

Definicions

Model

- ▶ Un model és una representació simplificada de com són les coses o com es comporten.
- ▶ Descriu la conducta observada i simplificada ignorant certs detalls. Permeten descriure sistemes complexos per ser entesos i predir el seu comportament, poden proporcionar explicacions i prediccions incorrectes fora de l'àmbit del seu ús previst.

Simulacions

- ▶ La representació imitativa del funcionament d'un sistema o procés per mitjà del funcionament d'un altre.

Sistema

- ▶ Conjunt d'objectes que s'uneixen per aconseguir algun propòsit.

Representació dels models i els estats

La **representació dels models** pot ser de diferents formes:

- ▶ Mental: representació psicològica de les situacions reals, hipotètiques o imaginàries.
- ▶ Física: Dibuix d'una casa, un pont, un esquema d'un ordinador, ...
- ▶ Simbòlica (matemàtica): H_2O , $F = m \cdot a$, ...

Un **estat del sistema** és el conjunt de variables necessàries per descriure'l en un instant concret. Per exemple:

- ▶ en un pàrquing ens interessa nombre de places lliures
- ▶ en un dipòsit ens interessa el nivell
- ▶ en un circuit ens pot interessar el corrent, la tensió, la potència, ...

Classificació segons la naturalesa de l'estat

Discrets

Són sistemes en els quals les variables d'estat canvia instantàniament en instants de temps separats en el temps.

Exemples:

- ▶ el nombre de places lliures en un pàrquing
- ▶ un telèfon
- ▶ un semàfor

Continus

Són sistemes en els quals les variables d'estat canvia de forma contínua amb el temps.

- ▶ el nivell d'un dipòsit
- ▶ el corrent, la tensió, la potència d'un circuit elèctric
- ▶ la velocitat d'un cotxe

Caracterització dels models

Continu o discret

- ▶ La majoria de sistemes mecànics i elèctrics tenen variables d'estat que evolucionen contínuament. Ex: la velocitat d'un cotxe, la potència proporcionada per un panell solar, ...
- ▶ Les equacions diferencials ens permeten representar aquest comportament.
- ▶ Altres sistemes com el manteniment de les màquines, les connexions en xarxa de la distribució d'energia elèctrica, ..., es representen amb models discrets, ja que tenen comportaments lineals a trossos i constants en el temps.
- ▶ Una gran majoria de sistemes es poden representar amb model híbrids.

Classificació segons el seu comportament

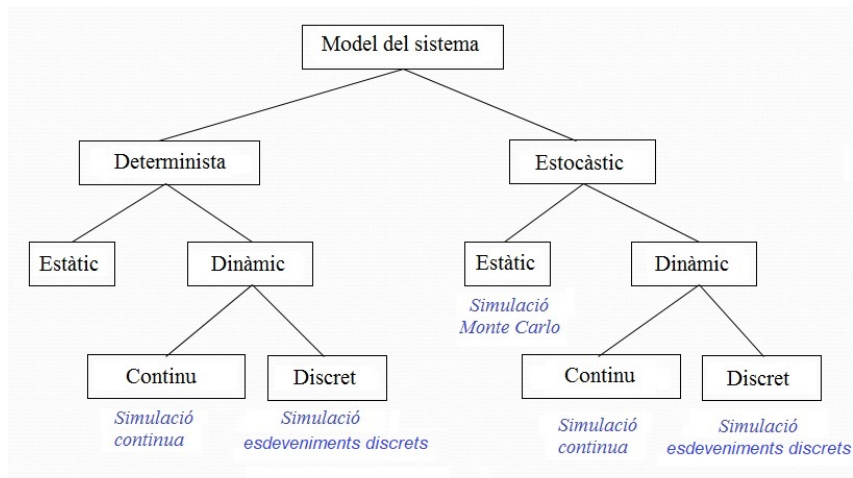
Determinista (causal) o estocàstic (no causal)

- ▶ Un sistema és determinista quan no té components aleatoris (random). Ex: una cinta transportadora que alimenta una màquina d'envasat amb temps de servei constants.
- ▶ Tots els sistemes tenen alguns components estocàstics (un component d'un circuit elèctric es pot avariar).

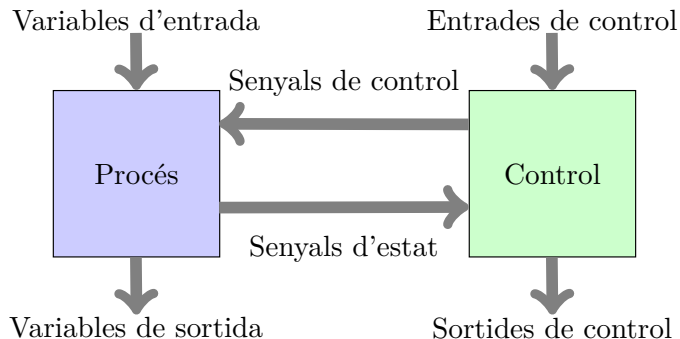
Estàtic o dinàmic

- ▶ Un sistema es representa per un model estàtic quan la variable temps no és significativa.
- ▶ El temps és una variable molt important en els models dinàmics. Exemple: filtres de senyals, velocitat d'un cotxe, ..

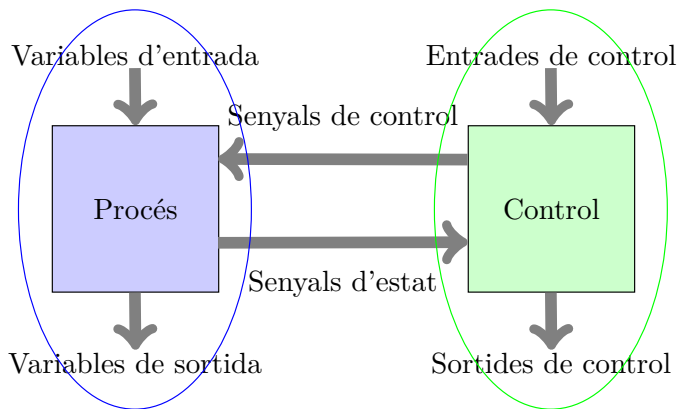
Models i simulació



Estructura típica d'un sistema Automatitzat



Estructura típica d'un sistema Automatitzat



Model de simulació

Model del sistema de control

Sistemes d'esdeveniments discrets (DES): conceptes

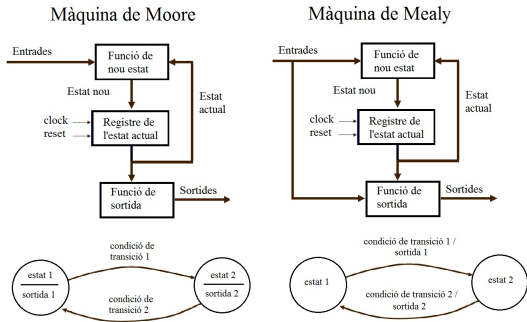
Un DES és una màquina d'estats a on l'estat del sistema sols s'observa a instants discrets del temps.

Poden ser: sistemes conduïts per temps (time-driven) i/o sistemes conduïts per esdeveniments (event-driven).

- ▶ Esdeveniment == successos instantanis, per exemple:
 - ▶ accions específiques: prémer un polsador,
 - ▶ accions instantànies: avaries, canvis naturals, activació de detectors, ...
 - ▶ assoliment de determinades condicions: buffer ple, temperatura que supera un determinat llimitar, ...
- ▶ la notació és semblant a les màquines d'estat

Models de sistemes dinàmics d'esdeveniments discrets:

- ▶ Són models que permeten representar sistemes en els quals les variables d'estat canvien únicament a certs instants de temps i es mantenen constants la resta del temps. Exemples: màquines d'estat de Moore i de Mealy.



Formalització dels DES

Alguns dels formalismes per descriure els DES en el camp de l'Automatització de sistemes són:

- ▶ Autòmat finit
- ▶ Xarxes de Petri
- ▶ Statecharts
- ▶ Sequential Function Chart (SFC) conegut també com a GRAFCET

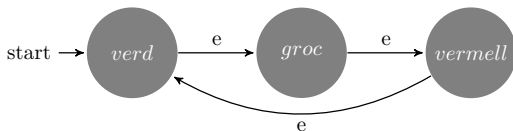
En funció dels esdeveniments es parla de DES amb:

- ▶ Llenguatge simple: els esdeveniments no porten associat el temps $e_1 e_2 \dots e_n$;
- ▶ Llenguatge temporitzat: els esdeveniments tenen el temps associat $(e_1, t_1)(e_2, t_2) \dots (e_n, t_n)$
- ▶ Llenguatge amb temps estocàstic: els esdeveniments tenen associada una funció de probabilitat.

Autòmats finits

- ▶ Es descriuen amb la tupla $M = \langle \Sigma, S, s_0, \delta, F \rangle$
 - ▶ Σ , llista d'entrades o conjunt d'esdeveniments;
 - ▶ S , Conjunt finit d'estats, un d'ells es designa com a inicial, i alguns (o cap) poden ser estats finals;
 - ▶ $s_0 \in S$: estat inicial;
 - ▶ $\delta : S * \Sigma \rightarrow S$, conjunt de regles de transició;
 - ▶ F , llista d'estats finals (pot ser buida).

Exemple 1: $\Sigma = [e]$ i $S = [verd, groc, vermell]$

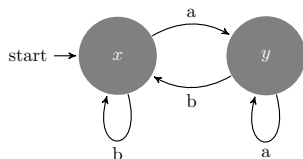


Autòmats finits

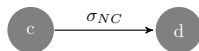
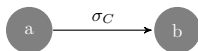
Exemple 1. Donat l'autòmat:

- ▶ $S = \{x, y\}$
- ▶ $\Sigma = \{a, b\}$
- ▶ $\delta(x, a) = y, \delta(x, b) = x,$
 $\delta(y, b) = x, \delta(y, a) = y$
- ▶ $s_0 = x$
- ▶ $F = \{y\}$

Representació amb un graf dirigit amb una màquina de Moore:



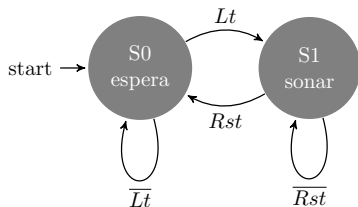
Els esdeveniments poden ser controlables, σ_C o no controlables, σ_{NC} :



Autòmats finits

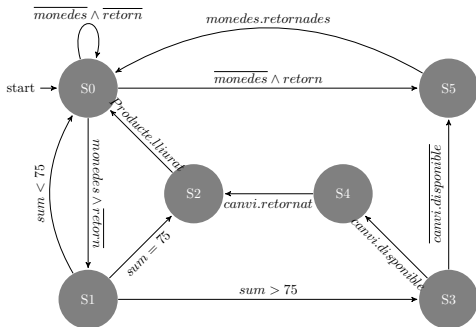
Exemple 2: Control d'una alarma

- ▶ L'alarma comença a sonar (S1) quan s'activa el sensor de nivell, definit per un nivell d'activació (Lt).
- ▶ L'alarma es reinicia (S0) quan s'activa un botó de reinici (Rst), independentment de l'estat del sensor de nivell.



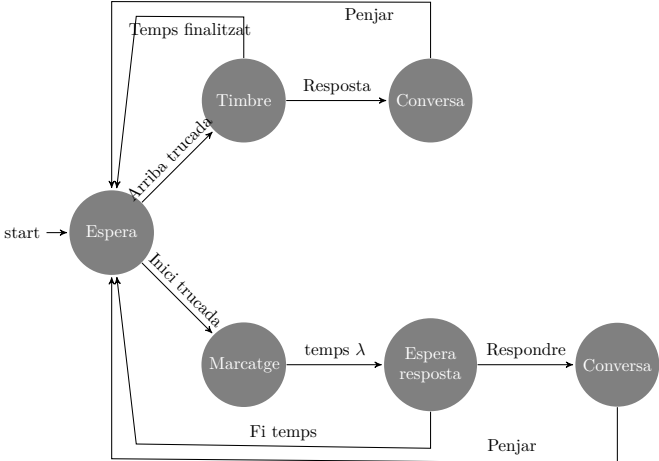
Exemple 3: Control d'una màquina expendedora

- ▶ Vendre un article que costa 0.75
- ▶ Lliurament de l'article quan les monedes introduïdes sumin 0.75
- ▶ Retorn de canvi i lliurar article quan les monedes introduïdes superin la suma de 0.75
- ▶ Retorn de totes les monedes a petició sense deixar caure l'article
- ▶ Retorn de les monedes quan la màquina no disposi de canvi



- S0:** Estat inicial
- S1:** Comprovació de monedes
- S2:** Subministrar producte
- S4:** Retorn de canvi
- S5:** Retorn de totes les monedes

Exemple 4: Telèfon

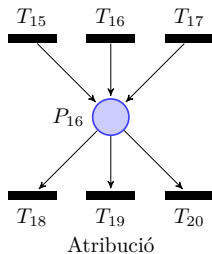
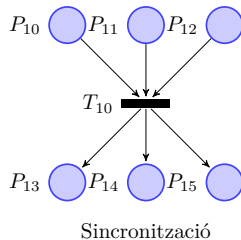
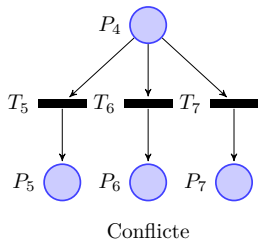
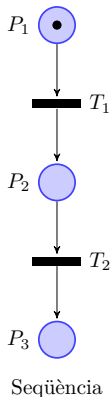


Xarxes de Petri

- ▶ Són eines de modelatge de sistemes seqüencials i concurrents i útils per a la gestió de cues
- ▶ Permeten representar el comportament dinàmic d'un sistema
- ▶ És un graf orientat, format pels següents elements
 - ▶ Elements estàtics
 - ▶ Llocs: porten associada una acció
 - ▶ Transicions: permeten evolucionar d'un lloc a un altre
 - ▶ Arcs orientats: uneixen llocs amb transicions.
 - ▶ Elements dinàmics
 - ▶ Marques: es situen en els Llocs i representen l'estat del sistema en cada moment

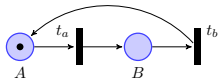
<http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/>

Xarxes de Petri: Estructures

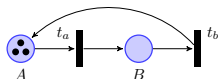


Xarxes de Petri: Exemples

Sistema que consta d'un procés

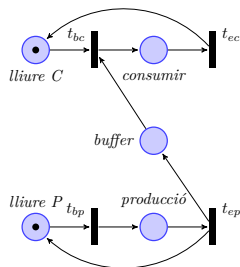


El mateix sistema però amb tres processos idèntics



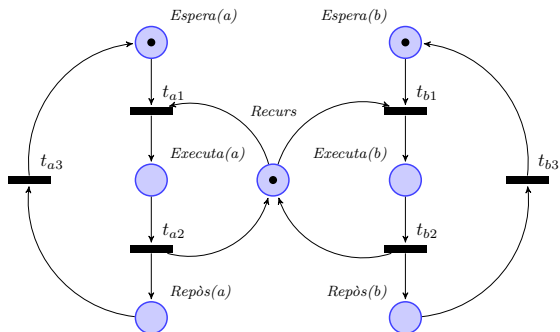
Productor/consumidor:

- ▶ cada vegada que es dona la transició t_{ep} indica que s'ha produït un nou objecte;
- ▶ els objectes produïts es dipositen en el "buffer";
- ▶ i, la transició t_{bc} no es dona si no hi ha objectes en el buffer.



Xarxes de Petri: Exemples

Exclusió mútua



<https://www.lrde.epita.fr/~renault/teaching/imc/2-petri.pdf>

Diagrames d'estat transició

- ▶ Es representen per la notació UML (Unified Modeling Language)
- ▶ S'anomenen també Statecharts
- ▶ Hi ha un ordre específic per avaluar les condicions de transició d'estat: quan es dona un esdeveniment α en un estat A i la condició de transició C és certa, es transfereix a l'estat B .

Característiques:

- ▶ És un diagrama d'estat-transició
- ▶ Permet establir una jerarquia, concurrències i comunicacions
- ▶ Permet definir els sistemes considerant diferents graus de profunditat (abstracció) o superestats

Diagrames d'estat transició

Elements del diagrama d'estats:



Consideracions de disseny:

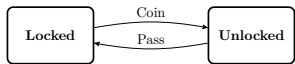
- ▶ Un estat estable és aquell en el qual el sistema es pot mantenir
- ▶ Els esdeveniments són els que desencadenen la transició d'un estat a un altre, poden ser interns o externs
- ▶ Les accions es desencadenen quan hi ha canvis en els esdeveniments o canvis d'estat

Diagrames d'estat transició

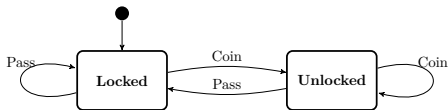
Exemple 5: Torniquet d'entrada a una estació de metro

- ▶ Inicialment, la porta està bloquejada (locked) i no pot rotar;
- ▶ Quan es diposita una moneda o una fitxa, la porta es desbloqueja (unlocked) però no gira fins que la persona l'empeny.

Aquest sistema té dos estats: Locked o Unlocked i dues transicions (disparador/trigger) Coin i Passing



Model senzill de la màquina d'estats



Model millorat de la màquina d'estats

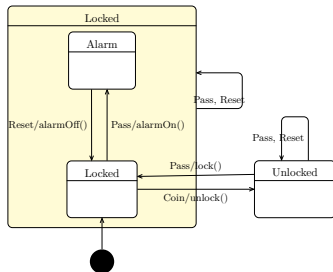
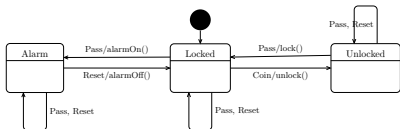
https://www.tutorialspoint.com/uml/uml_statechart_diagram.htm

Diagrames d'estat transició

Exemple 5: Torniquet d'entrada a una estació de metro

- ▶ si algú intenta passar pel torniquet mentre està bloquejat, s'activa una alarma, i es manté encesa fins que es restableix el sistema;
- ▶ Mentre està activa l'alarma, el torniquet es manté bloquejat, i no s'ha de fer cas si es dipositen monedes.

Cal incorporar un nou estat `Alarm` i cal considerar tres esdeveniments: introduir moneda `Coin`, algú que vol passar `Pass` i reset de l'alarma `Reset`



Cas d'estudi 1: Control de la velocitat de creuer

- ▶ Interruptor ON/OFF: activa o desactiva el sistema de control de creuer;
- ▶ Interruptor RES+/SET-: sols treballa si el sistema de control de creuer està activat i es pot prémer diverses vegades,
 - ▶ SET significa que la velocitat actual es pren com a valor de referència pel control de creuer i, per tant, la velocitat es manté constant, aquesta velocitat es manté mentre el conductor no toqui el fre, en aquest cas el sistema de control de creuer es desactiva.
 - ▶ RES (reprendre) si el conductor el prem, s'agafa com a referència l'últim valor. Si no hi ha cap valor d'última referència RES no té cap efecte.
 - ▶ Si la velocitat es controla automàticament, RES+ significa que el valor de referència s'incrementa en +3 km/h; i SET- significa que el valor es redueix de -3 km/h.

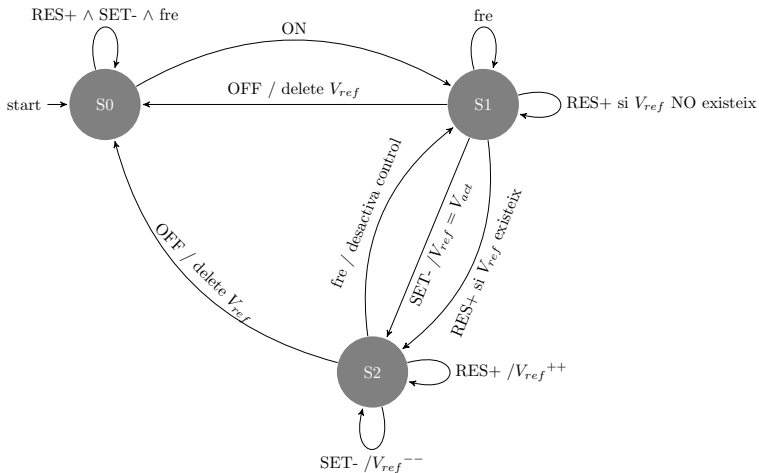
Cas d'estudi 1: Control de la velocitat de creuer

Entrades de control	Senyals de control
Interruptor a ON Interruptor a OFF Prémer RES+ Prémer SET- Prémer fre	Activar el control de creuer Desactivar el control de creuer Activar control de velocitat Desactivar control de velocitat Guardar valor de referència Incrementar el valor de referència (+3 km/h) Decrementar el valor de referència (-3 km/h)

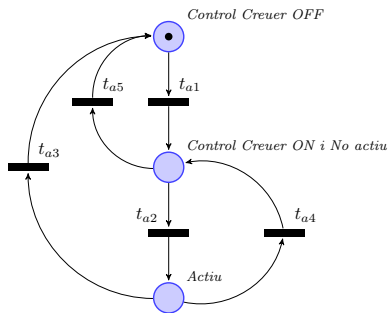
SOLUCIÓ DEL CAS D'ESTUDI 1:

- ▶ Màquina de Mealy
- ▶ Xarxes de Petri
- ▶ Diagrama d'estats UML

SOLUCIÓ DEL CAS D'ESTUDI 1: Màquina de Mealy



SOLUCIÓ DEL CAS D'ESTUDI 1: Xarxa de Petri



Esdeveniments:

- ▶ $t_{a1} = ON$
- ▶ $t_{a2} = \{RES+ \text{ si } V_{ref} \neq \emptyset\} \vee \{SET- \text{ si } V_{ref} = \emptyset\}$
- ▶ $t_{a3} = fre$
- ▶ $t_{a4} = OFF$
- ▶ $t_{a5} = OFF$

Accions:

Control Creuer OFF $\Rightarrow V_{ref} = \emptyset$

Control Creuer ON i no actiu

Control Creuer ON i actiu

- ▶ si $V_{ref} = \emptyset \Rightarrow V_{ref} = V_{act}$
- ▶ si $V_{ref} \neq \emptyset \wedge SET- \Rightarrow V_{ref}^{--}$
- ▶ si $V_{ref} \neq \emptyset \wedge RES+ \Rightarrow V_{ref}^{++}$

SOLUCIÓ DEL CAS D'ESTUDI 1: Diagrama d'estats UML

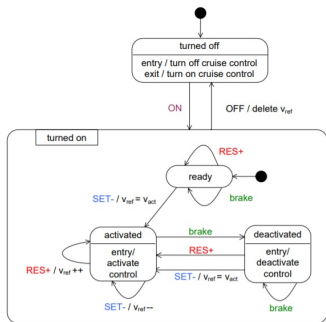


Figure 11: UML state diagram for the Cruise Control example

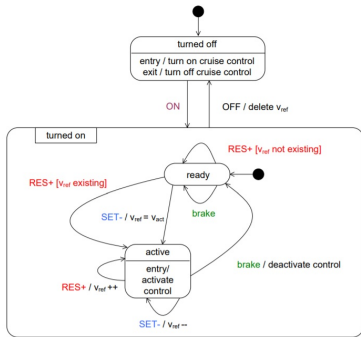
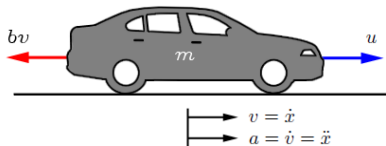


Figure 12: UML state diagram for the Cruise Control example with state information expressed in the condition

DES respecte Sistema regulat

- ▶ Una vegada activat el control de creuer, com funciona?
- ▶ L'objectiu del sistema de control de creuer és el de mantenir una velocitat constant en el vehicle malgrat les pertorbacions externes, com els canvis de vent i el grau d'inclinació de la carretera.
- ▶ Això s'aconsegueix mesurant la velocitat del vehicle, comparant-la amb la velocitat desitjada o de referència i ajustant automàticament l'accelerador segons una llei de control.

Exemple [\(http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=CruiseControl§ion=SystemModeling\)](http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=CruiseControl§ion=SystemModeling):

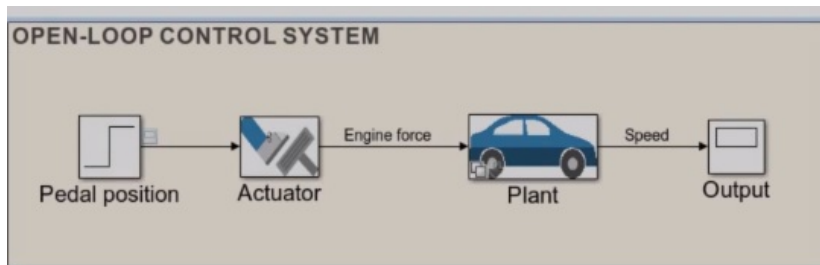


Dades del vehicle:

- ▶ Massa del vehicle:
 $m = 1000 \text{ kg}$
- ▶ Coeficient d'amortiment:
 $b = 50 \text{ Ns/m}$

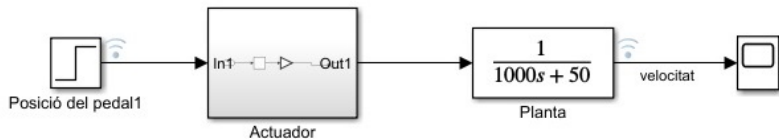
- ▶ Aplicant la segona llei de Newton: $m\dot{v} + bv = u$
- ▶ L'objectiu és controlar la velocitat del vehicle: $y = v$
- ▶ Representació en espai d'estat:
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= [\dot{v}] = \begin{bmatrix} -b \\ m \end{bmatrix} [v] + \begin{bmatrix} 1 \\ m \end{bmatrix} [u] \\ y &= [1] [v] \end{aligned}$$
- ▶ Fent la transformada de Laplace i assumint condicions inicials zero, trobem que el sistema físic es pot modelitzar per la funció de transferència:
$$P(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{ms+b} \frac{m/s}{N}$$

Simulació:



<https://es.mathworks.com/videos/>

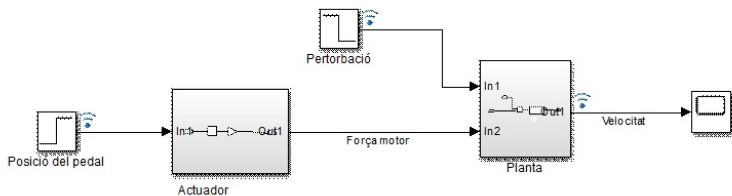
[understanding-control-systems--part-4--simulating-disturbance-re-1480629735127.html](https://es.mathworks.com/videos/understanding-control-systems--part-4--simulating-disturbance-re-1480629735127.html)



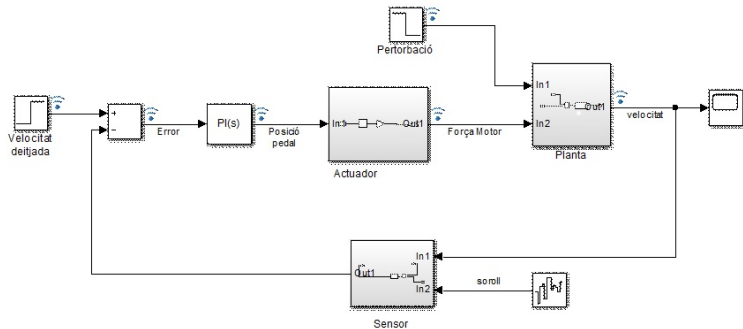
<https://es.mathworks.com/videos/>

[understanding-control-systems--part-4--simulating-disturbance-re-1480629735127.html](https://es.mathworks.com/videos/understanding-control-systems--part-4--simulating-disturbance-re-1480629735127.html)

Simulació amb pertorbacions:



Simulació en llaç tancat:



Models matemàtics de sistemes dinàmics continus:

- ▶ Representen l'evolució d'una variable, s'utilitzen *equacions diferencials ordinàries* o parcials,

$$dy(t)/dt = f(u(t)) \Rightarrow \text{TRANSFORMADA DE LAPLACE}$$

- ▶ o *equacions discretes* si es considera que les variables d'estat del sistema evolucionen només en certs instants predeterminats al llarg del temps:

$$y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_ny(k-n) = b_0u(k) + \dots + b_mu(k-m) \\ \Rightarrow \text{TRANSFORMADA Z}$$

Models de controladors continus:

ON/OFF: Control ON/OFF

És el control més simple, la sortida del controlador és ON o OFF en funció de la variable controlada i el senyal de referència (setpoint).

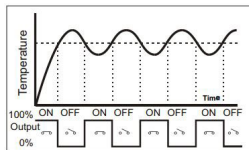
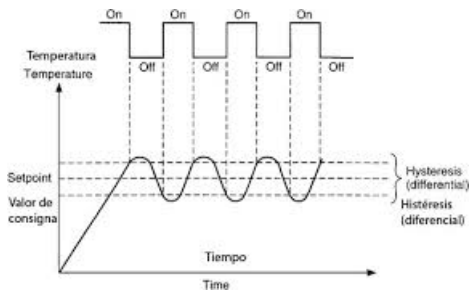


Fig 1: Basic ON / OFF control

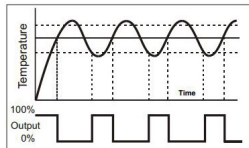
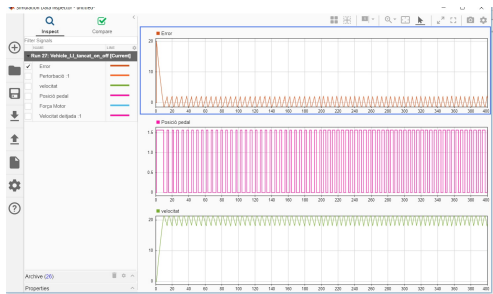
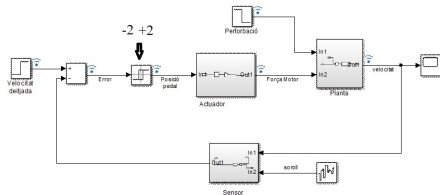


Fig 2: ON / OFF control with Deadband

ref. fig. http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/instrumentacion_industrial4.php i <http://www.eurotherm.com/pid-control-made-easy>

Control de velocitat ON/OFF:



Models de controladors continus:

PID: Regulador Proporcional-Integral-Derivatiu

Objectiu: aconseguir que la variable de procés (PV) o variable a controlar segueixi un predeterminat senyal de referència o consigna o 'set-point (SP)'.

Per el seu funcionament es requereix sintonitzar 3 paràmetres: el guany proporcional (k_c), el temps d'acció integral (T_i) i el temps d'acció derivatiu (T_d).

Expressió: $u(t) = u_0 + P(t) + I(t) + D(t)$

a on:

$$P(t) = k_c \cdot e(t)$$

u_0 valor constant (bias),

$$I(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

$e(t) = y_{sp} - y_{pv}$,

$k_i = k_c / T_i$ i $k_d = k_c T_d$

$$D(t) = k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Models de controladors continus:

PID: Regulador Proporcional-Integral-Derivatiu amb modificacions

- ▶ Setpoint weighting

$$P(t) = k_c \cdot e_p(t) \text{ amb } e_p(t) = (b \cdot y_{sp}(t) - y_{pv}(t)) \text{ i } b \in [0, 1]$$

$$D(t) = k_d \frac{d}{dt} e_d(t) \text{ amb } e_d(t) = (c \cdot y_{sp}(t) - y_{pv}(t)) \text{ i } c \in [0, 1]$$

els valors de b i c no afecten l'estabilitat del sistema en llaç tancat vers les pertorbacions, però sí que afecten en la velocitat de resposta a canvis de consigna.

A nivell industrial s'utilitzen estructures PI+D ($b=1$ i $c=0$)

Models de controladors continus:

PID: Regulador Proporcional-Integral-Derivatiu amb modificacions

- ▶ Derivative kick

$$U(s) = P(s)E_P(s) + I(s)E(s) + D(s)E_D(s)$$

$$D(s) = k_d \frac{T_d s}{(1 + s \frac{T_d}{N})}$$

s'incorpora un filtre passa baixos, amb una freqüència de tall de N/T_d .

Models de controladors digitals:

PID continu a digital. La transformació es fa:

$$u_k = u_0 + k_c \left(e_k + \frac{\Delta t}{T_i} \sum_{j=1}^n e_j + \frac{T_d}{\Delta t} (e_k - e_{k-1}) \right)$$

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx \sum_{j=1}^n e_j \Delta t$$

$$\frac{d}{dt} e(t) \approx \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t}$$

- ▶ Δt és el període de mostreig que cal seleccionar en funció de la dinàmica del procés a controlar.
- ▶ Existeixen moltes fórmules per definir Δt , una de les més emprades és $T_{95}/15 < \Delta t < T_{95}/4$
- ▶ T_{95} és el temps que tarda la sortida del procés a assolir el 95% del valor final quan s'aplica un graó a la seva entrada.

Models de controladors digitals:

PID digital amb setpoint weighting i derivative kick

- ▶ Acció Proporcional:

$$P_k = k_c (b \cdot y_{sp_k} - y_{pv_k})$$

- ▶ Acció Integral:

$$I_k = I_{k-1} + k_c \frac{\Delta t}{T_i} (y_{sp_k} - y_{pv_k})$$

- ▶ Acció Derivativa:

$$D_k = \frac{T_d}{T_d + N\Delta t} D_{k-1} + \frac{k_c T_d N}{T_d + N\Delta t} (c (y_{sp_k} - y_{sp_{k-1}}) - (y_{pv_k} - y_{pv_{k-1}}))$$

Models de controladors digitals:

PID digital en transformada \mathcal{Z}

$$U^*(z) = k_c \left(E(z) + \frac{\Delta t}{T_i} \frac{1}{1 - z^{-1}} E(z) + \frac{T_d}{\Delta t} (1 - z^{-1}) E(z) \right)$$

ja que: $u_k^* = u_k - u_0$, $\mathcal{Z} \{e_k\} = E(z)$, $\mathcal{Z} \{e_{k-1}\} = z^{-1} E(z)$.

Algoritme de velocitat o incremental

Es fa el canvi: $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$

$$\Delta u_k = k_c \left((e_k - e_{k-1}) + \frac{\Delta t}{T_i} e_k + \frac{T_d}{\Delta t} (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \right)$$

o en transformada \mathcal{Z}

$$\Delta U(z) = k_c \left((1 - z^{-1}) E(z) + \frac{\Delta t}{T_i} E(z) + \frac{T_d}{\Delta t} (1 - 2z^{-1} + z^{-2}) E(z) \right)$$

Característiques dels controladors PID digitals:

1. **Limitació del Windup:** increment de l'acció de control per sobre dels seus límits físics a causa del sumatori de l'acció integral.
 - ▶ Introduint una saturació a l'acció de control, si els límit físic de l'actuador són $[u_{min}, u_{max}]$, si $I_k < u_{min}$ o $I_k > u_{max}$, llavors $I_k = I_{k-1}$.
 - ▶ Introduir un extra feedback (realimentació) que inclou mesurar la sortida de l'actuador, si és possible, o per un model d'aquest (\tilde{u}_k).

$$I_k = I_{k-1} + k_c \frac{\Delta t}{T_i} e_k + k_c \frac{\Delta t}{T_r} (\tilde{u}_k - u_k)$$

a on T_r és una constant de temps que determina com de ràpid es fa el reset de l'acció integral, el seu valor ha de ser més petit que T_i però més gran que T_d en el cas que hi hagi acció derivativa. Un possible valor és $T_r = \sqrt{T_t \cdot T_d}$.

Més informació sobre PID's <https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom-ch6.pdf>

Característiques dels controladors PID digitals:

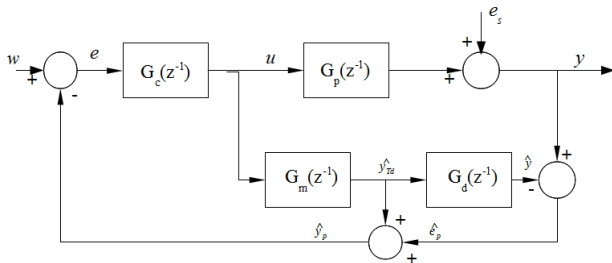
2. Dimensions de k_c

- ▶ En els controladors industrials k_c no té dimensions.
- ▶ k_c és adimensional quan y_{pv} i y_{sp} :
 - ▶ es donen en % del seu rang
 - ▶ tenen les mateixes unitats (mA, mV, ...)
- ▶ No és adimensional quan y_{pv} i y_{sp} no tenen les mateixes dimensions, en aquest cas es converteix internament en les unitats d'enginyeria que pertocin.

Característiques dels controladors PID digitals:

- 3. Compensació dels retards temporals** La majoria de controladors digitals incorporen l'opció de compensació de retards temporals.
 - ▶ Definició de *retard temporal*: el temps transcorregut entre el moment que es produeix un canvi en una variable d'entrada al procés i el moment que aquesta variable és observada en una de les variables de sortida del procés utilitzada pel control.
 - ▶ La presència de retards comporta retards de fase \implies inestabilitats en el llaç tancat
 - ▶ L'estructura més emprada per resoldre el problema és la del **predictor de Smith**, n'hi ha altres com: control PI predictiu i control per model intern (IMC)

Algorisme Predictor de Smith per compensar retards temporals:

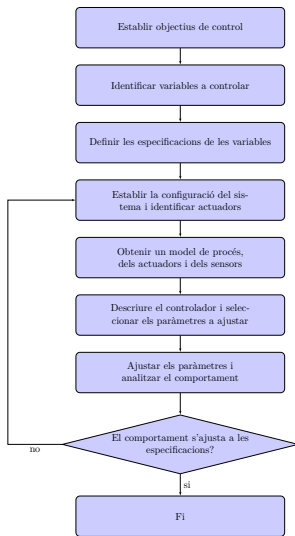


$$G_p(z^{-1}) \approx G_m(z^{-1})G_d(z^{-1}) \text{ amb } G_d(z^{-1}) = z^{-d}$$

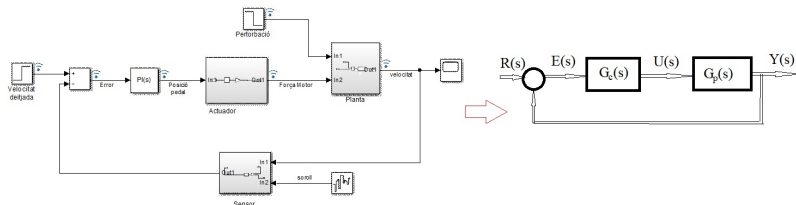
$$G_m(z^{-1}) = \frac{\text{num}(z^{-1})}{\text{den}(z^{-1})}$$

t_d és el retard $d = t_d/\Delta t$

Etapas pel disseny d'un sistema de control



Ajust de paràmetres: Síntesi directa



$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \xrightarrow{G_c?} \left(\frac{Y(s)}{R(s)} \right)_{esp} = W_{esp} = \frac{1}{\tau_{esp} s + 1} \text{ i } W_{esp} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p}$$

$$G_c = \frac{1}{G_p} \frac{W_{esp}}{1 - W_{esp}} \Rightarrow G_c = \frac{\tau s + 1}{k} \frac{1}{\tau_{esp} s} \Rightarrow G_c = \frac{\tau}{k \tau_{esp}} + \frac{1}{k \tau_{esp} s}$$

$$k_c = \frac{\tau}{k \tau_{esp}} \text{ i } k_i = \frac{1}{k \tau_{esp}}$$

Control adaptatiu:

- ▶ Exemple: control adaptatiu de la velocitat de creuer
 - ▶ És una forma intel·ligent de control que alenteix o accelera automàticament la velocitat de creuer per mantenir el ritme del cotxe que hi ha al davant.
 - ▶ El control de creuer determina la velocitat màxima.
 - ▶ Un sensor de radar permet avaluar quina és la distància al cotxe del davant i permet mantenir aquesta distància a 2, 3 o 4 segons.
 - ▶ El sistema es combina amb un sistema de prevenció que avisa quan comença la frenada.

https://www.youtube.com/watch?v=Mt_o_lri6e0

Models híbrids:

- ▶ Combinen subsistemes que inclouen models amb variables contínues i models d'esdeveniments discrets.

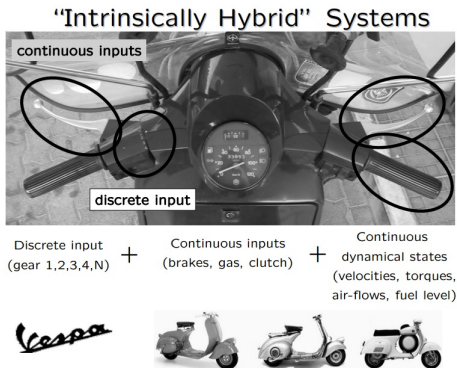
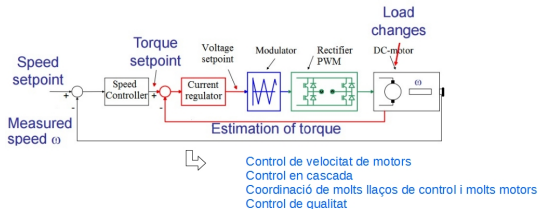
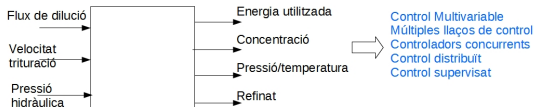


Figura extreta de <http://www.dii.unisi.it/hybrid/school07/pdf/08.Bemporad.pdf>

Exemples:

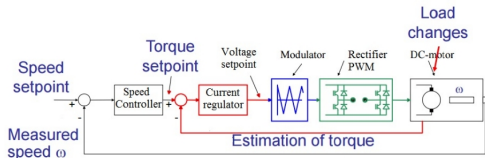
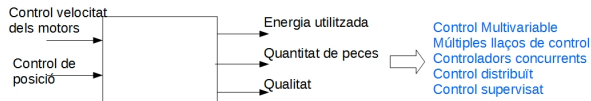
1. Fabricació del paper: <https://youtu.be/OiWwzwFAeSM?t=6> Dues etapes principals:

- ▶ Procés Termo-mecànic i refinat per obtenir la polpa
- ▶ Procés de secat



Exemples:

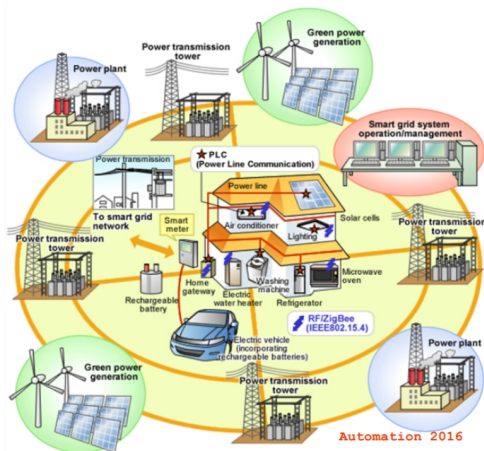
2. Producció de cotxes https://youtu.be/8_lfxPI50bM?t=16



- Control de velocitat de motors
Coordinació entre robots
Coordinació de la línia d'assemblatge
Control de qualitat

Exemples:

3. Smart power systems



Moltes unitats de petita potència
- Qualitat
- Mínims de transferència

Coordinació entre unitats
- Petites unitats controlades conjuntament
- Micro-xarxes

Xarxes locals i funcionament en illa

Comunicacions
Moltes dades: monitoring
Control combinacional
Control remot
Supervisió (SACADA)

Sistemes de gran escala
Rendiments
Cost

Figura extreta de http://www.iea.lth.se/aut/lectures/10_Automation_overview_Olsson.pdf

Elements claus en l'automatització de sistemes:

1. Sistemes sensorials: sensors de temperatura, flux, pressió, posició, inclinació, encòders, acceleració, visió, detectors de presència, de color, ...
2. Actuadors: servo motor, servo vàlvules, bombes, interruptors, sistemes d'alimentació de commutació, ...
3. Senyals i sistemes: sistemes de control, filtres de senyals, valors atípics (outlier), offset, tendències (drift), valors que falten, valors mitjans, nivells de soroll, ...
4. Monitoratge i supervisió: generació d'informes, coordinació, detecció d'avaries, optimització, ...
5. Comunicació: fàcils d'utilitzar, expansibles, segurs, confiables, estàndards oberts, ...

Sistemes SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) o software de monitoratge i control

Sistema de monitoratge: automatització del procés de vigilància dotat de mecanismes per avisar del bon o mal funcionament de la màquina o procés de fabricació, disposar d'una interacció amigable amb el procés i realitzar el registre continu de les variables del procés.

Objectius:

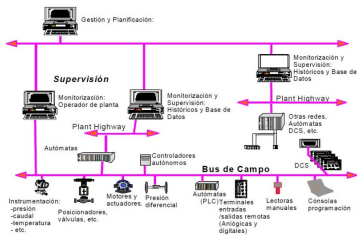
- ▶ Facilitar el seguiment del procés
- ▶ Millorar la interacció procés - operari
- ▶ Registrar l'evolució les variables del procés i detectar desviacions no desitjades, detecció d'avaries
- ▶ Analitzar les desviacions i deduir-ne el motiu, fer diagnòstic

Funcionalitats bàsiques dels sistemes SCADA:

- ▶ Adquirir i emmagatzemar dades en bases de dades
- ▶ Representació gràfica i animada de les variables del procés i monitoratge d'alarmes
- ▶ Control, actuant sobre els automates i reguladors autònoms (consignes, alarmes, menús, etc) o bé directament sobre el procés mitjançant E/S remotes
- ▶ Arquitectura oberta i flexible amb capacitat d'adaptació i ampliació
- ▶ Connectivitat amb altres aplicacions i bases de dades, locals o distribuïdes en xarxes de comunicació

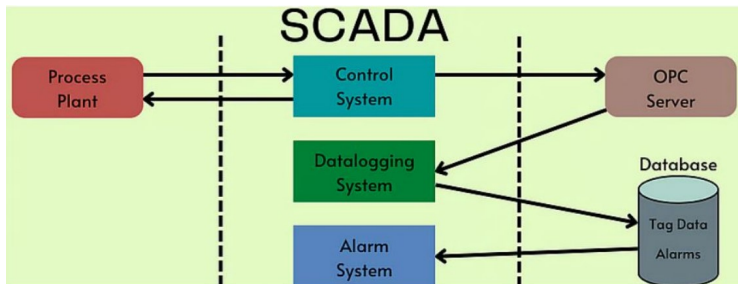
Adquisició de dades

- ▶ **Dispositius per adquirir dades:** PLCs, controladors de robot, targetes d'adquisició de dades (en processos de poques dades), ...
- ▶ **Bus de comunicació:** permeten la connexió entre dispositius organitzats en l'estructura mestre/esclau, té un protocol per intercanviar dades. Exemples: bus CAN, ethernet, profibus, ...
- ▶ **Sistemes de control distribuït (DCS):** mòduls d'E/S remotes que es comuniquen amb el dispositiu de control.



Emmagatzematge de dades: Bases de dades

- ▶ Cada variable de procés es representa per una etiqueta o 'tags' que permet definir la naturalesa de cada dada (analògica) o lògica (binària), associada a un nom, a un rang de valors, unitats i propietats (registre, alarma, ..)



Gràfiques i tendències

- ▶ Els sistemes de monitoratge es vinculen en bases de dades
- ▶ S'utilitzen bases de dades relacionals, definides amb un model de dades
- ▶ El SQL (Structured Query Language) és un dels llenguatges més utilitzats, permet treballar amb un volum gran de dades
- ▶ El registre continuat de dades permet recuperar-les posteriorment: visualització d'històrics, superposició de gràfiques, calcular mitjanes, verificació de relacions entre variables, visualitzar tendències, ...
- ▶ Un camp obert és l'automatització dels processos d'abstracció d'informació a partir dels històrics

Representació del procés: interfície gràfica d'operador o interfície home màquina (HMI o MMI)

Algunes consideracions útils:

- ▶ És una etapa fonamental
- ▶ Han de permetre una identificació immediata dels elements del procés amb una representació gràfica (sinòptics).
- ▶ La navegació per aquestes pantalles es fa emprant menús, desplegable i botons.

En els **sinòptics**:

- ▶ Mantenir la mateixa distribució en totes les pantalles
- ▶ Organitzar la representació tenint en compte la mateixa distribució física
- ▶ Informació numèrica dels elements representats
- ▶ Utilitzar colors de suport
- ▶ Fer servir intermitències per cridar l'atenció

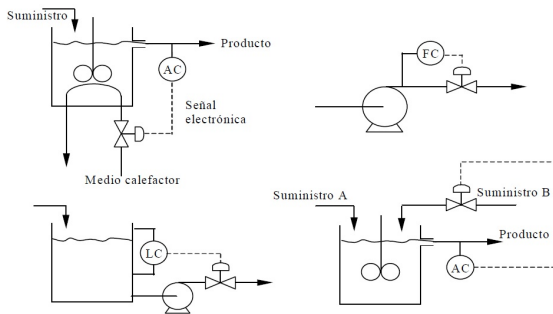
Creació de sinòtics

Significat habitual dels colors en entorns tecnològics:

ROJO	AMARILLO	VERDE	AZUL	PÚRPURA	BLANCO	GRIS	NEGRO
Peligro, Gas o líquido inflamable. Positivo en fuentes de alimentación. Carreteras, líneas telegráficas. Señalización de paro.	Circuitos de calefacción. Agentes oxidantes y elementos radioactivos. Precaución, aviso de peligro. Canalización de gas.	Rejas y jaulas de prot. eléct. Nitrógeno. Gas compr. Señalización de marcha y limpieza. Canalización de aceite. Permiso.	Colector de transistores. Precaución reparación. Material de protección en tuberías. Agua, mar.	Negativo en fuentes de alimentación. Radiaciones. Materiales valiosos.	Regulación de tráfico.	Líneas de alimentación alterna. Canalización de vapor.	Masas y referencias en sistemas eléctricos. Materiales corrosivos. Contornos geográficos.

Creació de sinòptics

Representació de processos instrumentalitzats segons la normativa ISA (Instrument Society of America):



Creació de sinòptics

Símbols utilitzats en la normativa ISA:

	1ª letra		Letras siguientes		
	Variable medida	Modificador (1)	Fón. de lectura pasiva	Función de salida	Modificador (1)
A	Analizador genérico	-	Alarma	-	-
B	Llama	-	Libre (2)	Libre (2)	Libre (2)
C	Conductividad	-	-	Control	-
D	Densidad peso esp.	Diferencial	-	-	-
E	Tensión (f.e.m.)	-	Elemento primario	-	-
F	Caudal	Relación	-	-	-
G	Calibre	-	Vidrio	-	-
H	Manual	-	-	-	Alto
I	Corriente	-	Indicador	-	-
J	Potencia	Exploración	-	Estación de control	-
K	Tiempo	-	-	-	-
L	Nivel	-	Luz piloto	-	-
M	Humedad	-	-	-	Intermedio
N	Libre (2)	-	Libre (2)	Libre (2)	Libre (2)
O	Libre (2)	-	Oficio	-	-
P	Presión o vacío	-	Punto de prueba	-	-
Q	Cantidad	Integración	-	-	-
R	Radiactividad	-	Registro	-	-
S	Velocidad/frecuenc.	Seguridad	-	Interruptor	-
T	Temperatura	-	-	Transmisor	-
U	Multivariable	-	Multifunción	Multifunción	Multifunción
V	Viscosidad	-	-	Válvula	-
W	Peso o fuerza	-	Vaina	-	-
X	Sin clasificar	-	Sin clasificar	Sin Clasificar	Sin clasificar
Y	No asignada	-	-	Relé u otros cálculos	-
Z	Posición	-	-	Elem. final control	-

(1) Los modificadores cambian el significado de la letra a la que siguen.

(2) Las letras libres son para cubrir designaciones no normalizadas.

Exemple de sinòptic

Fuente: ■ 13 ▾ Ancho: px Alto: px A ✕

Control emisiones CO2 aparcamiento



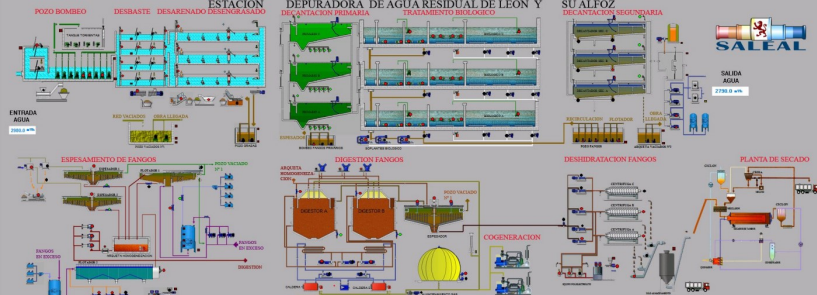
Sinòptic SCADA Seinon

registra:

- Temperatures
- CO2
- ocupació
-

Exemple de sinòptic

SCADA Becolve : Estació depuradora

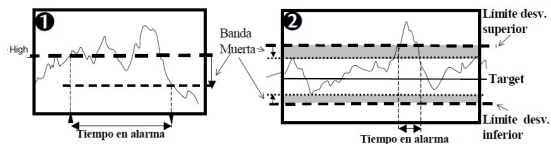


Alarmes: Situacions anormals

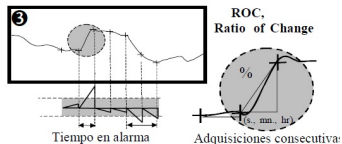
- ▶ Desviacions en magnitud d'una variable superior o inferior a uns límits preestablerts.
- ▶ Tenen per objectius avisar a l'operari.
- ▶ Són útils si l'operador sap quina resposta donar quan s'activa
- ▶ Aquelles situacions que no requereixen l'atenció de l'operari no cal que generin alarma, poden quedar registrades com a incidències.

Alarm History		
Filter Alarms	Change Columns	Email PDF
Activation Time	Tag Name	Message
05/24/2011 15:07:00	Ble_0210_Com_Fail	02-10 Communications have Failed!!!!
05/24/2011 15:07:00	Ble_0210_Com_Fail	02-10 Communications have Failed!!!!
05/24/2011 15:07:00	Ble_0429_Com_Fail	04-29 Communications have Failed!!!!
05/24/2011 15:07:00	Ble_0210_Com_Fail	02-10 Communications have Failed!!!!
05/24/2011 14:05:29	Ble_0210_XA300B_Alarm	K-300 Compressor Run Status
05/24/2011 14:05:29	Ble_0210_XA300B_Alarm	K-300 Compressor Run Status
05/24/2011 14:05:29	Ble_0210_XA300B_Alarm	K-300 Compressor Run Status
05/24/2011 10:35:04	Ble_0429_LAHH1200_Alarm	V-120 Treater 1 Level Hi Hi
05/24/2011 10:35:04	Ble_0429_LAHH1200_Alarm	V-120 Treater 1 Level Hi Hi
05/24/2011 09:57:05	Ble_0210_LAH1010B_Alarm	02-10 HP Sep Level Hi (Panic Dump)
05/24/2011 09:57:05	Ble_0210_LAH1010B_Alarm	02-10 HP Sep Level Hi (Panic Dump)
05/24/2011 09:57:05	Ble_0210_LAH1010B_Alarm	02-10 HP Sep Level Hi (Panic Dump)
05/24/2011 09:22:24	BX_0314_FT100_FlowRate	Dellatrix Ferrier 04-11-45-10 WSM Flow Rate Low
05/24/2011 09:22:20	BX_0314_LSHH102	04-11 Tank Level Hi Hi
05/24/2011 09:22:20	BX_0314_LSHH102	04-11 Tank Level Hi Hi
05/24/2011 09:22:20	BX_0314_LSHH102	04-11 Tank Level Hi Hi
05/23/2011 22:18:22	Ble_0210_LAH1010B_Alarm	02-10 HP Sep Level Hi (Panic Dump)

Alarmes: Situaciones anormals



· Alarma por superación de umbral absoluto (1) y relativo (2)



Activación de alarma por velocidad de cambio (ROC)

Gestió i registre d'alarmes

Gestió d'alarmes:

- ▶ Creixement multiplicatiu en funció de les variables
- ▶ Els sistemes de monitoratge disposen de mecanismes per filtrar alarmes
- ▶ El més normal és donar un ordre de prioritat, el mecanisme de filtratge activa l'alarma en funció de la seva prioritat.

Registre d'esdeveniments temporals:

- ▶ Instant en què s'activa una alarma
- ▶ Instant en què desapareix
- ▶ Reconeixement de l'alarma per part de l'operari via la interfície gràfica.

Problemàtica de les alarmes

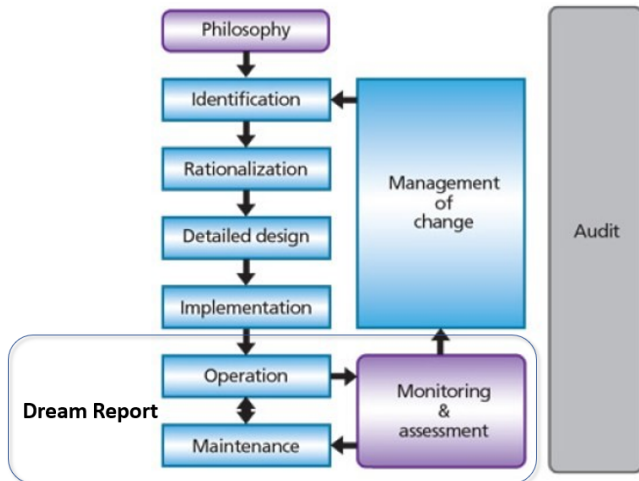
En els sistemes SCADA actuals hi ha **MOLTES ALARMES**

- ▶ El desordre del sistema d'alarmes no permet obtenir informació significativa
- ▶ Tantes alarmes fa que l'operari les ignori
- ▶ Es poden perdre alarmes importants

Problemàtica:

- ▶ Alarmes sobre condicions que l'operari ja coneix
- ▶ Alarmes que no requereixen resposta de l'operari
- ▶ Alarmes amb prioritats incorrectes
- ▶ Alarmes redundants
- ▶ Alarmes que s'envien a persones equivocades

Norma ISA 18.2 Directrius d'alarmes i la seva gestió ¹



¹ANSI/ISA 18.2 Alarm Management Alarm Analysis Reports and Dashboards by Dream Report

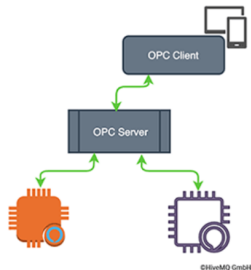
Protocols de comunicació ²

El protocol més comú en entorns productius és el OPC UA.

- ▶ Arquitectura client/servidor
- ▶ Implementacions complexes quan cal connectar dispositius heterogenis de diferents fabricants

MQTT és una alternativa a OPC UA

- ▶ Protocol de missatgeria estàndard OASIS per a IoT
- ▶ Senzill d'implementar



²Per a més informació: [A Comparison of OPC UA and MQTT Sparkplug](#)

Sistemes SCADA comercials

Com escollir un SCADA?

- ▶ Sistema operatiu
- ▶ Integració amb altres aplicacions
- ▶ Solució global a la gestió: generació d'informes, gestió de magatzems, comandes i compres,...

Alguns exemples:

- ▶ Inductive
- ▶ Predix HMI / SCADA
- ▶ PROMOTIC SCADA/HMI
- ▶ ...

Detecció d'avaries

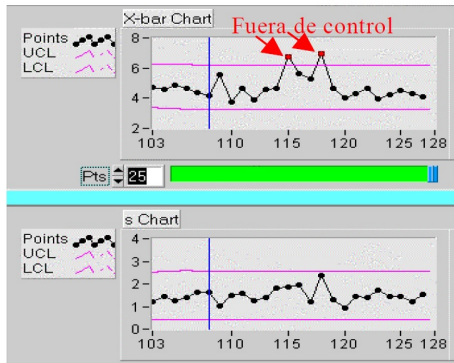
Un aspecte important dels sistemes SCADA és la detecció i el diagnòstic de les avaries d'un sistema/màquina.

- ▶ Hi ha sistemes SCADA que sols generen alarmes
- ▶ Altres poden incorporar tècniques més complexes que permetin generar alarmes i, a més a més, indicar que falla de la màquina.

Hi ha diferents mètodes i tècniques per **detectar** situacions de funcionament incorrecte. Es classifiquen en:

- ▶ Detecció basada en models: comparació del funcionament del sistema supervisat amb un model d'aquest.
- ▶ Detecció basada en senyals i símptomes: les avaries es detecten directament a partir dels senyals del procés després de ser processades.

Detecció d'avaries utilitzant senyals



Síntomes

Senyals

Tècniques estadístiques

Probabilitats

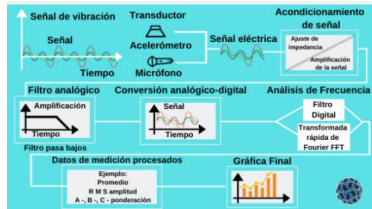
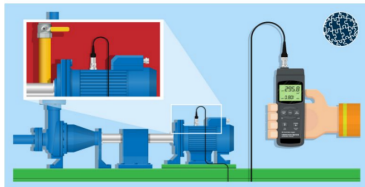
Anàlisi temporal

Anàlisi freqüencial

Reconeixement de patrons

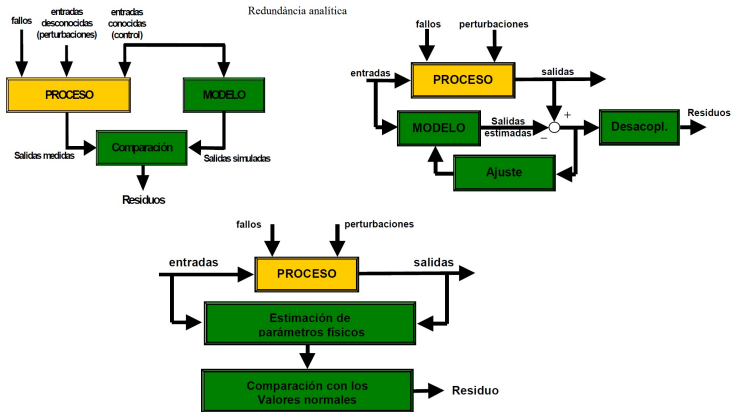
Exemple de detecció basada en senyals

Anàlisi de vibracions en màquines rotatives ¹



¹¿Qué es el análisis de vibraciones en mantenimiento?

Detecció d'avaries utilitzant models analítics



Detecció d'avaries utilitzant models basats en el coneixement

- ▶ Utilitzen eines de la intel·ligència artificial (IA)
- ▶ Per representar el coneixement s'utilitzen models qualitius
- ▶ Els models qualitius combinen eines de processament de senyals amb eines d'IA: quantificadors, tendències, finestres temporals, episodis, ...
- ▶ La detecció es fa detectant discrepàncies entre el procés real i l'esperat.

Diagnòstic d'avaries

El diagnòstic consisteix a determinar l'origen i la magnitud d'una avaria. Una vegada detectada una avaria, cal conèixer la causa.

- ▶ Pel diagnòstic d'avaries es requereix establir correspondències entre els símptomes o residus i l'origen de les avaries. Relació causa-efecte.
- ▶ S'utilitzen eines més o menys complexes: mètodes estadístics i mètodes procedents de la IA com poden ser els sistemes experts i el raonament difús.

Diagnòstic d'avaries: mètodes estadístics

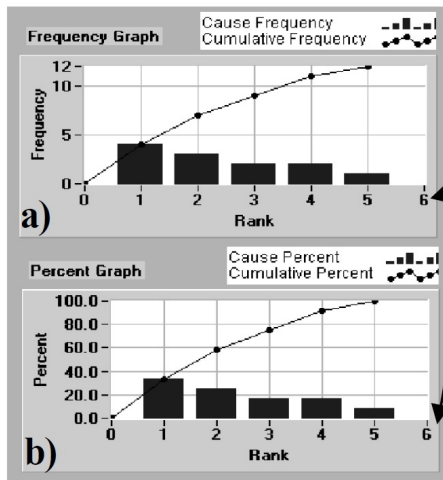


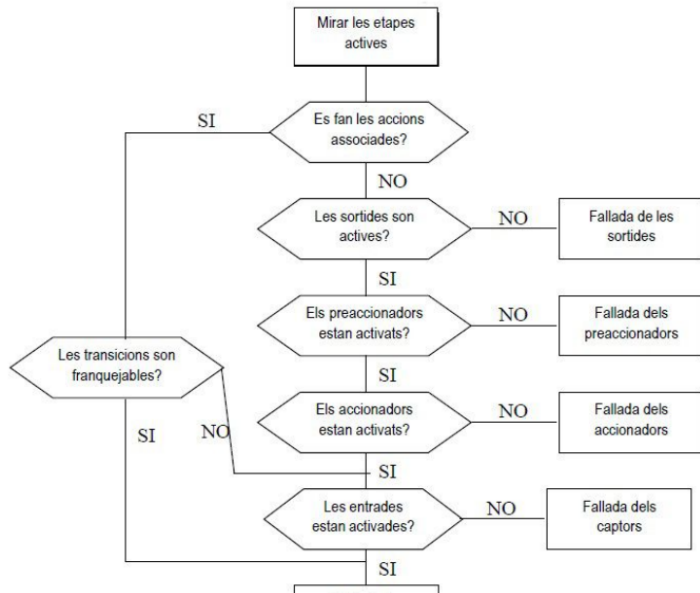
Diagrama de Pareto

NUM:	CAUSAS:
1	Fallo soldadura
2	Pieza girada
3	Componente equivoc.
4	Falta componente
5	Otros

Diagnòstic d'avaries: mètodes d'IA

- ▶ Coneixement mitjançant lògica
- ▶ Llistes, taules i arbres de decisió
- ▶ Grafs causals
- ▶ Lògica difusa
- ▶ Sistemes experts
- ▶ Xarxes Neuronals: aprenentatge
- ▶ Raonament basat en casos

Diagnostic basat en arbre de desició a partir d'un model DES



Seguretat en les instal·lacions automatitzades

Objectiu de la seguretat: crear un entorn segur que protegeixi a les persones respecte a les màquines, i que també protegeixi a les màquines i el medi ambient contra possibles usos incorrectes de part de les persones.

Seguretat



PERILL

Protecció

Protegir màquines i sistemes respecte manipulacions i accessos no autoritzats Ciberatacs.



PERILL

Qui té permisos i per què?
Problemàtica en processos d'accés remot!

Gestió del risc

L'**objectiu de la gestió del risc** en els processos és protegir: persones, propietats i medi ambient – > Reduir accidents.

- ▶ **Fiabilitat (Reliability)**: Capacitat de funcionar segons el previst, sense fallades, durant un interval de temps especificat i en condicions especificades.
- ▶ **Disponibilitat (Availability)**: La capacitat d'un element d'estar en condicions de realitzar una funció requerida en condicions especificades en un moment determinat o durant un interval de temps especificat.
- ▶ **Mantenibilitat (Maintainability)**: Capacitat de mantenir o restaurar l'estat operatiu requerit en determinades condicions d'ús i manteniment.
- ▶ **Seguretat (Safety)**: Absència de riscos inacceptables.

Les tres primeres és un objectiu dels sistemes de control, per a l'última cal un sistema de seguretat.

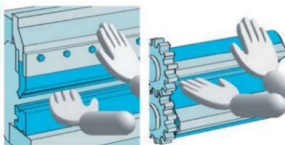
Causes d'accidents en els llocs de treball

- ▶ **Factors humans:** excés de confiança, mesures de seguretat inadequades, fatiga i cansament, incorrecte seguiment dels procediments, condicions de treball estressants, precarietat laboral, distraccions, ...
- ▶ **Factors dependents de la màquina:** mesures de seguretat inadequades, sofisticats sistemes de control i supervisió, perills inherents a la mateixa màquina (moviments de laterals, arrencades i aturades imprevistes), fallades i/o funcionaments defectuosos, ...
- ▶ **Factors dependents de la planta:** flux de persones, màquines de diferents constructors amb tecnologies diferents, flux de material o productes entre màquines,...

Perills dependents de la màquina

Perills: Situacions amb perill **potencial** per a persones, medi ambient o material ¹

Mechanical hazards



Puncturing, stabbing, shearing, severing, cutting

Catching, entanglement, drawing in, trapping

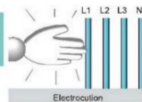


Impact



Crushing

Electrical hazards



Electrocution

Physio chemical hazards



Discharge of dangerous substances



Burns

¹Seguridad de personas y máquinas

Avaluació dels perills

Els perills s'han d'avaluar per màquines o conjunt de màquines si aquestes treballen com una sola màquina. Exemples:



Màquina individual

Laminadora



Embalatge i empaquetat



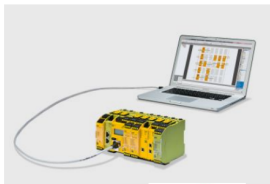
Cel·la robotitzada



Components de seguretat

Són aquells que, sense contribuir al treball de la màquina, estan destinats a protegir a les persones que treballen amb ella.

- ▶ Reduir o evitar l'exposició al risc, realitzen una funció de seguretat.
- ▶ Evitar que una fallada i/o funcionament defectuós posi en perill la seguretat de les persones
- ▶ Una avaria no pot comportar mai la pèrdua de la funció de seguretat.



Components de seguretat. Exemples de resguards

Resguards perimetral físic

- ▶ Quan no cal interacció home-màquina



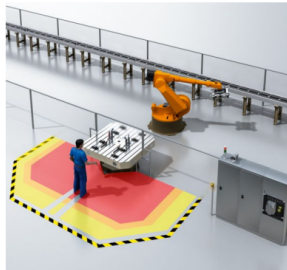
Resguards mixt físic - immaterials

- ▶ Si es requereix l'entrada del material



Resguards virtuals amb escàners

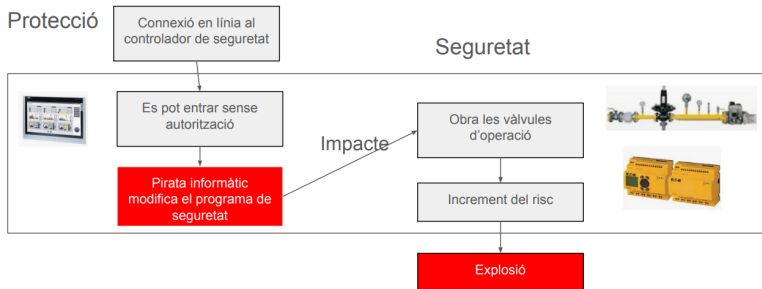
- ▶ Si es requereix un accés constant de l'operari



Directiva de màquines 2022 - 2026

La nova directiva incorpora les proteccions per **ciberatacs**.

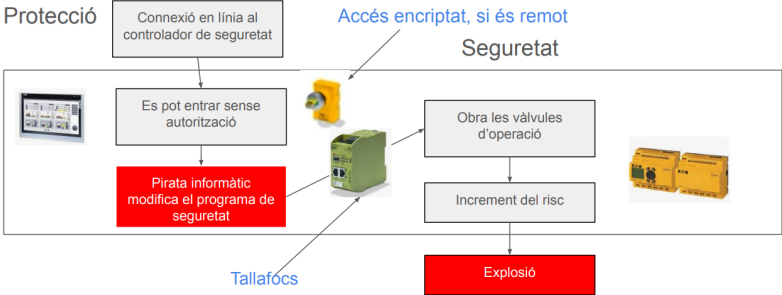
Exemple de l'impacte d'un pirata accedint a funcions de seguretat d'una instal·lació.



Directiva de màquines 2022 - 2026

La nova directiva incorpora les proteccions per **ciberatacs**.

Exemple de l'impacte d'un pirata accedint a funcions de seguretat d'una instal·lació.

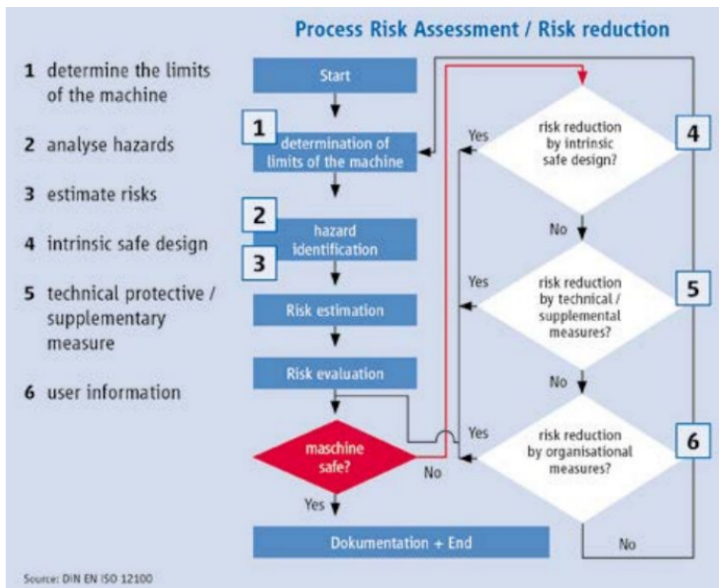


Normativa actual EN ISO 12100: Reducció del risc

Objectiu: eliminar qualsevol risc al llarg de la vida útil previsible de la màquina, incloses les fases de transport, muntatge, desmuntatge, desactivació i desmuntatge.

- ▶ **Disseny inherentment segur**, per exemple: reduir la potència, evitar interferències a la zona de perill.
- ▶ **Protecció i mesures protectores** complementàries per evitar que les persones entrin en contacte amb els perills. Per exemple: tancaments, cortines fotoelèctriques o dispositius de comandament.
- ▶ **Informar** sobre com es pot utilitzar la màquina amb seguretat. Per exemple, mitjançant manuals i cartells.

Normativa actual EN ISO 12100: Avaluació de risc en màquines



Normativa actual EN ISO 12100: Estimació del risc en màquines

- ▶ Persones exposades
- ▶ Tipus, freqüència i durada de l'exposició
- ▶ Relació entre exposició i efectes
- ▶ Factors humans
- ▶ Mesures de protecció
- ▶ Probabilitat d'anul·lar o burlar la mesura de protecció
- ▶ Informació a l'usuari
- ▶ Contemplar totes les fases de vida de la màquina

El càlcul de les funcions de seguretat associades a sistemes de control de seguretat ens els dona:

- ▶ PL: ISO 13849-1
- ▶ SIL (Safety integrity level) o nivell d'integritat de seguretat: ICE 62061
- ▶ HRN (hazard rating number) o valoració del risc: EN14121
- ▶ ARMONY (Hazard Rating for Machinery and prOcess iNdustry): ISO 12100:2020Tipus, freqüència i durada de l'exposició