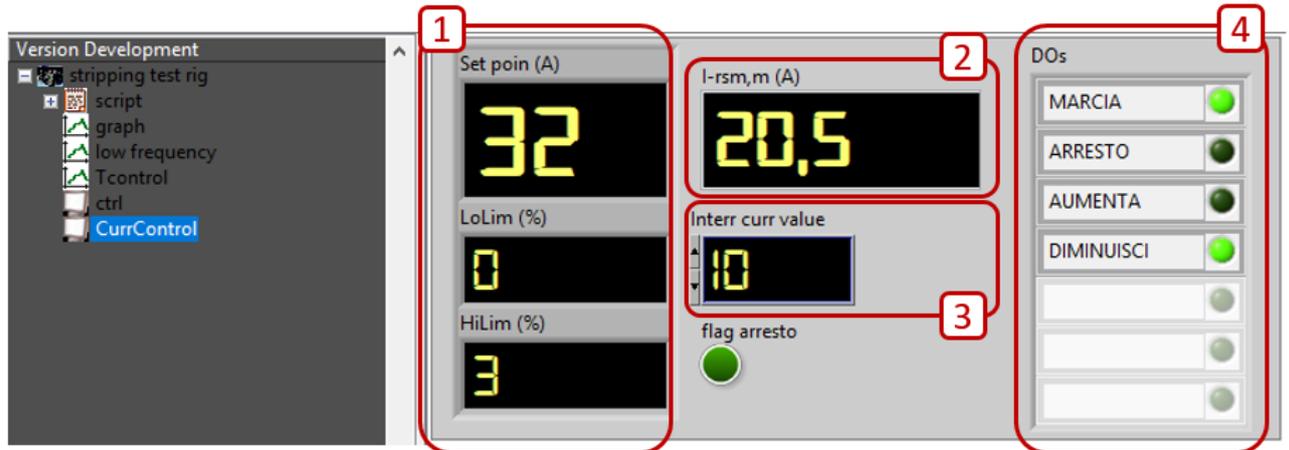


Figura 5.25: La sezione *CurrControl* della UI per la visualizzazione degli aspetti relativi al controllo della corrente.

Durante l'esecuzione dell'applicazione si tiene traccia della successione dei vari stati del programma di gestione automatica e di tutti i principali segnali acquisiti ed elaborati durante prova salvandoli in un file in formato testuale, con un intervallo di aggiornamento preimpostato da script.

Il file di log riportato in figura 5.26 non contiene però i risultati sperimentali di una prova, bensì valori in parte generati casualmente dal sistema di simulazione degli ingressi analogici (temperature ambiente) ed in parte generati dal VI che emula il comportamento termico dei materiali in seguito al riscaldamento e raffreddamento dell'oggetto in prova, al fine di testare il corretto funzionamento dell'applicazione software implementata.

Questo file, creato nella cartella indicata dal percorso inserito nello script di comando, viene di volta in volta sovrascritto con le ultime informazioni aggiornate: in questo modo, anche in presenza di un guasto elettrico che comporta un'interruzione dell'alimentazione non vi è la perdita dei dati poiché l'ultima operazione, eseguita dall'applicazione un istante prima dell'eventuale blackout, è stata comunque già salvata nel file di log.

```

Busbar the test started on 2020/06/22 at 13:14:10
Init state executed at: 2020/06/22 at 13:14:10
Calculations state executed at: 2020/06/22 at 13:14:10

Cycle n. 1 of 3 started on: 2020/06/22 at 13:14:10

Heating state executed at: 2020/06/22 at 13:14:10

```

time	Tc1	Tc2	Tc3	Tamb1	Tamb2	Tamb3	Tamb4	Tamb5
13:14:10	0	0	0	204,66	181,3	164,5	218,91	187
13:14:11	4,5	4,6	4,7	211,5	183,91	161,54	215,74	183,1
13:14:12	9	9,2	9,4	210,84	181,51	155,99	205,02	175
13:14:13	13,5	13,8	14,1	204,72	175,08	148,03	188,78	162,71
13:14:14	18	18,4	18,8	192,13	164,24	138,4	168,71	148,02
13:14:15	22,5	23	23,5	176,74	153,58	127,65	146,14	134,88
13:14:16	27	27,6	28,2	162,76	144,72	119,84	125,66	126,34
13:14:17	31,5	32,2	32,9	160,96	149,97	117,99	113,15	131,92
13:14:18	36	36,8	37,6	143,56	138,61	133,98	118,34	123,28
13:14:19	40,5	41,4	42,3	118,5	120,67	125,8	102,83	110,83
13:14:20	45	46	47	101,08	108,88	117,48	92,4	103,36
13:14:21	49,5	50,6	51,7	91,69	103,09	114,91	90	103,3
13:14:22	54	55,2	56,4	90,41	104,17	117,56	96,46	111,15
13:14:23	58,5	59,8	61,1	98,71	112,57	124,77	111,32	124,39
13:14:24	63	64,4	65,8	115,42	126,69	136,36	134,04	143,24
13:14:25	67,5	69	70,5	138,12	146,33	151,49	160,81	164,79

```

Check Temp state executed at: 2020/06/22 at 13:14:26
Overheating state executed at: 2020/06/22 at 13:14:26

```

time	Tc1	Tc2	Tc3	Tamb1	Tamb2	Tamb3	Tamb4	Tamb5
13:14:26	72	73,6	75,2	166,18	168,42	168,3	190,97	187,51
13:14:27	76,5	78,2	79,9	176,56	171,81	184,55	219,84	190,39
13:14:28	81	82,8	84,6	181,62	170,49	175,36	220,01	185,79
13:14:29	85,5	87,4	89,3	193,32	175,78	167,33	218,93	187,09

```

Cooling state executed at: 2020/06/22 at 13:14:30

```

time	Tc1	Tc2	Tc3	Tamb1	Tamb2	Tamb3	Tamb4	Tamb5
13:14:30	90	92	94	205,1	181,32	164,48	219,52	187
13:14:31	85,5	87,4	89,3	210,88	183,81	161,6	215,24	182,97
13:14:32	81	82,8	84,6	210,26	181,18	155,87	205,65	174,78
13:14:33	76,5	78,2	79,9	204,6	174,39	147,95	189,32	163,12

Figura 5.26: Una parte del file di log generato durante l'esecuzione della prova.

Come si osserva dalla figura 5.26, nel file di log sono scritte non solo tutte le operazioni eseguite durante l'esecuzione automatica dell'applicazione ma anche la corrispondente data ed ora in cui sono occorsi per consentire all'operatore di effettuare un'analisi post-prova più dettagliata, dato che questa può protrarsi per diverse settimane.

## Capitolo 6

# Conclusioni finali e sviluppi futuri

Durante lo sviluppo dell'applicazione, ogni nuova parte del codice LabVIEW™ implementato è stata dapprima provata singolarmente nelle sue funzionalità per poi verificarne l'effettiva compatibilità con i protocolli di comunicazione dell'intero framework, una volta inserita al suo interno.

Dopo aver verificato il corretto funzionamento delle operazioni di lettura ed acquisizione dello script di comando, per poter testare l'intero processo automatico di prova, è stato inoltre necessario realizzare delle applicazioni che emulassero il comportamento fisico del sistema, sia per quanto riguarda gli andamenti delle temperature dell'oggetto in prova durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento, sia per quanto riguarda le variazioni della corrente di test in seguito ai comandi per la regolazione della tensione, impartiti all'autotrasformatore di alimentazione.

L'applicazione per la gestione automatica delle prove di cicli termici su condotti sbarre, realizzata in questo lavoro di tesi e fin qui analizzata, risulta quindi funzionare in maniera corretta dal punto di vista software, secondo quanto previsto e descritto nei precedenti capitoli di questo elaborato.

In particolare, durante la fase di collaudo del software LabVIEW™ si è testato:

- la funzione di acquisizione e visualizzazione sulla UI delle varie sezioni dello script di comando;
- il processo di acquisizione dei segnali analogici in bassa ed alta frequenza, secondo le modalità configurate con lo script di comando;
- la funzione di riconoscimento di inserimento non corretto dei parametri dello script in seguito ad una sintassi errata oppure a valori incoerenti o fuori scala;
- la logica di gestione automatica della prova di cicli termici nelle diverse condizioni di riscaldamento dell'oggetto in test, compreso in corrispondenza di un'anomalia durante la fase di riscaldamento;

- la logica di controllo della corrente di test nelle fasi di riscaldamento e di gestione della disalimentazione graduale, durante le fasi di raffreddamento;

L'applicazione è quindi pronta per essere sottoposta alla fase di “collaudo sul campo”, collegando gli ingressi analogici fisici e realizzando il circuito di adattamento tra la scheda di output digitali ed il circuito di comando dell'autotrasformatore Hipotronics, per poter poi effettuare una prova reale su un condotto sbarre.

Uno sviluppo futuro di questo progetto sarebbe quello di ampliarlo, continuando a sfruttare le potenzialità di modularità di questo framework LabVIEW™, implementando nuovi comandi dedicati alle prove di cicli termici su altri dispositivi elettrici, ad esempio iniziando con la gestione automatica della procedura di prova analizzata nel capitolo 3.3 per connettori meccanici e a compressione.

Tuttavia, sarebbe anche interessante realizzare una versione real time di questa applicazione software, utilizzando il Compact DAQ 9137 RT sul quale verrebbero caricati gli attori silenti per la gestione automatica della procedura di prova che si interfaccerebbero con quelli presenti sul PC, dedicati invece alla UI. Questa configurazione consentirebbe quindi di sfruttare la stessa postazione di controllo utilizzata per le prove di sovratemperatura, al piano terra del laboratorio, nel quale sono presenti la postazione PC ed il quadro di controllo principale che sarebbero connesse con un quadro secondario ubicato invece nei pressi dell'area di prova dedicata ai cicli termici, al piano seminterrato del LATFC, e dotato tra le altre cose di terminaliera per gli ingressi analogici da acquisire.

# Bibliografia

- [1] INRIM, Servizi di metrologia, Alte Tensioni e Forti Correnti  
<https://www.inrim.it/servizi/servizi-di-metrologia/elettricit -e-magnetismo/alte-tensioni-e-forti-correnti>.
- [2] ANIE Energia, Aprile 2018, *Guida Tecnica Condotti Sbarre - Scelta, prescrizioni, utilizzo*
- [3] CEI EN 50191 (edizione del 2001-09), *Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova*
- [4] CEI EN 61439-6 (edizione del 2013-07), *Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT) - Parte 6: Condotti sbarre*
- [5] CEI EN 61328-1 (edizione del 2004-05), *Connettori a compressione e meccanici per cavi di energia per tensioni nominali fino a 36kV - Parte: prescrizioni e metodi di prova*
- [6] National Instrument Corporation, 1993-2006, *LabVIEW™ Basics I Introduction Course Manual*

# Ringraziamenti

*A margine di questo elaborato, colgo l'occasione per ringraziare tutti coloro che nel loro piccolo hanno contribuito ad aiutarmi in questo mio percorso di studi.*

*Innanzitutto, ringrazio il professor Gianfranco Chicco per avermi segnalato l'opportunità di svolgere il mio lavoro di tesi al di fuori della "bolla" del Politecnico ed in particolar modo l'ing. Paolo Emilio Roccato per avermi guidato in questo percorso finale, facendomi pregustare un'anteprima di quello che sarà il mondo del lavoro che a breve dovrò affrontare e soprattutto per avermi permesso di lavorare a questo progetto sotto la attenta supervisione del suo caro amico Paolo Squillari, che ringrazio per il tanto tempo dedicatomi, anche da remoto, nonostante l'ultimo difficile periodo che noi tutti abbiamo attraversato.*

*E' stata comunque un'esperienza particolarmente formativa per me, soprattutto dal punto di vista tecnico-professionale e sono molto soddisfatto di quanto ho appreso in questi mesi nonostante avrei tanto voluto effettuare l'ultimo collaudo "sul campo" dell'applicazione che ho sviluppato.*

*I miei ringraziamenti più importanti vanno però ai miei genitori Rosaria e Nino ed a mio fratello Fabrizio che mi hanno supportato e sopportato moralmente ed economicamente nonostante questo percorso era del tutto inedito per la mia famiglia. Ringrazio la mia cara nonna Giovannina, a cui dedico questo elaborato, per avermi sostenuto, come sempre, come una seconda madre e per aver alleviato la mia nostalgia dei sapori tipici della Puglia e mio zio Lino per aver indotto in me, sin dai tempi della scuola superiore, la passione per il mondo dell'elettrotecnica e degli impianti elettrici.*

*Vorrei salutare e ringraziare anche i miei coinquilini Angelo ed Andrea che sono stati e saranno i miei punti di riferimento in questi anni di permanenza a Torino.*

*Ringrazio infine tutti i miei amici e colleghi che, pur se in fasi diverse della mia carriera universitaria ed ognuno a proprio modo, mi hanno comunque dato l'energia e la carica per affrontare gli ostacoli di un percorso molto impegnativo.*