

# LA SINTONIZZAZIONE PRATICA DEL REGOLATORE PID



*A cura di Alessandro Brunelli (\*)*

## Sommario

1. Premessa
2. L'algoritmo PID
3. Prestazioni dell'algoritmo PID
4. Sintonizzazione dei regolatori PID
5. Libere Dissertazioni dell'Autore

L'articolo descrive il metodo di sintonizzazione del regolatore PID basato su una procedura mnemonica definita "Nino\_Nano ... Ninetto\_Nanetto". Dopo aver introdotto il PID e i suoi vantaggi nell'industria di processo, l'autore illustra criteri teorici e sperimentali per regolarne le azioni. Il metodo proposto semplifica la configurazione sfruttando guadagno e tempo critici per garantire stabilità, prontezza e precisione.

## 1. Premessa

Nell'ambito del controllo e regolazione industriale, progettare e gestire un intero impianto può essere un'impresa veramente ardua se non si utilizzano metodi e strumenti opportuni:

Basti pensare che un generico impianto industriale comprende numerosi anelli di controllo, spesso interagenti fra loro e voler progettare ogni sistema con le convenzionali tecniche dei diagrammi di Bode, di Nyquist o di Nichols richiederebbe troppo tempo e sarebbe assai problematico tenere conto delle inevitabili variazioni della dinamica del processo al variare del carico in esercizio.

Si devono pertanto adottare metodi di progettazione rapidi, che forniscano comunque prestazioni soddisfacenti, anche se non ottimali, perché quello che conta nell'ambito industriale non è comunque l'ottimo, ma il miglior compromesso costi/benefici.

In questa ottica, un progetto richiede quindi tempi di pianificazione contenuti, metodi di progetto efficienti e di rapida applicazione, realizzazione di controllori semplici e in tale contesto si inserisce il regolatore PID che, con le sue numerose varianti, gestisce la stragrande maggioranza degli anelli di regolazione presenti nell'industria di processo.

Nella progettazione di un impianto vi sono diversi motivi che portano il progettista ad evitare di realizzare regolatori su misura troppo complessi (sebbene lo consentano le attuali tecniche di controllo a DCS e PLC) e ad orientarsi verso sistemi che implementano i classici regolatori PID, che sono generalmente adatti al controllo dei processi caratterizzati da fenomeni del primo e secondo ordine caratterizzati anche da rilevanti tempi morti.

Pertanto verrà nel seguito descritto l'algoritmo di regolazione PID:

- P: Proporzionale
- I : Integrale
- D: Derivativo

che nelle sue numerose varianti, gestisce oltre il 95% degli anelli di regolazione presenti negli impianti di processo industriale.

I motivi del suo successo risiedono in:

- considerevole efficacia nella regolazione di un'ampia gamma di processi industriali, in relazione alle specifiche assegnate;
- relativa semplicità di sintonizzazione,

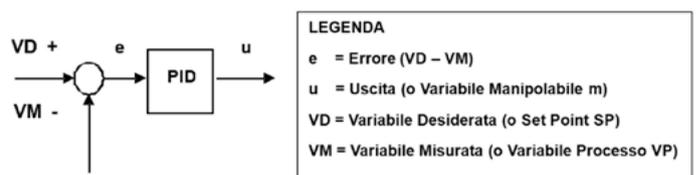
rapportata alle capacità degli utenti e alla difficoltà delle specifiche di controllo;

- importanza e convenienza economica della standardizzazione, in termini di riduzione dei costi di progetto, implementazione e manutenzione;
- inutilità nel cercare leggi di controllo più sofisticate dal momento che spesso le prestazioni scadenti della regolazione sono determinate dai problemi dei sensori e negli attuatori, quali:
- staratura dei sensori, attriti nelle valvole, ecc.

Il regolatore PID, invece, può rappresentare lo strumento basilare degli schemi di controllo più complessi e articolati, che può fornire prestazioni elevate a fronte di un incremento della complessità accettabile.

## 2. L'algoritmo PID

Il regolatore PID nel sistema da controllare è costituito essenzialmente dallo schema di principio riportato in Figura, ove si nota che elabora l'errore di regolazione di ingresso (e) per produrre in uscita (u) una variabile manipolabile che agisce sugli organi regolanti del processo.



Il regolatore PID è pertanto l'elemento del sistema di controllo che stabilizza e controlla il processo, la cui sua funzione temporale e di trasferimento sono le seguenti:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad FdT(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s$$

con:

$K_p$  è il Guadagno dell'azione proporzionale  
 $K_i = K_p / T_i$  è il Guadagno dell'azione integrale  
 $K_d = K_p T_d$  è il Guadagno dell'azione derivativa

e:

$T_i$  è il Tempo integrale  
 $T_d$  è il Tempo derivativo

dove:

e è l'errore  
u è l'uscita  
t è il tempo  
s è l'operatore di Laplace ( $s = j\omega$ )

### 3. Prestazioni dell'algorithm PID

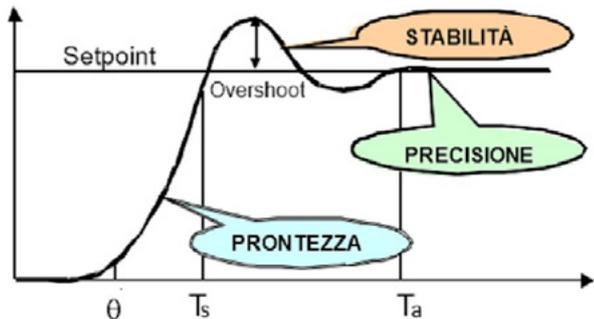
Le azioni del regolatore PID concorrono a garantire corrette azioni di controllo quali:

L'azione Proporzionale migliora la prontezza cioè la rapidità con cui il sistema recupera le variazioni della variabile regolata, dovute al cambio di setpoint o a variazioni del carico. La prontezza è una caratteristica dinamica che evidenzia il modo di reagire ai disturbi!

L'azione Integrata migliora la precisione cioè la capacità del sistema di mantenere la variabile regolata il più vicino possibile al setpoint. La precisione è una caratteristica statica che viene rilevata a transitorio esaurito!

L'azione Derivativa migliora la stabilità che è un'altra caratteristica dinamica che indica la capacità del sistema di stabilizzarsi dopo un breve transitorio senza notevoli sovraelongazioni (overshoot). Senza stabilità nessun sistema di regolazione è in grado di regolare!

Il tutto illustrato e riportato in figura (che illustra le caratteristiche statiche e dinamiche richieste al sistema di controllo rispetto al Setpoint nel dominio del tempo) e in tabella (che riporta il miglioramento (+) o peggioramento (-) delle azioni PID rispetto il controllo all'aumentare dell'entità delle azioni di regolazione PID



Caratteristiche statiche e dinamiche richieste al sistema di controllo

Azione	Prontezza	Precisione	Stabilità
P	++	+	-
I	-	++	-
D	+	+	++

Miglioramento (+) o peggioramento (-) delle azioni PID rispetto le caratteristiche di regolazione

### 4. Sintonizzazione dei regolatori PID

La sintonizzazione delle azioni del regolatore PID costituisce la parte più importante per la realizzazione di un efficace sistema di controllo e può essere attuata con i diversi criteri seguenti:

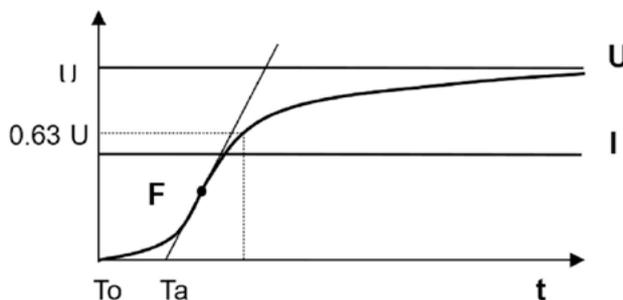
### Criteri Matematici

I metodi matematici sono dei metodi molto rigorosi ma anche abbastanza laboriosi e con lo svantaggio di richiedere la conoscenza del modello matematico del sistema da controllare e tra i maggiori si citano i criteri di:

- Bode
- Nyquist
- Nichols

### Criteri Analitici

I metodi analitici sono dei metodi che possono essere applicati esaminando le risposte del sistema da controllare in anello aperto, per individuare dal gradino di ingresso al processo U, la cosiddetta curva di reazione del processo da controllare U, e da questa individuare i parametri caratteristici (vedasi Figura, dopo aver tracciato la tangente nel punto di flesso F della curva di reazione):



- K ovvero il guadagno statico del processo:  $K = U / I$
  - T ovvero la costante di tempo principale:  $T = Tt - Ta$  (Tt, tempo di risposta a 0,63 U)
  - $\Theta$  ovvero il tempo morto puro o apparente:  $\Theta = Ta - To$  (Ta, intersezione tg di flesso F)
- al fine di modellizzare il sistema da controllare attraverso la classica funzione di trasferimento:

$$FDT(s) = K \frac{e^{-\Theta s}}{1 + Ts}$$

detta anche FOPDT:

First Order Plus Dead Time (Primo Ordine Più Tempo Morto);

e da questi parametri caratteristici rilevati, sintonizzare i parametri PID con i metodi di Ziegler & Nichols, Cohen & Coon ed altri, che però dovendo analizzare preliminarmente la dinamica del processo in anello aperto sono onerosi e impegnativi da applicare.

### Criteri Sperimentali

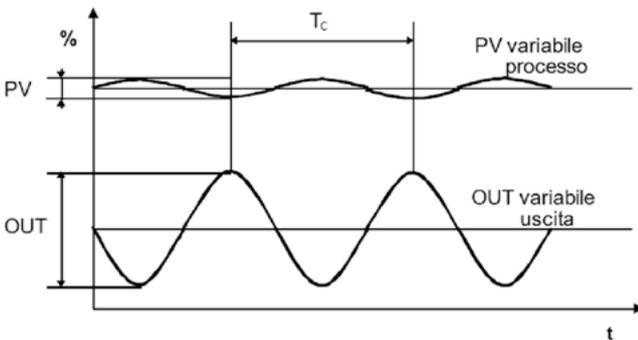
Questi ultimi metodi sono anch'essi adatti alla ricerca delle azioni ottimali di messa a punto dei regolatori nei normali processi caratterizzati

da una o due costanti di tempo predominanti più eventuale tempo morto, però, sono dei criteri più pratici e immediati che si conducono direttamente in anello chiuso, scavalcando l'onerosa ricerca iniziale in anello aperto dei parametri caratteristici del processo da controllare.

Tra i criteri sperimentali c'è da annoverare anche un metodo di Ziegler & Nichols in anello chiuso, di cui ne ho fatto una evoluzione pratica mnemonica anziché una descrittiva tabellare, che in mancanza della tabella è di difficile ricordo e applicazione (altrimenti chiamato Metodo Brunelli).

Pertanto propongo, in similitudine di portare il processo in condizioni critiche di oscillazioni permanenti con la sola azione proporzionale e determinare i parametri critici (vedasi Figura):

- Kc (Guadagno critico)
- Tc (Tempo critico di oscillazione permanente)



attraverso la seguente semplice procedura:

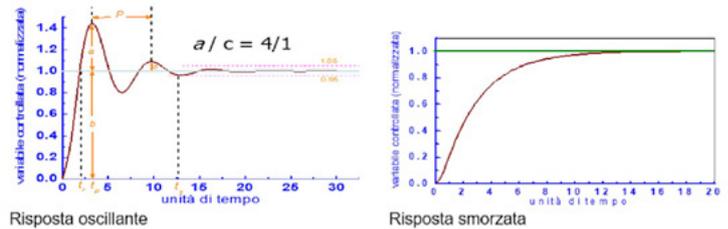
1. collegare l'uscita OUT del regolatore al processo, la variabile processo PV al regolatore e mettere il regolatore in AUT
2. mettere il tempo integrale  $T_i$  al suo valore massimo o, se possibile, escludere l'azione integrale
3. mettere il tempo integrale  $T_d$  al suo valore minimo o, se possibile, escludere l'azione derivativa
4. aumentare il guadagno proporzionale  $K_p$  fino quando, introducendo un piccolo disturbo (variazione della variabile desiderata setpoint o del carico) si ottiene una oscillazione permanente senza smorzamento della variabile PV
5. ricavare dalla curva di oscillazione permanente:
  - il guadagno critico :  $K_c$  dato da  $K_c = OUT / PV$  (oppure dal regolatore)
  - il tempo o periodo critico :  $T_c$  (misurato sull'uscita OUT o sull'ingresso PV del regolatore)
6. quindi memonicamente mettere:
  - a) il Guadagno Proporzionale :  $K_p = \frac{1}{2}$  del Guadagno critico  $K_c$
  - b) il Tempo azione Integrale :  $T_i = \frac{1}{2}$  del Tempo critico  $T_c$
  - c) il Tempo azione Derivativa :  $T_d = \frac{1}{4}$  del

Tempo integrale  $T_i$

ovvero basta ricordare:

$K_p = \frac{1}{2} K_c$ ;  $T_i = \frac{1}{2} T_c$ ;  $T_d = \frac{1}{4} T_c$ , ovvero anche solo  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ , e  $\frac{1}{4}$  come azioni PI e D!

Si fa notare che con questo mio metodo si otterrà una messa a punto delle azioni del regolatore con risposta di regolazione oscillante del tipo smorzato con un decadimento a/c di 5:1, anziché di 4:1 (vedasi Figura) come nel caso del metodo Ziegler & Nichols, il che è indice di miglior stabilità accompagnata da una buona prontezza di regolazione!



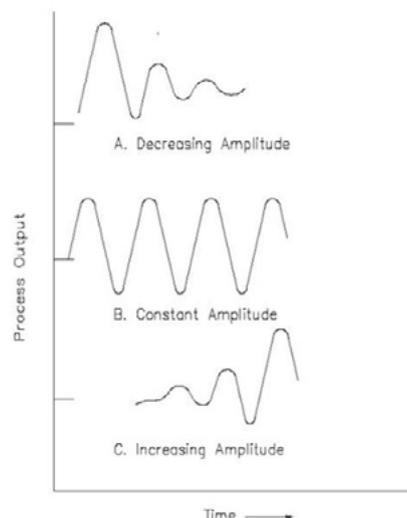
Ulteriore annotazione, diffidate delle risposte smorzate senza sovraelongazione alle variazioni del setpoint, perché poi alle variazioni di carico non sono altrettanto buone e rapide nel recupero!

## 5. Libere Dissertazioni dell'Autore

Questo mio metodo basato partendo dalle condizioni critiche (B): Nino\_Nano, Nino Nano ... Nino\_Nano, Nino Nano

(che porta il processo in pendolazione permanente: (Constant Amplitude).

È un metodo efficace di corretta sintonizzazione, detta anche del (A): Nino\_Nano, Nino Nano ... Nino\_Nano, Ninetto\_Nanetto (che porta il processo in corretta regolazione: Decreasing Amplitude); ed è un metodo per prevenire l'errata sintonizzazione, detta anche (C): Nino\_Nano, Nino Nano ... Nino\_Nano, Ninotto\_Nanotto (che porta il processo in fermata di emergenza: Increasing Amplitude)



E' un metodo sviluppato per venire incontro ai miei numerosi discenti che durante la messa a punto del regolatore PID su processi simulati, mi chiedevano sempre della Tabella di sintonizzazione, per trovare i parametri ottimali di regolazione da quelli critici di oscillazione permanente.

Al che ho pensato di facilitare la cosa dicendo loro:

Portate il processo in oscillazione permanente individuando come predetto:

- $K_c$  (Guadagno critico)
- $T_c$  (Tempo critico di oscillazione, ovvero tra due picchi + o - : tra Nino e Nino o tra Nano e Nano)

e quindi procedete alla messa punto delle azioni del regolatore PID nel seguente modo:

- a)  $K_p$  = Dimezzate il guadagno critico
- b)  $T_i$  = Dimezzate il tempo critico
- c)  $T_d$  = Mettete un quarto del tempo integrale

ovvero se volete anche secondo la regola come predetto prima (come azione, P, I e D)

- a)  $K_p = \frac{1}{2} K_c$
- b)  $T_i = \frac{1}{2} T_c$
- c)  $T_d = \frac{1}{4} T_i$

ottenendo così mnemonicamente e rapidamente, una corretta sintonizzazione delle azioni del regolatore PID, che normalmente fornisce una risposta di regolazione si oscillante, però con un buon decadimento di circa 5:1, che garantisce una buona stabilità accompagnata da una buona prontezza e rapidità di regolazione!

Questo mio Metodo Brunelli potremo definirlo mnemonicamente anche come in precedenza:

Metodo  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ , e  $\frac{1}{4}$  come azioni PI e D, partendo dalle condizioni critiche del processo  $K_c$  e  $T_c$ ; metodo che io altrimenti chiamo data la sua ricerca e la sua successiva messa a punto. Metodo del Nino\_Nano ... Ninetto\_Nanetto!!

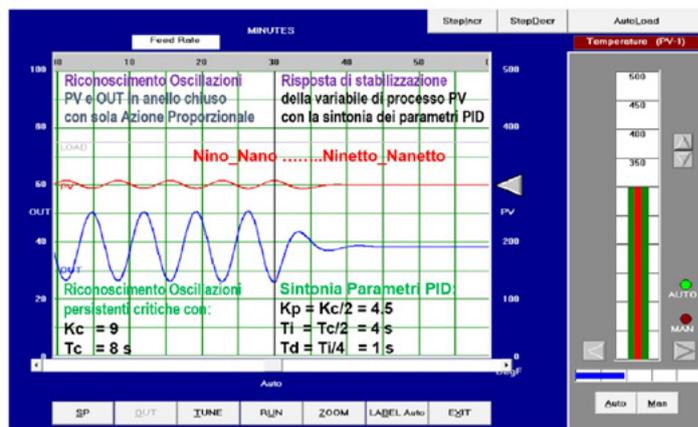
### P.S.

Chiedo venia ai puristi della lingua italiana che in questo mio metodo per così dire onomatopeico, ho inserito dei diminutivi familiari "Nino" e un neologismo "Ninetto" (familiare per il mio Veneto d'origine), che però rendono l'idea del passare da una condizione oscillante permanente (Nino\_Nano) ad una condizione convergente (riduttiva) stabile (appunto: Ninetto\_Nanetto)!

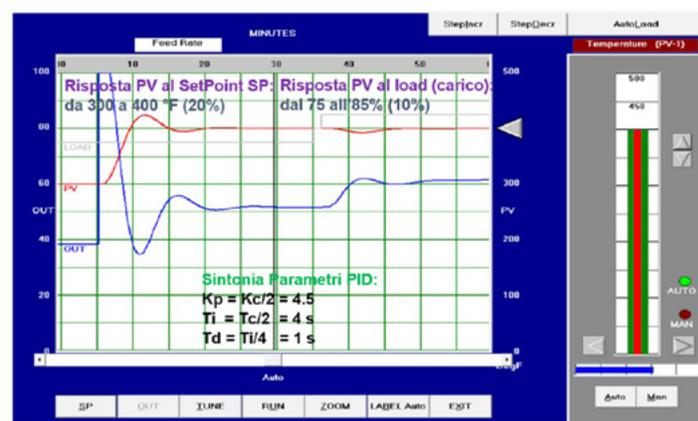
Le Figure di seguito riportate, illustrano i risultati

ottenibili rispettivamente:

- il metodo di ricerca delle oscillazioni permanenti di un sistema di controllo di temperatura con la sola azione proporzionale P (Nino\_Nano ... Nino\_Nano) e la sua stabilizzazione statica attraverso la sintonizzazione delle azioni PID col mio metodo (Nino\_Nano ... Ninetto\_Nanetto).
- l'efficacia del mio metodo sia nei confronti di variazioni del SetPoint SP che del carico (Load)!



Ricerca dell'oscillazione permanente del sistema e sua sintonizzazione col mio metodo



Efficacia del mio metodo sia nei confronti di variazioni del SetPoint (SP) che del carico (Load)

**Keywords:** Regolatore PID; Controllo industriale; Sintonizzazione PID; Metodo Brunelli; Nino\_Nano; Ninetto\_Nanetto; Algoritmo PID; Guadagno critico ( $K_c$ ); Tempo critico ( $T_c$ ); Azione proporzionale (P); Azione integrale (I); Azione derivativa (D); Stabilità; Precisione; Prontezza; Oscillazioni permanenti; Metodo Ziegler-Nichols; Controllo a DCS e PLC; Standardizzazione dei regolatori; Processi industriali.

### L'Autore\*

Alessandro Brunelli, Esperto in automazione, strumentazione, taratura e sicurezza degli impianti industriali. Segretario CEI SC65B: Misura e Controllo dei Processi Industriali





## Manuale di Strumentazione (3ª edizione)

L'Autore, Alessandro Brunelli, porta a conoscenza della 3ª edizione del Volume II: "Controllo e Sicurezza" caratterizzata da un generale aggiornamento e potenziamento qua e là, e in particolare:

- Inserimento di un mio metodo pratico mnemonico di sintonizzazione dei Regolatori PID, partendo dalle condizioni critiche del processo da regolare quali guadagno critico di oscillazione persistente  $K_c$  e periodo di oscillazione  $T_c$ , per ricavare i parametri ottimali PID come  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{1}{4}$ , ovvero,  $\frac{1}{2} K_c$  come guadagno proporzionale,  $\frac{1}{2} T_c$  come azione integrale e  $\frac{1}{4}$  integrale come derivativa (altrimenti chiamato metodo del Nino\_Nano - Ninetto\_Nanetto, che garantisce un'ottima stabilità con decadimento di risposta minore di  $\frac{1}{4}$ )
- Riesame degli esempi di calcolo sulle valvole di sicurezza e dei dischi di rottura in conformità alle Norme Internazionali serie ISO 4126
- Cenni ai trend dell'automazione industriale e all'evoluzione delle comunicazioni che stanno migrando da protocolli proprietari o consorziali, a protocolli general purpose, basati su reti Ethernet Advanced Physical Layer a due fili che trasportano sia il segnale, sia l'alimentazione ai dispositivi di campo, e supportano i protocolli di più alto livello, compresi quelli real-time
- Menzione alla sicurezza delle comunicazioni industriali, in riferimento alle nuove Normative Internazionali serie IEC 62443 sulla Cyber Security, sui relativi Security Levels (SL1-SL4), e alla recente Direttiva Europea NIS 2 (Network of Information Security)
- Rivisitazione della sicurezza funzionale degli impianti industriali in riferimento alle nuove Normative Internazionali serie IEC 61508 e IEC 61511, sui relativi Safety Integrity Levels (SIL1-SIL4) e sui criteri di progettazione dei Safety Instrumented Systems (SIS) con relativi esempi applicativi.

## FORMAZIONE




**CORSO sui SISTEMI STRUMENTATI SICUREZZA – SIS**  
secondo le Norme Internazionali IEC 61508 & 61511  
**5 dicembre 2024**  
In diretta streaming su Microsoft Teams e in presenza:  
Presso DNV - Via Energy Park 14 - 20871 Vimercate (MB)

PROGRAMMA Chairman: A. Brunelli

- ORE 9:00  
REGISTRAZIONE PARTECIPANTI PRESENTI E ISCRITTI ON-LINE
- ORE 9:15  
Struttura generale della normativa internazionale di riferimento:  
IEC 61508 per applicazioni generali e IEC 61511 per l'industria di processo
- ORE 10:00  
I punti fondamentali della norma IEC 61511:  
Progettazione, realizzazione, esercizio, manutenzione, modificazione e dismissione del SIS
- ORE 11:00  
Metodologie di determinazione pratica del SIL:  
- Dall'analisi dei rischi e delle possibili conseguenze  
- Alla determinazione dei Safety Integrity Level SIL (con grafi e matrici di rischio)
- ORE 12:30  
Interruzione dei lavori
- ORE 14:00  
Esemplificazioni di calcoli e verifiche dei SIL con Fogli di Calcolo Excel:  
- Calcoli e verifiche pratiche dei SIL (con le formule IEC 61508-6)  
- Intervallo prove periodiche totali TI e Partial Stroke Test (PST)
- ORE 15:00  
Cenni all'analisi dei rischi:  
- Process Risk Analysis (PRA)  
- Varie principali metodologie (ALARP, HAZOP, LOPA, ecc.)
- ORE 15:30  
Sistemi di protezione della pressione (High Integrity Pressure Protection Systems) e considerazioni sulla progettazione dei relativi sottosistemi
- ORE 16:30  
Esempi applicativi di determinazione dei SIL:  
- Serbatoi in pressione  
- Separatori trifase (Gas\_Olio\_Acqua)
- ORE 17:30 : Chiusura dei lavori

**NOTA**  
Durante le sessioni di determinazione, calcolo, verifica, valutazione ed esemplificazione del SIL, verrà utilizzato un programma specifico applicativo distribuito a ciascun partecipante!

**PRESENTAZIONE**

La sicurezza all'interno degli impianti e dei processi produttivi richiede una rigorosa conformità alle normative internazionali IEC 61508 e IEC 61511 che definiscono i criteri e i metodi per assegnare i Livelli di Integrità di Sicurezza SIL e quindi di affidabilità che i Sistemi Strumentati di Sicurezza SIS devono assicurare per ridurre il rischio industriale sul personale, sull'ambiente e sulle apparecchiature degli impianti e dei processi stessi.

**ISCRIZIONE E QUOTE DI PARTECIPAZIONE:**  
La manifestazione è riservata ai Soci A.I.S.

**Quote associative:**  
AIS Associazione Italiana Strumentisti: Euro 75  
ISA Italy Section: Euro 140

**Quota di partecipazione al Corso:** Euro 125 (importo non soggetto a iva)

IL CORSO SI SVOLGERA' SOLO SE SI RAGGIUNGE IL NUMERO MINIMO DEI PARTECIPANTI  
Per iscrizione al corso contattare la segreteria:  
A.I.S. ISA - Viale Campania 29 - 20133, Milano | tel. 388 7591902 | [ais@aisisa.it](mailto:ais@aisisa.it)

**Per finalizzare l'iscrizione al corso è possibile:**  
- Effettuare pagamento tramite carta di credito (Paypal) inviando una mail in segreteria.  
- Effettuare il bonifico bancario a favore di AIS:  
Banca Intesa San Paolo Milano IBAN IT55 0030 6909 6061 0000 0119 766

●●● **Materiale didattico:**  
DISPENSE DI ESPOSIZIONE DEL CORSO  
LIBRO DI RIFERIMENTO: SICUREZZA FUNZIONALE DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI  
A. Brunelli, F. Andreoli  
Per i Corsisti sarà possibile acquistarlo ad un prezzo agevolato! Per info [ais@aisisa.it](mailto:ais@aisisa.it)

**Si ringrazia per il sostegno all'iniziativa:**



Per ulteriori informazioni:

<https://editorialedelfino.it/prodotto/manuale-di-strumentazione-volume-ii/>