COPPE UFRJ
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital nº 54 de 30 de janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO : MEC-5

1. FUNDAMENTOS DE CONTROLE (TEMA 5)

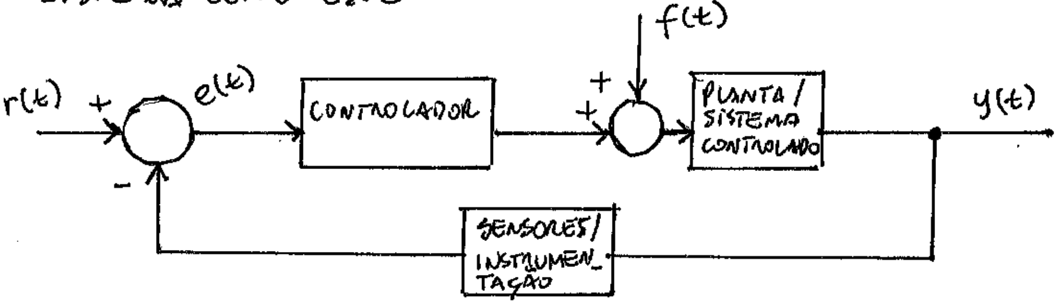
EM GERAL, O OBJETIVO DE CONTROLAR UM SISTEMA MECÂNICO ENVOLVE REDUZIR A SENSIBILIDADE A PERTURBAÇÕES, MELHORAR SUA ESTABILIDADE, REJEITAR RUÍDOS E AUMENTAR PRECISÃO.

NESSE SENTIDO, UM CONCEITO CENTRAL É O DE REALIMENTAÇÃO (FEEDBACK), QUE CONSISTE EM MEDIR A SAÍDA E UTILIZÁ-LA PARA AJUSTAR A ENTRADA, ISTO É, A AÇÃO DO CONTROLADOR DEPENDE DO ESTADO DO SISTEMA.

EXISTEM DOIS TIPOS DE REALIMENTAÇÃO, A POSITIVA E A NEGATIVA. A REALIMENTAÇÃO POSITIVA POSSUI UMA AÇÃO DESESTABILIZADORA, PORTANTO, EM GERAL, PARA SISTEMAS MECÂNICOS PROCURA-SE UTILIZAR SISTEMAS DE CONTROLE COM REALIMENTAÇÃO NEGATIVA.

O MAIOR BENEFÍCIO DA REALIMENTAÇÃO NEGATIVA SE DÁ QUANDO APLICADA A CONTROLADORES DE GANHO ELEVADO. NESSE CENÁRIO, A REALIMENTAÇÃO TORNA O SISTEMA INSENSÍVEL A RUÍDOS, ISTO É, VARIAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS DA PLANTA (SISTEMA MECÂNICO CONTROLADO) NÃO SE REFLETEM NA SAÍDA.

ADICIONALMENTE, SISTEMAS DE CONTROLE TIPICAMENTE SÃO REPRESENTADOS POR DIAGRAMAS DE BLOCOS. ABAIXO ENCONTRA-SE UMA REPRESENTAÇÃO GENÉRICA QUE LEVA EM CONTA AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA COMO ESSE:

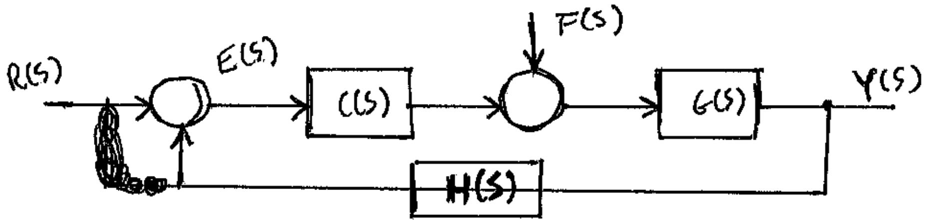


ONDE $r(t)$ REPRESENTA A ENTRADA, $e(t)$ REPRESENTA O ERRO ENTRE A ENTRADA E A SAÍDA, $f(t)$ REPRESENTA UM DISTÚRBIO EXTERNO, E $y(t)$ REPRESENTA A SAÍDA.

PARA SISTEMAS LINEARES INVARIANTES NO TEMPO, CADA COMPONENTE DO SISTEMA PODE SER REPRESENTADO POR UMA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA (F.T.) CARACTERIZADAS NO DOMÍNIO DE LAPLACE ($s = \sigma + j\omega$), POIS O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO É VÁLIDO.

AQUI DISCUTIREMOS FUNDAMENTOS RELACIONADOS A ESSE TIPO DE SISTEMA. PARA ANÁLISE DE SISTEMAS VARIANTES NO TEMPO E SISTEMAS NÃO LINEARES, TÉCNICAS MAIS SOFISTICADAS PRECISAM SER LEVADAS EM CONTA.

PORTANTO, A REPRESENTAÇÃO EM BLOCOS PODE SER REESCRITA COMO:



NESSE SENTIDO, É POSSÍVEL DEFINIR 3 QUANTIDADES IMPORTANTES PARA A ANÁLISE DESSES SISTEMAS:

- FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE RAMO DIRETO: $\dfrac{Y(S)}{E(S)} = C(S)\,G(S)$
- FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MALHA ABERTA: $\dfrac{X(S)}{E(S)} = C(S)\,G(S)H(S)$
- FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MALHA FECHADA:

$$\frac{Y(S)}{R(S)} = \frac{\text{F.T. RAMO DIRETO}}{1 + \text{F.T. MALHA ABERTA}} = \frac{C(S)G(S)}{1 + C(S)G(S)H(S)}$$

PERCEBA QUE NESSE CASO FOI CONSIDERADO QUE, F(S), O DISTÚRBIO É NULO. PARA ANALISAR A INFLUÊNCIA DO DISTÚRBIO, FAZ-SE $R(S) = 0$, E O QUE MUDA É A F.T. DE RAMO DIRETO, QUE NESSE CASO É APENAS G(S):

$\dfrac{Y(S)}{F(S)} = G(S)$. ISSO MUDA A F.T. DE MALHA FECHADA PARA: $\dfrac{Y(S)}{R(S)} = \dfrac{G(S)}{1 + C(S)G(S)H(S)}$.

A VANTAGEM DE UTILIZAR A ABORDAGEM NO DOMÍNIO DE LAPLACE É O FATO DE NÃO PRECISAR COMPUTAR CONVOLUÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO, DE FORMA QUE $c(t) \underset{\text{OPERADOR CONVOLUÇÃO}}{*} g(t)$ NO DOMÍNIO DE LAPLACE SE TORNA $C(S)\,G(S)$, UMA SIMPLES MULTIPLICAÇÃO DE FUNÇÕES

A ABORDAGEM NO DOMÍNIO DE LAPLACE TAMBÉM FACILITA A ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SISTEMA DE CONTROLE. A ESTABILIDADE É UM CONCEITO ESSENCIAL NA ÁREA DE CONTROLE, DE FORMA QUE PARA HAVER CONTROLE, É NECESSÁRIO QUE O SISTEMA SE MANTENHA ESTÁVEL E BEM COMPORTADO.

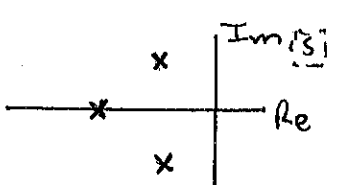
OS MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE SE BASEIAM NA ANÁLISE DOS POLOS E ZEROS DAS MALHAS DO SISTEMA. UMA F.T. PODE SER DEFINIDA COMO UMA PARCELA DO NUMERADOR E UMA PARCELA DE DENOMINADOR:

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)},$$

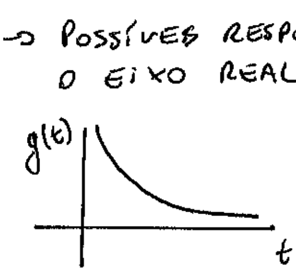
OS POLOS SÃO AS RAÍZES DO POLINÔMIO DO DENOMINADOR QUANDO O MESMO É NULO, $D(s)=0$. JÁ OS ZEROS SÃO AS RAÍZES DO POLINÔMIO DO NUMERADOR QUANDO O MESMO É ZERO, $N(s)=0$. A LOCALIZAÇÃO DOS POLOS NO PLANO COMPLEXO DE LAPLACE DETERMINAM A ESTABILIDADE DO SISTEMA, ENQUANTO OS ZEROS MODIFICAM A POSIÇÃO DOS POLOS.

UM SISTEMA SER ESTÁVEL SIGNIFICA TER UMA ENTRADA LIMITADA RESULTANDO EM UMA SAÍDA LIMITADA (COM UM INTERVALO FINITO ENTRE MÁXIMO E MÍNIMO). PORTANTO, 3 CASOS POSSÍVEIS EMERGEM:

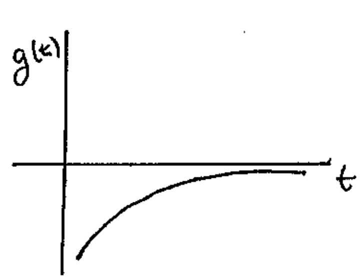
(I): POLOS DE $G(s)$ NO SEMIPLANO ESQUERDO (ESTÁVEL):



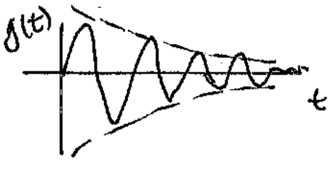
→ POSSÍVEIS RESPOSTAS PARA O POLO LOCALIZADO SOBRE O EIXO REAL (X):



OU



→ RESPOSTA DO CASO EM QUE OS POLOS SÃO COMPLEXOS CONJUGADOS (X):

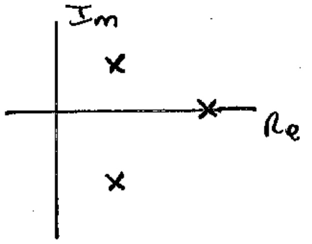


COPPE UFRJ

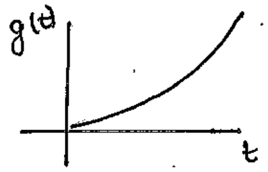
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital n° 54 de 30 de janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO : MEC-5

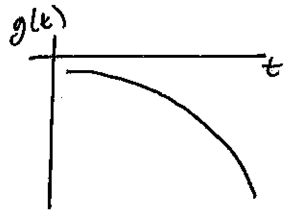
(II): POLOS DE $G(s)$ NO SEMIPLANO DIREITO (INSTÁVEL):



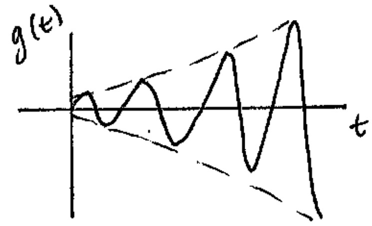
→ POSSÍVEIS RESPOSTAS PARA O POLO SOBRE O EIXO REAL (X):



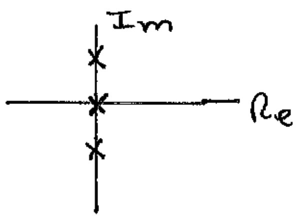
OU



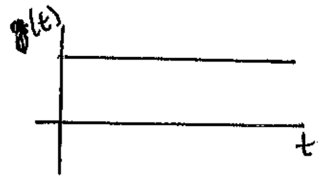
→ RESPOSTA PARA O CASO DOS POLOS COMPLEXOS CONJUGADOS (X):



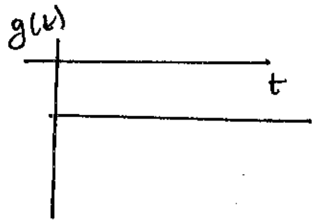
(III): POLOS DE $G(s)$ SOBRE O EIXO IMAGINÁRIO ($j\omega$):



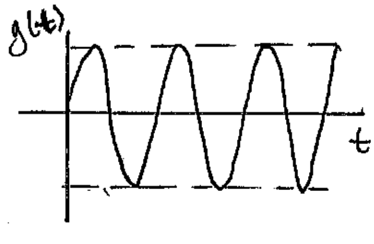
→ POSSÍVEIS RESPOSTAS PARA O POLO SOBRE O EIXO REAL (X):



OU

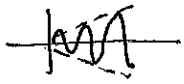


→ RESPOSTA PARA O CASO DOS POLOS COMPLEXOS CONJUGADOS (X):



NESTE CASO, O SISTEMA PODE SER INSTÁVEL OU ESTÁVEL DEPENDENDO DO FORÇAMENTO APLICADO. POR EXEMPLO, ESSE TERCEIRO CASO SE ENQUADRA EM UM OSCILADOR HARMÔNICO SEM DISSIPAÇÃO, SE APLICARMOS UM FORÇAMENTO SENOIDAL $f(t) = \sin(wt)$ E IGUALARMOS $w_n = w$ (FREQ. NATURAL = FREQ. DE FORÇAMENTO) OBTEMOS UMA RESPOSTA OSCILATÓRIA CRESCENTE EM RAMPA (RESSONÂNCIA). EM OUTROS CASOS, $w_n \neq w$ ISSO NÃO OCORRE, SE MANTENDO ESTÁVEL:

$$Y(s) = G(s)X(s) = \frac{w}{(w^2+s^2)^2} \rightarrow \mathcal{L}^{-1}\{Y(s)\} = \underbrace{\frac{t}{2}}_{\text{RAMPA}} \overbrace{\sin(wt)}^{\text{OSCILAÇÃO}}$$

↳ 

EXISTEM DIVERSOS CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE PARA SISTEMAS DE CONTROLE BASEADOS NO CONCEITO PREVIAMENTE APRESENTADO. DE FORMA BREVE, ABAIXO ENCONTRA-SE UM RESUMO DOS PRINCIPAIS:

- Critério de Routh: UTILIZADO PRINCIPALMENTE PARA AVALIAR FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA CUJO DENOMINADOR POSSUI UM POLINÔMIO DE GRAU ELEVADO, POIS FACILITA O PROCESSO DE AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE. O CRITÉRIO ~~[illegible]~~ ESTABELECE QUE PARA O SISTEMA SER ESTÁVEL:

  (I): TODOS OS COEFICIENTES DO POLINÔMIO FOREM DE MESMO SINAL;

  (II): TODOS OS ELEMENTOS DA PRIMEIRA COLUNA DA TABELA DE ROUTH FOREM POSITIVOS.

  O PROCESSO DE MONTAGEM DA TABELA DE ROUTH CONSISTE EM:

  DADO UM POLINÔMIO $a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$,

  A TABELA SERÁ:

$$\begin{array}{c|cccc}
s^n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \cdots \\
s^{n-1} & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \cdots \\
\hline
s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & \cdots \\
s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & \cdots \\
\vdots & \vdots & & & \\
s^1 & e_1 & & & \\
s^0 & f_1 & & &
\end{array}$$

ONDE
$$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_n}$$
$$b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_n}$$
$$\vdots$$
$$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1}$$
$$c_2 = \frac{b_1 a_{n-4} - a_{n-1} b_3}{b_1}$$
$$\vdots$$
E ASSIM POR DIANTE.

ADICIONALMENTE, CASO HAJA TROCA DE SINAL NA PRIMEIRA COLUNA E O SISTEMA FOR INSTÁVEL, O NÚMERO DE RAÍZES NO SEMIPLANO DIREITO DE S É IGUAL O NÚMERO DE TROCA DE SINAIS NA PRIMEIRA COLUNA.

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital nº 54 de 30 de janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO: MEC - 5

- MÉTODO DO LUGAR DAS RAÍZES: O MÉTODO TEM POR OBJETIVO AVALIAR A ESTABILIDADE EM MALHA FECHADA, INDICANDO COMO OS POLOS DE MALHA ABERTA DEVEM SER MODIFICADOS PARA ATENDER OS REQUISITOS DE PROJETO. FEITO EM ANÁLISE PELA FREQUÊNCIA.

PARA UMA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA EM MALHA ABERTA; $G(S)H(S) = -1$, TEM-SE QUE O MÓDULO DA MESMA É $|G(S)H(S)| = 1$ E A FASE $\angle G(S)H(S) = \pm(2r+1)180°$, $r = 1, 2, \ldots$

COM ISSO, É POSSÍVEL AVALIAR COMO A MUDANÇA EM UM PARÂMETRO K, DO SISTEMA, INFLUENCIA A ESTABILIDADE EM MALHA FECHADA, SEGUINDO OS SEGUINTES PASSOS:

(I): ESCREVE-SE A F.T. DE MALHA ABERTA NA FORMA: $1 + K\frac{N(S)}{D(S)} = 0$.

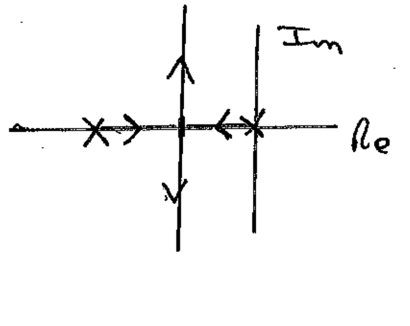
(II): ZEROS E POLOS SÃO MARCADOS NO PLANO COMPLEXO, ONDE $n_p \geq n_z$. SENDO n_p E n_z NÚMERO DE POLOS E NÚMERO DE ZEROS.

(III): TRAÇAM-SE OS RAMOS QUE INDICAM A LOCALIZAÇÃO DOS POLOS À MEDIDA QUE K VARIA. O NÚMERO DE RAMOS É IGUAL A n_p, ONDE n_z DESTES COMEÇAM EM POLOS E TERMINAM EM ZEROS.

(IV): OS RAMOS QUE NÃO CONVERGEM PARA ZEROS SEGUEM ASSÍNTOTAS QUE POSSUEM ÂNGULO DE $\alpha = \pm 180°(2r+1)/(n_p - n_z)$. O PONTO DE ENCONTRO DAS MESMAS É LOCALIZADO EM $s_c = (\sum_i p_i - \sum_j z_j)/(n_p - n_z)$.

(V): COM ISSO DETERMINAM-SE OS RAMOS SEGUINDO AS SEGUINTES REGRAS: ZEROS "ATRAEM" RAMOS E POLOS "REPELEM RAMOS", COMO MOSTRADO NOS EXEMPLOS A SEGUIR.

- RAMOS ENTRE DOIS POLOS:

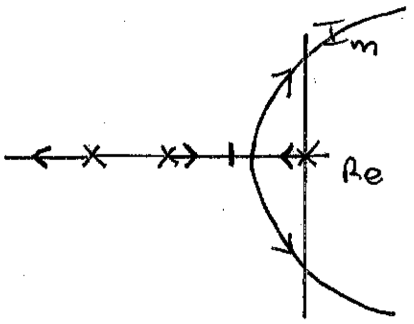


COPPE UFRJ

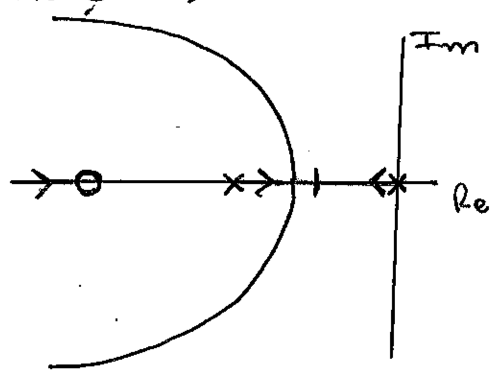
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital nº 54 de 30 de Janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO : MEC-5

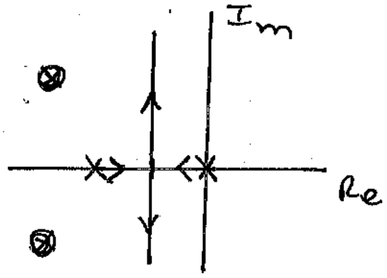
- ADIÇÃO DE UM POLO:



- ADIÇÃO DE UM ZERO:



- ADIÇÃO DE ZEROS OU POLOS COMPLEXOS CONJUGADOS:



→ NÃO AFETAM O LUGAR DAS RAÍZES POIS SÃO SIMÉTRICOS NO EIXO REAL.

• <u>CRITÉRIO DE NYQUIST</u>: NESTE CASO, DETERMINA-SE A ESTABILIDADE DE MALHA FECHADA COM BASE NA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA MALHA ABERTA. PARA A F.T. DE MALHA ABERTA ESTUDA-SE O DIAGRAMA POLAR. O CRITÉRIO DIZ QUE:

$Z = N + P$, SENDO

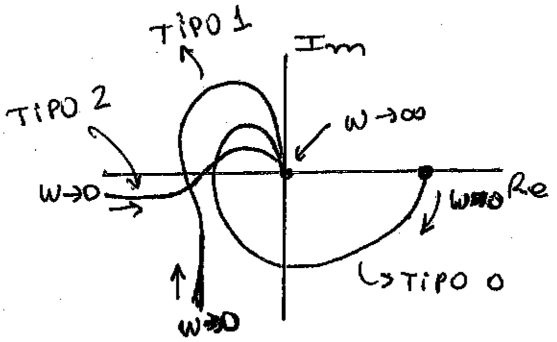
$Z \Rightarrow n_p$ DE MALHA FECHADA NO SEMIPLANO DIREITO ENVOLTOS PELO DIAGRAMA POLAR.

$N \Rightarrow$ NÚMERO DE VOLTAS QUE O DIAGRAMA FAZ EM TORNO DE -1 NO SENTIDO HORÁRIO (Obs: -1 POIS SE ESTUDA A PARCELA $G(s)H(s)$ DA MALHA ABERTA, AO INVÉS DE $G(s)H(s) - 1 = 0$).

$P \Rightarrow$ NÚMERO DE POLOS DE MALHA ABERTA ENVOLTOS PELO DIAGRAMA.

CASO $Z > 0$, O SISTEMA É INSTÁVEL.

NESSE CONTEXTO, ABAIXO ESTÃO ILUSTRADOS A FORMA DE DIAGRAMAS POLARES PARA SISTEMAS TIPO 0, TIPO 1, E TIPO 2, COM SEUS RESPECTIVOS ÂNGULOS INICIAIS PARA $w=0$ OU $w \to 0$.



~~OUTRO MÉTODO DE ANÁLISE ENVOLVE AS CARTAS DE NICHOLS, QUE REPRESENTAM A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM UM DIAGRAMA $|G(jw)|$ VS $\angle G(jw)$. NESTE CASO, É POSSÍVEL IDENTIFICAR~~

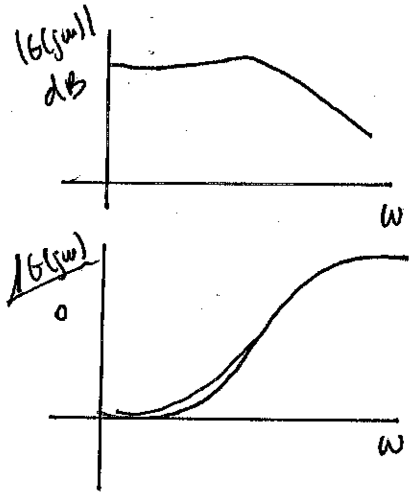
- MÉTODOS DE ANÁLISE NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA

EM GERAL, NO CAMPO DE CONTROLE, É COMUM REALIZAR ANÁLISES NO DOMÍNIO DO TEMPO E NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA PARA DIFERENTES PROPÓSITOS.

A ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO USUALMENTE É UTILIZADA PARA ESTUDAR RESPOSTAS TRANSITÓRIAS DE UM SISTEMA/SUBSISTEMA AO SER SUBMETIDO A UM ESTÍMULO ESPECÍFICO COMO IMPULSO, DEGRAU OU RAMPA, POR EXEMPLO.

TEM-SE POR OBJETIVO AVALIAR CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS COMO O TEMPO DE SUBIDA, ERRO EM REGIME PERMANENTE, TEMPO DE PICO TEMPO DE ACOMODAÇÃO E MÁXIMO SOBRESSISTEMA.

ALTERNATIVAMENTE, ANÁLISES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA PROCURAM AVALIAR A RESPOSTA DO SISTEMA ~~[illegible]~~ SUBMETIDOS A ESTÍMULOS SENOIDAIS EM REGIME PERMANENTE. PARA ISSO, SÃO UTILIZADOS DIAGRAMAS DE BODE E CARTAS DE NICHOLS COM O OBJETIVO DE AVALIAR PICOS DE RESSONÂNCIA E FASE. À MEDIDA QUE SE ~~[illegible]~~ VARIA A FREQUÊNCIA, E ~~[illegible]~~ PROPRIEDADES QUANTITATIVAS COMO MARGEM DE GANHO (MG), MARGEM DE FASE (MF), GANHO CC, ENTRE OUTROS. ABAIXO SEGUE UM EXEMPLO DE DIAGRAMAS DE BODE; QUE CONSISTEM ~~[illegible]~~ NAS CURVAS DE GANHO E DE FASE DE UM SISTEMA ~~[illegible]~~ AMBOS EM ESCALA log



COMO TODOS OS SISTEMAS FÍSICOS SÃO PASSA BAIXA, ISTO É, O NÚMERO DE POLOS É MAIOR OU IGUAL AO NÚMERO DE ZEROS, O GANHO SEMPRE TENDE A DIMINUIR A MEDIDA QUE A FREQUÊNCIA AUMENTA. PODE-SE DIZER QUE QUANDO ~~[illegible]~~ SE PASSA POR UM POLO ~~[illegible]~~ NO PLANO COMPLEXO, O EFEITO DESSE POLO É DIMINUIR O GANHO E DEFASAR O SINAL EM ~~[illegible]~~ $-90°$.

OUTRO MÉTODO DE ANÁLISE EM FREQUÊNCIA ENVOLVE AS CARTAS DE NICHOLS QUE SÃO REPRESENTAÇÕES DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM UM DIAGRAMA $|G(j\omega)|$ VS $\angle G(j\omega)$. AS CARTAS DE NICHOLS POSSUEM TRAÇADOS, OS CHAMADOS TRAÇADOS M E N, QUE CONSISTEM EM LOCAIS NO DIAGRAMA QUE RESULTAM EM GANHOS (TRAÇADOS M) E FASES (TRAÇADOS N) IGUAIS ~~[illegible]~~ EM MALHA FECHADA. ESSES TRAÇADOS AUXILIAM NA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ~~[illegible]~~ DESEJÁVEIS/REQUERIDAS ~~[illegible]~~ NO PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE.

COPPE UFRJ
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital n° 54 de 30 de janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO : MEC - 5

- CONTROLADOR PROPORCIONAL - INTEGRAL - DERIVATIVO (PID)

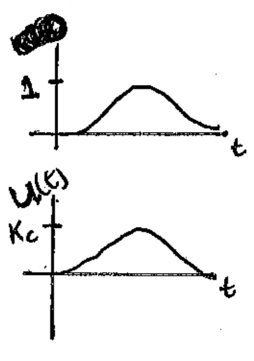
UM DOS CONTROLADORES MAIS ~~UTILIZADOS~~ AMPLAMENTE UTILIZADOS É O CONTROLADOR PID. SUA LEI DE CONTROLE CONSISTE EM:

$$u(t) = K_P \left(\underbrace{e(t)}_{P} + \underbrace{\frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau)\, d\tau}_{I} + \underbrace{T_D \dot{e}(t)}_{D} \right)$$

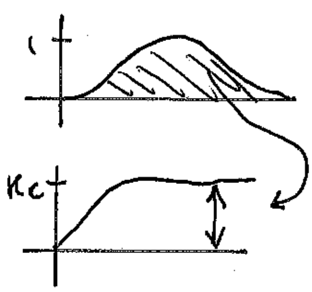
ONDE É POSSÍVEL IDENTIFICAR UMA PARCELA PROPORCIONAL, UMA PARCELA INTEGRAL E UMA PARCELA DERIVATIVA.

ESSENCIALMENTE, A PARCELA DERIVATIVA TENDE A AMORTECER A RESPOSTA DO SISTEMA, ENQUANTO A PARCELA PROPORCIONAL CONTABILIZA PROPORCIONALMENTE O ERRO. AMBOS SÃO PARCELAS ESTABILIZADORAS. A PARCELA INTEGRAL TENDE A SER DESESTABILIZADORA, PORÉM É NECESSÁRIA POIS NÃO DEIXA A RESPOSTA DO CONTROLADOR SER NULA QUANDO O ESTÍMULO É ZERO, EVITANDO O MAL FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.

- SEM PARCELA INTEGRAL:



- COM PARCELA INTEGRAL:



- EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID EM UM SISTEMA MASSA-MOLA:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = f(t) + u(t)$$

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = f(t) + K_P e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_P T_D \dot{e}(t)$$

→ SENDO $e(t) = x_d - x(t)$, E CONSIDERANDO $x_d = 0$

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = f(t) - K_P x(t) - \frac{K_P}{T_I} \int_0^t x(\tau)\, d\tau - K_P T_D \dot{x}(t)$$

DERIVANDO OS DOIS LADOS, OBTEM-SE A EQUAÇÃO QUE REGE O SISTEMA DE CONTROLE:

$$\dddot{x}(t) + 2\zeta\ddot{x}(t) + w_n^2\dot{x}(t) = \dot{f}(t) - K_p\dot{x}(t) - \frac{K_p}{T_I}x(t) - K_pT_D\ddot{x}(t)$$

RESULTANDO EM:

$$\dddot{x}(t) + (2\zeta - K_pT_D)\ddot{x}(t) + (w_n^2 + K_p)\dot{x}(t) + \frac{K_p}{T_I}x(t) = \dot{f}(t)$$

ADICIONALMENTE, A EQUAÇÃO DE LEI DE CONTROLE DO PID PODE SER REPRESENTADA EM SUA FORMA NO DOMÍNIO DE LAPLACE:

$$\boxed{U(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)E(s)}$$

, SENDO K_p A CONSTANTE DE PROPORCIONALIDADE, T_I O TEMPO INTEGRAL E T_D O TEMPO DERIVATIVO

- OUTRAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

ATÉ AGORA DISCUTIU-SE ESTRATÉGIAS PARA CONTROLE EM SISTEMAS LINEARES INVARIANTES NO TEMPO. PARA SISTEMAS VARIANTES NO TEMPO OU SISTEMAS NÃO LINEARES, ESTRATÉGIAS MAIS SOFISTICADAS DEVEM SER EMPREGADAS, COMO ANÁLISE NO ESPAÇO DE ESTADOS, ~~DESTACAM-SE~~ ENTRE OUTROS.

DENTRE AS DEMAIS, DESTACAM-SE OS MÉTODOS DE CONTROLE DE CAOS PARA SISTEMAS QUE APRESENTAM RESPOSTAS CAÓTICAS. O MÉTODO OGY FOI O PRIMEIRO A SER CAPAZ DE REALIZAR TAL TAREFA DE FORMA EFICIENTE. TRATA-SE DE UM MÉTODO QUE PROCURA ESTABILIZAR O SISTEMA EM ÓRBITAS PERIÓDICAS, INTRÍNSECAS À RESPOSTAS CAÓTICAS ATRAVÉS DE PEQUENAS VARIAÇÕES EM PARÂMETROS DO SISTEMA CONTROLÁVEIS. A VANTAGEM DO MÉTODO É SEU BAIXO CONSUMO DE ENERGIA (ALTA EFICIÊNCIA) POR NÃO MODIFICAR A DINÂMICA ORIGINAL DO SISTEMA.

COPPE UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital nº 54 de 30 de janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO : MEC - 5

OUTROS MÉTODOS QUE SE DESTACAM SÃO OS MÉTODOS DE CONTROLE BASEADOS EM DADOS, COMO OS MÉTODOS DE APRENDIZADO POR REFORÇO. MÉTODOS COMO ESSE SERÃO DISCUTIDOS NAS PRÓXIMAS QUESTÕES.

2. CONTROLE BASEADO EM MODELOS DE DADOS OU GUIADOS PELA FÍSICA

ALÉM DOS MODELOS TOTALMENTE CONSTRUÍDOS ATRAVÉS DE EQUAÇÕES DE GOVERNO, MODELOS BASEADOS EM DADOS QUE UTILIZAM ESTRATÉGIAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PODEM SER UTILIZADOS PRINCIPALMENTE PARA CONTROLAR SISTEMAS EXTREMAMENTE COMPLEXOS COMO SISTEMAS ROBÓTICOS, POR EXEMPLO.

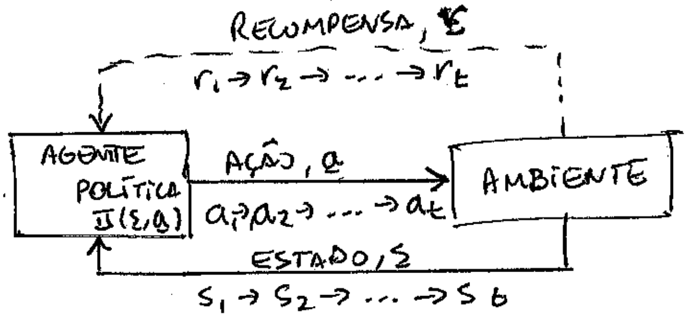
NESSE SENTIDO EMERGEM DUAS CATEGORIAS: (1) OS MODELOS GUIADOS PURAMENTE POR DADOS, E (2) OS MODELOS DE DADOS GUIADOS PELA FÍSICA.

A VANTAGEM DA CATEGORIA (1) ESTÁ ASSOCIADA COM A NÃO NECESSIDADE DE SE CONHECER O MODELO DO SISTEMA A SER CONTROLADO. POR MUITAS VEZES NÃO SE CONHECE O MODELO/MODELOS QUE REGEM O SISTEMA, PRINCIPALMENTE SE O SISTEMA FOR DE DIMENSÃO ALTA E COM ALTA COMPLEXIDADE. A DESVANTAGEM ESTÁ NO FATO DE QUE, PROVAVELMENTE, A QUANTIDADE DE DADOS, RECURSOS COMPUTACIONAIS E TEMPO SERÁ MAIOR PARA REALIZAR O TREINAMENTO DO MODELO.

EM CONTRAPARTIDA, MODELOS DE DADOS GUIADOS PELA FÍSICA SÃO ALIMENTADOS COM INFORMAÇÕES RESULTANTES DE MODELOS FÍSICOS QUE REGEM OU SÃO SIMILARES AO SISTEMA EM QUESTÃO.

ISSO REDUZ A QUANTIDADE DE DADOS NECESSÁRIOS PARA ETAPA DE TREINAMENTO, REDUZINDO RECURSOS COMPUTACIONAIS E TEMPO DE TREINAMENTO. ALTERNATIVAMENTE AO CASO ANTERIOR, PRECISA-SE DE UM MODELO PREVIAMENTE ESTABELECIDO DO SISTEMA EM QUESTÃO, O QUE PODE SER INVIÁVEL PARA SISTEMAS MAIS COMPLEXOS.

INDEPENDENTEMENTE, AS DUAS CATEGORIAS PODEM SER ENGLOBADAS NO PARADIGMA DE APRENDIZADO POR REFORÇO, QUE PODE SER VISTO COMO UMA INTERSEÇÃO ENTRE A ÁREA DE CONTROLE E A ÁREA DE APRENDIZADO DE MÁQUINAS.
O APRENDIZADO POR REFORÇO É UM TIPO DE APRENDIZADO SEMI-SUPERVISIONADO ONDE O TREINAMENTO DO MODELO É REALIZADO POR TENTATIVA E ERRO, VISANDO MAXIMIZAR UMA FUNÇÃO DE RECOMPENSA. DURANTE O PROCESSO, OCORRE UMA INTERAÇÃO CONTÍNUA ENTRE O AGENTE (O CONTROLADOR, NO CASO) E O AMBIENTE (SISTEMA MECÂNICO). O AGENTE OBSERVA OS DADOS E TOMA AÇÃO COM BASE EM UMA POLÍTICA, ONDE RECOMPENSAS SÃO RECEBIDAS COMO FEEDBACK DE FORMA QUE AS ~~AÇÕES SEJAM AJUSTADAS~~ ESTRATÉGIAS DE AÇÕES SÃO AJUSTADAS PARA MELHORAR O DESEMPENHO (AUMENTAR A RECOMPENSA). ABAIXO É MOSTRADO UM ESQUEMÁTICO DO PROCESSO:



NESSE SENTIDO, A POLÍTICA PODE SER DEFINIDA COMO A PROBABILIDADE DE UMA AÇÃO SER EXECUTADA, DADO UM ESTADO:

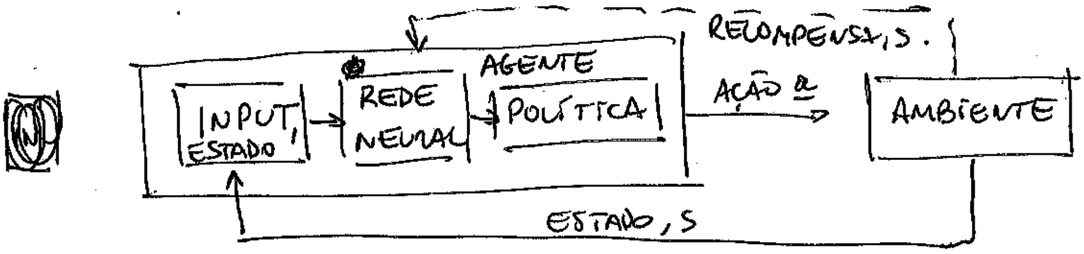
$$\pi(s,a) = P(a|s)$$

COM ISSO, O VALOR DE CADA POLÍTICA PODE SER AVALIADA PELO VALOR ESPERADO CONSIDERANDO AS RECOMPENSAS FUTURAS DADO UM ESTADO INICIAL S:

$$V_\pi(s) = \mathbb{E}\left(\sum_t \gamma^t r_t \mid s_0 = s\right),$$ ONDE γ^t É A TAXA DE DESCONTO ENTRE 0 E 1.

A TAXA DE DESCONTO DIMINUI AO LONGO DOS ESTADOS DE FORMA A PRIORIZAR RECOMPENSAS IMEDIATAS.

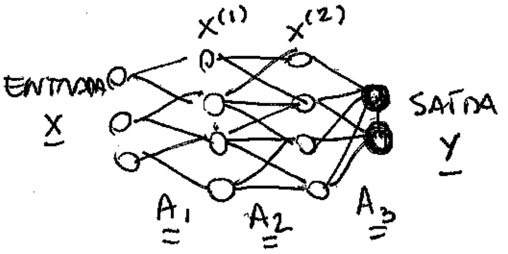
O GRANDE DESAFIO NESSA ABORDAGEM É DETERMINAR A FUNÇÃO POLÍTICA. UMA FORMA INTERESSANTE DE APROXIMAR $\pi(s, \underline{a})$ É UTILIZAR UMA REDE NEURAL. DESSA FORMA, O AGENTE (O CONTROLADOR) É DESCRITO POR UM MODELO BASEADO EM DADOS, SEJA ELE GUIADO PELA FÍSICA OU NÃO, ONDE A ENTRADA É O ESTADO E A SAÍDA É A POLÍTICA.



O FUNCIONAMENTO DE UMA REDE NEURAL É RESUMIDO A SEGUIR:

- <u>REDES NEURAIS</u>

UMA REDE NEURAL É UM PROCESSO EM MACHINE LEARNING BIOINSPIRADO NO FUNCIONAMENTO DE CÉREBROS. É CONSTRUÍDA EM CAMADAS COMPOSTAS POR UNIDADES (NEURÔNIOS), E SÃO AMPLAMENTE UTILIZADAS EM TODOS OS CAMPOS DE APRENDIZADO DE MÁQUINAS (SUPERVISIONADO, NÃO-SUPERVISIONADO, SEMI-SUPERVISIONADO). ABAIXO É ILUSTRADA UMA REDE NEURAL GENÉRICA:



A SAÍDA DE UMA REDE NEURAL PODE SER DESCRITA COMO:

$$\underline{y} = f_M(\underline{\underline{A}}_M, \ldots, f_2(\underline{\underline{A}}_2, f_1(\underline{\underline{A}}_1, \underline{x}))\ldots)$$

ONDE f_i SÃO FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO QUE MAPEIAM UMA CAMADA EM RELAÇÃO A ANTERIOR.

COPPE UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital nº 54 de 30 de janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO : MEC-3

As funções de ativação mais comuns são: linear, passo binário, logística, tangente hiperbólica e rectifier linear unit (ReLU).

As redes neurais complexas são viáveis graças à técnica de retropropagação, que permite a aplicação do método de otimização de gradiente descendente de forma eficiente.

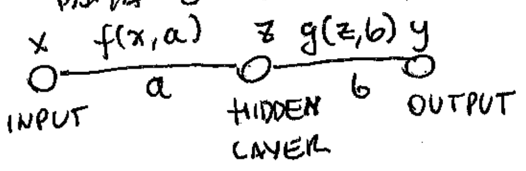
No caso geral, utiliza-se o método de gradiente descendente estocástico (SGD), que utiliza apenas uma parcela dos dados de forma aleatória em cada passo para minimizar o erro.

Cada passo do SGD é computado na forma:

$$\underline{w}_{k+1} = \underline{w}_k - \delta \nabla E,$$ onde δ é um hiperparâmetro relacionado à taxa de aprendizado (passo do método)

e $\underline{w}$ são os coeficientes de ponderação que formam as matrizes $\underline{\underline{A}}$.

A retropropagação é descrita matematicamente abaixo para 3 neurônios:



$$y = g(f(x,a), b)$$

Erro: $E = \frac{1}{2}(y_0 - y)^2$, onde y_0 é o valor verdadeiro de y.

Para achar a e b (pesos), faz-se

$$\frac{\partial E}{\partial a} = -(y_0 - y)\frac{dy}{dz}\frac{dz}{da} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = -(y_0 - y)\frac{dy}{\partial b} = 0$$

A parcela $\frac{dy}{\partial z}\frac{dz}{\partial a}$ descreve a retropropagação, e os próximos coeficientes são achados:

$$\left.\begin{aligned} a_{k+1} &= a_k - \delta \frac{\partial E_J}{\partial a_k} \\ b_{k+1} &= b_k - \delta \frac{\partial E_J}{\partial b_k} \end{aligned}\right\} \text{forma eficiente de computar o gradiente descendente.}$$

onde J é um conjunto aleatório de dados.

3. CONTROLE E MONITORAÇÃO DE SISTEMAS MECÂNICOS EM TEMPO REAL (TEMA 9)

SISTEMAS DE CONTROLE E MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL POSSUEM DIVERSAS APLICAÇÕES NO CAMPO DA ENGENHARIA MECÂNICA, COMO PREVENÇÃO DE FALHAS, ESTIMATIVA DE DANO, ABSORÇÃO / ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES, ENTRE OUTROS.

UM SISTEMA DE DIGITAL TWIN, POR EXEMPLO, SE ENQUADRA NESSE CONTEXTO.

UM DIGITAL TWIN É UM MODELO COMPUTACIONAL QUE LEVA EM CONSIDERAÇÃO INCERTEZAS, E É CALIBRADO POR DADOS MEDIDOS DO SEU GÊMEO FÍSICO. A CALIBRAÇÃO / ATUALIZAÇÃO DO MODELO PODE SER FEITA EM TEMPO REAL, OU DE TEMPOS EM TEMPOS DE ACORDO COM A NECESSIDADE.

OS COMPONENTES E ELEMENTOS CENTRAIS DESSE TIPO DE SISTEMA DE CONTROLE SÃO: A PLANTA (SISTEMA MECÂNICO A SER CONTROLADO), SENSORES E RECEPTORES QUE ENVIAM E RECEBEM INFORMAÇÕES EM TEMPO REAL, UMA GRANDE QUANTIDADE DE DADOS REAIS DE OPERAÇÃO CASO O MODELO SEJA GERADO POR TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINAS, DADOS DE MODELOS FÍSICOS QUE DESCREVEM PARTE OU TOTALMENTE A FÍSICA DO SISTEMA, CASO MODELOS COMO PHYSICAL-INFORMED NEURAL NETWORKS SEJAM UTILIZADOS. ALÉM DISSO, CONTROLADORES

COPPE UFRJ
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE
Programa de Engenharia Mecânica
Edital nº 54 de 30 de janeiro de 2024, publicado no D.O.U. em 02 de fevereiro de 2024
CONCURSO MC-192

CÓDIGO DO CANDIDATO : MEC-5

Documento assinado digitalmente
gov.br
FERNANDO ALVES ROCHINHA
Data: 28/11/2024 14:57:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

E UMA CENTRAL DE MONITORAMENTO, A FIM DE PREVER ~~[illegible]~~ CENÁRIOS CATASTRÓFICOS, E TER ~~[illegible]~~ CAPACIDADE DE EXECUTAR ~~[illegible]~~ FUNÇÕES CRÍTICAS DE SEGURANÇA DE FORMA AUTOMÁTICA.

FOI DITO ANTERIORMENTE QUE MODELOS ~~[illegible]~~ INFORMADOS PELA FÍSICA SÃO MAIS EFICIENTES NO PROCESSO DE TREINAMENTO DO MODELO POR NECESSITAREM MENOS DADOS. NESSE SENTIDO, A ATUALIZAÇÃO DO MODELO DE DIGITAL TWIN ~~[illegible]~~ ~~[illegible]~~ ~~[illegible]~~ ~~[illegible]~~ ~~ATUALIZAÇÃO~~ ~~DO~~ PODE SER, EM CERTOS CASOS, UMA ATUALIZAÇÃO DO TREINAMENTO DO MODELO. ALÉM DISSO, MODELOS GUIADOS PELA FÍSICA TENDEM A APRESENTAR MELHORES RESULTADOS, GENERALIZANDO ~~[illegible]~~ MAIS.

~~FINALIZANDO, ESSE TIPO DE SISTEMA É TENDÊNCIA~~

FINALIZANDO, ~~[illegible]~~ ~~[illegible]~~ A UTILIZAÇÃO DESSES TIPOS DE SISTEMA ~~[illegible]~~ É UMA TENDÊNCIA CRESCENTE E UMA DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA INDUSTRIA 4.0 E NA AUTOMATIZAÇÃO DE PROCESSOS.