IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE PID:

- OS ALGORITMOS DEVEM SER EXECUTADOS EM PERÍODOS BEM DEFINIDOS: TEMPO REAL

- A MAIORIA DAS DINÂMICAS POSSUEM COMPORTAMENTOS QUE SÓ PODEM SER EXPRESSADOS POR EQUAÇÕES DIFERENCIAIS (ED).

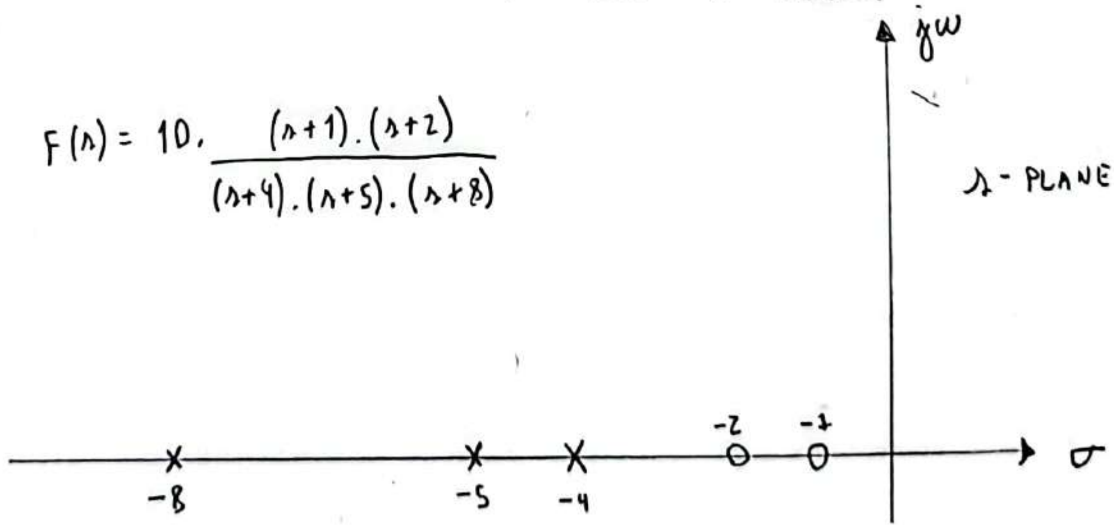
- A MANIPULAÇÃO DE ED'S É MAIS FÁCIL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.

- É COMUM O USO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t).\, e^{-st}\, dt$$

- FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA:
  - AS RAÍZES DA EQUAÇÃO DO NUMERADOR SÃO CHAMADAS DE ZEROS.
  - AS RAÍZES DA EQUAÇÃO DO DENOMINADOR SÃO CHAMADAS DE PÓLOS.
  - A ESTABILIDADE DO SISTEMA ESTÁ INERENTEMENTE RELACIONADA À QUANTIDADE E TIPOS DE PÓLOS E ZEROS.

$$F(s) = 10.\, \frac{(s+1).(s+2)}{(s+4).(s+5).(s+8)}$$



$$F(s) = \frac{1}{(s+a)(s+b)}$$

$$f(t) = c_1 \cdot e^{-at} + c_2 \cdot e^{-bt}$$

a, b REAIS

$$\begin{cases} a, b > 0 \\ a, b = 0 \\ a, b < 0 \end{cases}$$

CADA PÓLO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA GERA UMA EXPONENCIAL NO DOMÍNIO DO TEMPO.

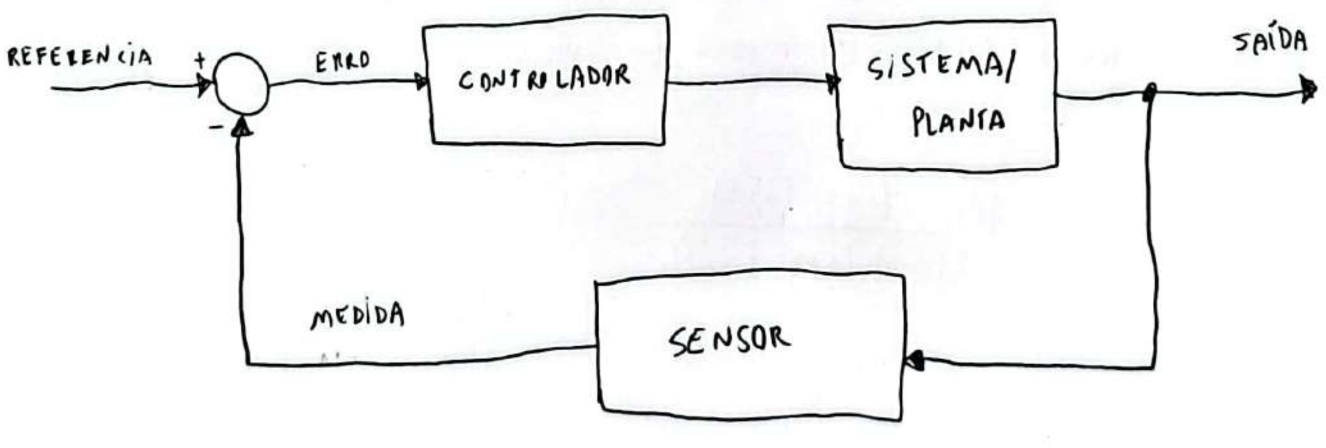
$$F(s) = \frac{1}{(s+a)(s+b)}$$

a, b COMPLEXOS

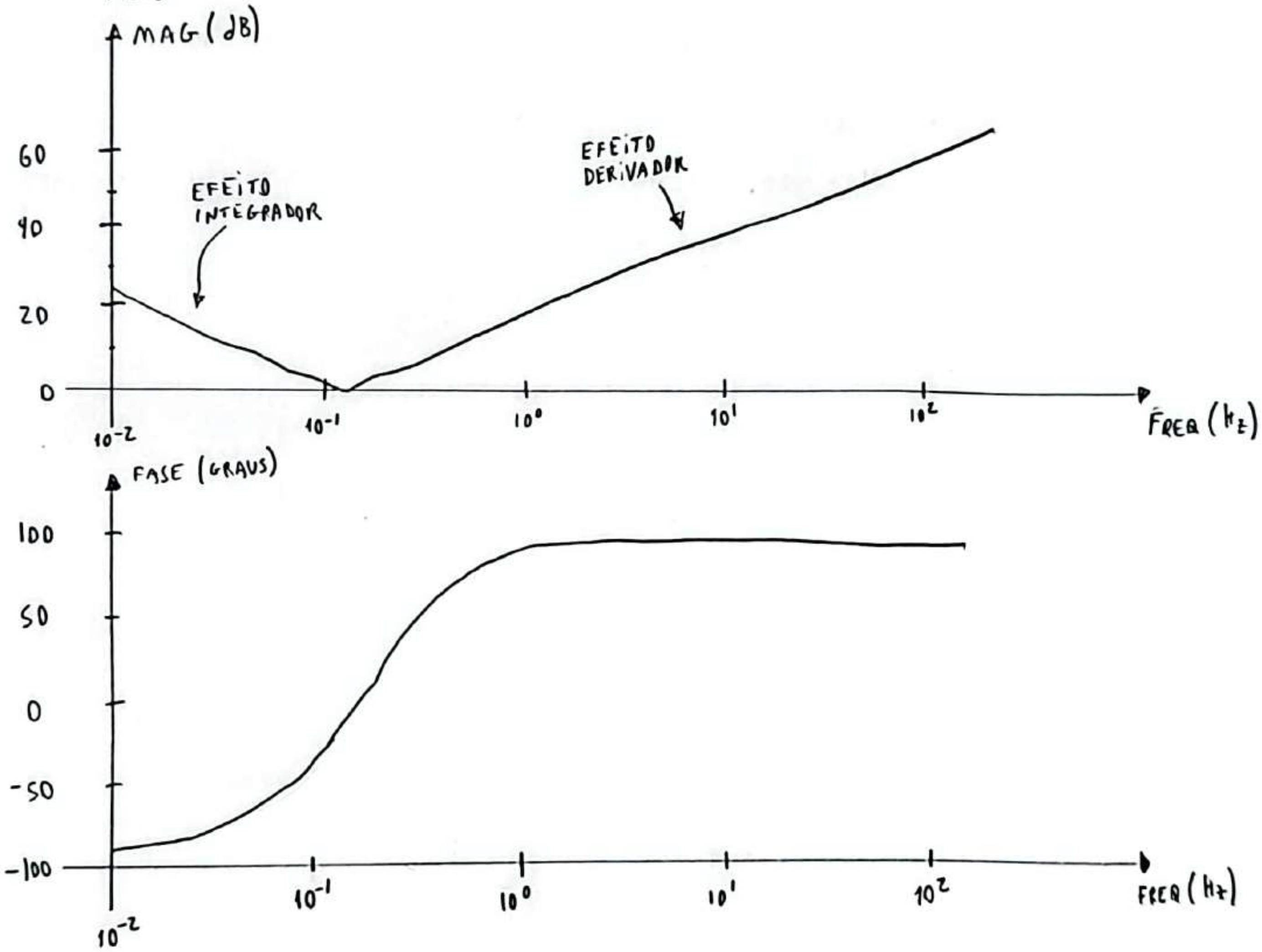
$$a, b \Rightarrow \underbrace{pR}_{\text{PARTE REAL}} \pm \underbrace{pi}_{\text{PARTE IMAGINARIA}} \cdot j$$

$$f(t) = c_1 \cdot e^{-pR \cdot t} \times \cos(pi \cdot t) + c_2 \cdot e^{-pR \cdot t} \times \text{SEN}(pi \cdot t)$$

- MODIFICANDO A DINÂMICA DE UM SISTEMA:



- DIAGRAMA DE BODE:
  - COMPOSTO DE 2 GRÁFICOS:
    - GRÁFICO SUPERIOR: APRESENTA O GANHO A SER APLICADO EM CADA FAIXA DE FREQUÊNCIA.
    - GRÁFICO INFERIOR: APRESENTA A VARIAÇÃO NO ÂNGULO DO SINAL PARA AQUELA FREQUÊNCIA.
  - PID:



QUANTO MAIOR O EFEITO INTEGRADOR (BAIXAS FREQ) MAIS LENTO O SISTEMA FICA E MENOS SUSCETÍVEL A RUÍDOS.

QUANTO MAIOR O EFEITO DERIVADOR (ALTAS FREQ) MAIS RÁPIDO O SISTEMA FICA E MAIS SUSCETÍVEL A RUÍDOS.

O EFEITO PROPORCIONAL NÃO ALTERA A DINÂMICA DO SISTEMA, APENAS ACENTUA AS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO SISTEMA.

- PROBLEMAS DO PID:

  - NÃO CONSEGUEM IMPLEMENTAR "CONTROLE OTIMO".
    EX: MINIMIZAR GASTO DE ENERGIA.

  - NÃO OPERA BEM COM NÃO LINEARIDADES.
    EX: FOLGA, ZONA MORTA, HISTERESE.

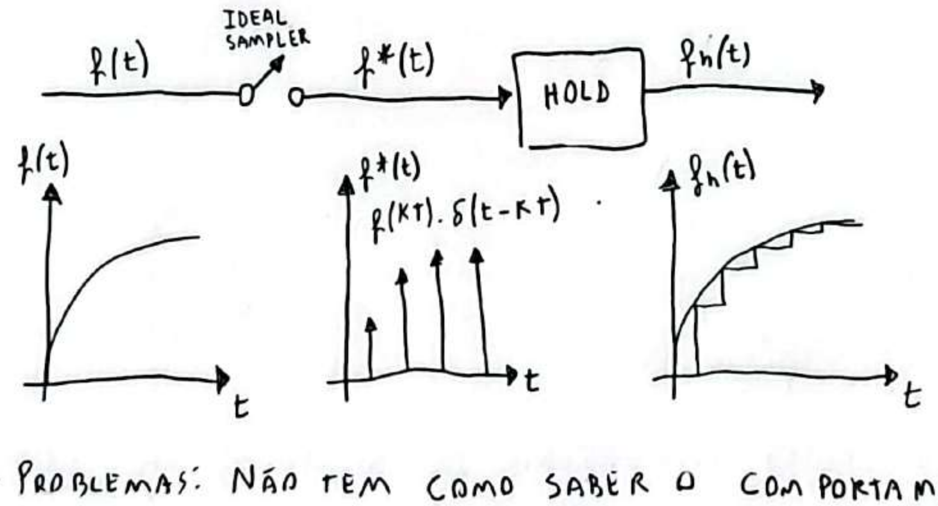
  - RUÍDOS NA PARTE DERIVATIVA.
    - GERALMENTE IMPLEMENTA-SE UM PASSA BAIXA PARA CORRIGIR.

  - INTEGRAL WINDUP.
    - A PARTE INTEGRAL ACUMULA MUITO ERRO E DEMORA PARA RETORNAR PARA VALORES ACEITÁVEIS.

  - MUDANÇAS BRUSCAS NO SET-POINT.
    - SE COMPORTAM COMO RUÍDOS MUITO GRANDE NO SISTEMA.

- DISCRETIZAÇÃO:

  - SISTEMA AMOSTRADO:



  - PROBLEMAS: NÃO TEM COMO SABER O COMPORTAMENTO DO SINAL ENTRE AS AMOSTRAS.
    A TOMADA DE DECISÃO É SEMPRE FEITA BASEADA EM UM VALOR (DADO) ATRASADO.
    QUANTO MAIS ESPAÇADO O INTERVALO DE TEMPO ENTRE AS AMOSTRAS, PIOR.

- AMOSTRAGEM:
  - TEOREMA DE NYQUIST: A FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM DEVE SER MAIOR QUE O DOBRO DA MAIOR FREQUÊNCIA DE UM SINAL, PARA QUE SEJA POSSÍVEL RECONSTRUÍ-LO.

    SE FOR REALIZADA A TRANSFORMADA DE FOURIER DE UM SINAL É POSSÍVEL VERIFICAR A MAIOR FREQUÊNCIA DELE.

  - EX: SINAL COMPOSTO DE DIVERSAS FREQUÊNCIAS:
    - PORTADORA: 500 Hz
    - SINAL 1: 2 KHz
    - SINAL 2: 5 KHz
    - SINAL 3: 15 KHz

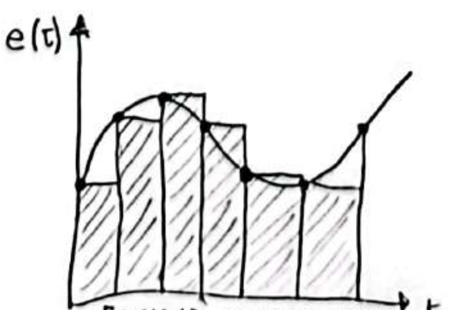
    A FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM DESSE SINAL DEVE SER:

    $$f_A > 2 \times f_{MAIS\_ALTA} \rightarrow f_A > 2 \times 15KHz \rightarrow f_A > 30KHz$$

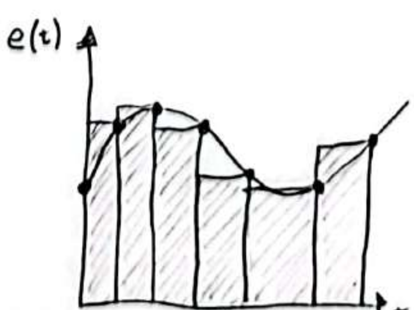
- PROBLEMA DE IMPLEMENTAÇÃO:
  - O MUNDO FUNCIONA EM s (CONTÍNUO)
  - O PROCESSADOR FUNCIONA EM z (DISCRETO)

- RELAÇÃO ENTRE z E s:
  - $X^*(s) = X(z)\big|_{z = e^{sT}}$

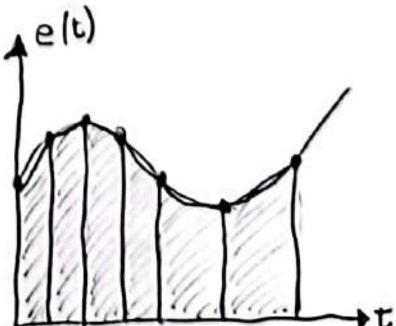
- APROXIMAÇÕES DE $z = e^{sT}$ $\longrightarrow$ TRABALHAR COM z CONTENDO UMA EXPONENCIAL EM s É DIFÍCIL.
  - FOWARD
  - BACKWARD
  - BILINEAR



FOWARD DIFFERENCE



BACKWARD DIFFERENCE



BILINEAR

- APROXIMAÇÃO FOWARD:

  - PROJETA A LEITURA PRA FRENTE (FUTURO) E POR ISSO CRIA UM SISTEMA NÃO CAUSAL (PROBLEMA) POIS TENTA PREVER O FUTURO.

  - NÃO É IMPLEMETÁVEL NA PRÁTICA.

- APROXIMAÇÃO BACKWARD:

  - TRABALHA COM A LEITURA PASSADA, PORTANTO ESTÁ SEMPRE ATRASADA.

  - BARATA COMPUTACIONALMENTE.

- APROXIMAÇÃO BILINEAR:

  - A MAIS PRECISA DE TODAS.

  - CARA COMPUTACIONALMENTE.

- APROXIMAÇÕES DE s PARA z:

  - FOWARD:

$$s = \frac{z-1}{T}$$

  - BACKWARD (MAIS SIMPLES DE IMPLEMENTAR):

$$s = \frac{z-1}{zT}$$

  - BILINEAR:

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}$$

$T \rightarrow$ CONSTANTE DE TEMPO.
DE QUANTO EM QUANTO TEMPO ESTA SENDO FEITA AS AMOSTRAS.

PARA MUDAR DO SISTEMA CONTÍNUO (s) PARA O DISCRETO (z) É NECESSÁRIO DEFINIR A FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM. ESTE TEMPO PRECISA SER CONSTANTE, POR ISSO É NECESSÁRIO O TEMPO REAL.

SE O TEMPO NÃO FOR CONSTANTE O SISTEMA NÃO SERÁ COMO O ESPERADO, POIS TODA A TEORIA FOI DESENVOLVIDA CONSIDERANDO O TEMPO CONSTANTE.

- EQUAÇÃO DO PID:

$$\bullet\ \frac{Y(s)}{E(s)} = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd.s$$

- BACKWARD:

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = Kp + \frac{Ki}{\left(\frac{z-1}{zT}\right)} + Kd.\left(\frac{z-1}{zT}\right)$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = Kp + Ki.\frac{zT}{z-1} + Kd.\frac{z-1}{zT}$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = Kp + Ki.\frac{z.T}{(z-1)} + Kd.\frac{(z-1)}{zT}$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = \frac{\qquad}{z^2T - zT} = \frac{\qquad}{T(z^2-z)}$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = \frac{Kp.T.(z^2-z) + Ki.z.\cancel{T}.\frac{T(z^2-z)}{(z-1)} + Kd.(z-1).\frac{\cancel{T}(z^2-z)}{zT}}{\cancel{T}(z^2-z)}$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = \frac{Kp.(z^2-z) + Ki.z.T\frac{(z^2-z)}{(z-1)} + Kd.(z-1).\frac{(z^2-z)}{zT}}{(z^2-z)}$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = \frac{Kp.(z^2-z) + Ki.z.T.\frac{z\cancel{(z-1)}}{\cancel{(z-1)}} + Kd.(z-1).\frac{\cancel{z}(z-1)}{\cancel{z}T}}{(z^2-z)}$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = \frac{Kp.(z^2-z) + T.Ki.z^2 + \frac{Kd}{T}.(z^2-z-z+1)}{(z^2-z)}$$

$$\frac{Y(z)}{e(z)} = \frac{Kp.(z^2-z) + T.Ki.(z^2) + \frac{Kd}{T}.(z^2-2z+1)}{(z^2-z)}$$

$$Y(z).(z^2-z) = e(z).\left(Kp.(z^2-z) + T.Ki.(z^2) + \frac{Kd}{T}.(z^2-2z+1)\right)$$

A EQUAÇÃO ACIMA DEVERIA SER IMPLEMENTADA NO PROCESSADOR, PORÉM NÃO DÁ PARA IMPLEMENTAR POIS Z É FREQUÊNCIA DISCRETA E O PROCESSADOR SÓ CONSEGUE TRABALHAR COM TEMPO DISCRETO. LOGO, DEVEMOS TRANSFORMAR A EQUAÇÃO ACIMA DE FREQUÊNCIA DISCRETA (Z) PARA TEMPO DISCRETO (n), ESTA NOVA EQUAÇÃO EM n É CHAMADA DE EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS.

ANTES DE EXECUTAR A TRANSFORMAÇÃO DEVEMOS NOTAR OS EXPOENTES DE Z NA EQUAÇÃO, EXPOENTES POSITIVOS SE TRADUZEM EM TEMPO FUTURO, O QUE NÃO É POSSÍVEL. ENTÃO MULTIPLICAREMOS A EQUAÇÃO POR Z^{-2} PARA DESLOCAR O TEMPO FUTURO PARA O PRESENTE, E O TEMPO PRESENTE PARA O PASSADO.

NA PRÁTICA ESTAREMOS ADICIONANDO ATRASOS AO SISTEMA.

$$Y(z).(z^2-z).(z^{-2}) = e(z).\left(Kp.(z^2-z).(z^{-2}) + T.Ki.(z^2).(z^{-2}) + \frac{Kd}{T}.(z^2-2z+1).(z^{-2})\right)$$

$$Y(z).(1-z^{-1}) = e(z).\left(Kp.(1-z^{-1}) + T.Ki + \frac{Kd}{T}.(1-2z^{-1}+z^{-2})\right)$$

$$Y(z) - Y(z).(z^{-1}) = e(z).Kp.(1-z^{-1}) + e(z).T.Ki + e(z).\frac{Kd}{T}.(1-2z^{-1}+z^{-2})$$

$$Y(z) - Y(z).(z^{-1}) = Kp.(e(z)-e(z).(z^{-1})) + T.Ki.e(z) + \frac{Kd}{T}.(e(z)-2.e(z).(z^{-1})+e(z).(z^{-2}))$$

$$Y(z) = Y(z).(z^{-1}) + Kp.(e(z)-e(z).(z^{-1})) + T.Ki.e(z) + \frac{Kd}{T}.(e(z)-2.e(z).(z^{-1})+e(z).(z^{-2}))$$

AGORA QUE A EQUAÇÃO NÃO POSSUI TERMOS REFERENTES AO TEMPO FUTURO, PODEMOS TRANSFORMÁ-LA EM UMA EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS:

- EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS:

PARA REALIZAR A TRANSFORMAÇÃO:

$z \rightarrow n$

$z^{-1} \rightarrow n-1$

$z^{-2} \rightarrow n-2$

→ A VANTAGEM DA TRANSFORMADA Z É QUE ELA FOI PROJETADA PARA QUE A VOLTA PARA O TEMPO DISCRETO SEJA SIMPLES DE SER FEITA.

$$\boxed{Y(n) = Y(n-1) + Kp.(e(n)-e(n-1)) + T.Ki.e(n) + \frac{Kd}{T}.(e(n)-2.e(n-1)+e(n-2))}$$

A EQUAÇÃO ACIMA É IMPLEMENTÁVEL EM UM PROCESSADOR, JÁ QUE n É O TEMPO DISCRETO.

$Y(n) \rightarrow$ SAÍDA DA ITERAÇÃO ATUAL.

$Y(n-1) \rightarrow$ SAÍDA DA ITERAÇÃO ANTERIOR.

$e(n) \rightarrow$ ERRO DA ITERAÇÃO ATUAL.

$e(n-1) \rightarrow$ ERRO DA ITERAÇÃO ANTERIOR.

$e(n-2) \rightarrow$ ERRO DE DUAS ITERAÇÕES ATRÁS.

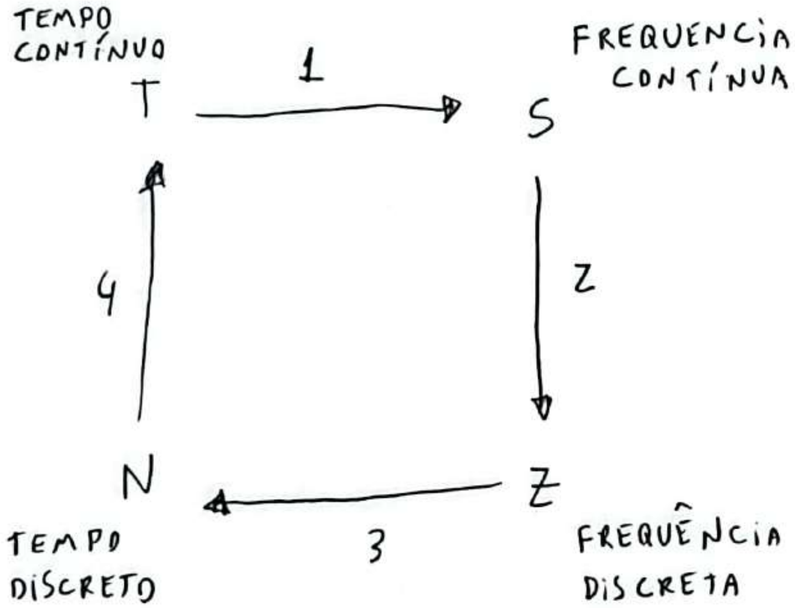
A EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS É DEPENDENTE DO TEMPO CONSTANTE T DE AMOSTRAGEM PARA QUE O CONTROLE FUNCIONE.

Obs: ESTE CASO CONSIDERA QUE PRA CADA AMOSTRA REALIZADA O CONTROLADOR EXECUTARÁ UMA ROTINA.
NO CASO DE VÁRIAS AMOSTRAS PARA FILTRAGEM DO SINAL O TEMPO CONSTANTE PODE SER O INTERVALO DA EXECUÇÃO DA ROTINA DO CONTROLADOR.

- TRANSFORMADA Z INVERSA:

$$x[n] = Z^{-1}\{X[z]\} = \frac{1}{2\pi j} \oint_c X(z) \cdot z^{n-1} \, dz$$

- PROCESSO COMPLETO:



1 - NO TEMPO CONTÍNUO AS ED'S SÃO MUITO COMPLEXAS DE SEREM ANALISADAS, POR ISSO MUDAMOS PARA FREQUENCIA CONTÍNUA QUE É MAIS FACIL DE MANIPULAR.

2 - O PROCESSADOR NÃO CONSEGUE TRABALHAR COM GRANDEZAS CONTÍNUAS, POR ISSO CONVERTEMOS A FREQUÊNCIA CONTÍNUA PARA FREQUÊNCIA DISCRETA.

3 - O PROCESSADOR SÓ ENTENDE TEMPO DISCRETO, ENTÃO TRANSFORMAMOS A FREQ. DISCRETA EM TEMPO DISCRETO E ASSIM GERAMOS UMA EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS QUE É IMPLEMENTÁVEL.

4 - A EXECUÇÃO DIGITAL DO CONTROLADOR EM TEMPO DISCRETO ATUARÁ SOBRE O SISTEMA DE FORMA QUE SEJA PERCEPTÍVEL NO MUNDO REAL (TEMPO CONTÍNUO).

- PID NO DOMÍNIO n:
  - PERMITE A IMPLEMENTAÇÃO ATRAVÉS DE UMA EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS.
  - O VALOR ATUAL DA SAÍDA É BASEADO NO VALOR ATUAL DO ERRO E NOS VALORES ANTERIORES.
  - POSSUI O TEMPO DE AMOSTRAGEM COMO COEFICIENTE DA EQUAÇÃO.

- ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO DO PID:

```
FLOAT KP, Ki, KD, T;
INT16_t y0, y1, e0, e1, e2, SP, ADC_READ;

VOID PID_COMPUTE ()
{
    y1 = y0;
    e2 = e1;
    e1 = e0;
    e0 = SP - ADC_READ;

    y0 = (INT16_T) ( y1 +
                   (KP. (e0 - e1)) +
                   (Ki . (e0).T) +
                   (KD. (e0 - 2. e1 + e2)/T));

    DAC_OUTPUT (y0);
}
```

- PROBLEMA DESTA IMPLEMENTAÇÃO:
  - INTEGRAL WINDUP:
    - É O EFEITO DA INÉRCIA COMPUTACIONAL.
    - A SAÍDA FICA COM UM VALOR MUITO ALTO DEVIDO AS SOMAS COM OS VALORES DA SAÍDA PASSADA.
    - COMO ESSA SOMA PODE FICAR MUITO ALTA PARA ESTABILIZAR O SISTEMA, FICA DIFÍCIL DE VOLTAR PARA VALORES MENORES.

- SOLUÇÃO:
  - SATURAR O VALOR DA SAÍDA (Y_0) PARA NÃO DEIXAR ELE AUMENTAR INDEFINIDAMENTE.

- PROCESSAMENTO:
  - O TEMPO GASTO NO PROCESSAMENTO DE UM ALGORITMO DE PID É FORTEMENTE AFETADO PELOS TIPOS DE VARIÁVEIS UTILIZADAS, QUE NO GERAL SÃO:
    - INTEIROS (NÃO RECOMENDADO DEVIDO AOS TIPOS DE CALCULOS UTILIZADOS NO PID).
    - PONTO FLUTUANTE (MAIS PRECISÃO NOS CALCULOS, MAS GASTA MUITO TEMPO DE PROCESSAMENTO).
    - PONTO FIXO (BOA SAÍDA, MAS CONTÉM MAIS ERRO DO QUE PONTO FLUTUANTE, DEVIDO A MENOR PRECISÃO).

  - DIFERENÇA NO TEMPO DE PROCESSAMENTO PARA O MESMO SISTEMA DE CONTROLE:
    - PONTO FLUTUANTE: $520,1\,\mu s$ ($1,923\,KHz \approx 2\,KHz$)
    - PONTO FIXO: $90,69\,\mu s$ ($11\,KHz$)

  - OBS: $2\,KHz$ É UMA FREQUÊNCIA BAIXA PARA CONTROLAR DETERMINADOS TIPOS DE SISTEMA.

- OTIMIZANDO A EQUAÇÃO DO PID:
  - A EQUAÇÃO IMPLEMENTADA NO ALGORITMO DO PID, CONSISTE EM:
    - 4 SOMAS
    - 2 SUBTRAÇÕES
    - 5 MULTIPLICAÇÕES
    - 1 DIVISÃO
    - EQ: $Y_0 = Y_1 + K_P.(e_0 - e_1) + K_i.(e_0).T + \frac{K_D}{T}.(e_0 - 2.e_1 + e_2)$
  - COM ALGUMAS MANIPULAÇÕES ALGÉBRICAS, PODEMOS REDUZIR TODAS ESSAS OPERAÇÕES MATEMÁTICAS POR APENAS:
    - 3 MULTIPLICAÇÕES
    - 3 SOMAS
    - OTIMIZAÇÃO:

$$Y_0 = Y_1 + K_p.(e_0 - e_1) + K_i.(e_0).T + \frac{K_D}{T}.(e_0 - 2.e_1 + e_2)$$

$$Y_0 = Y_1 + K_p.e_0 - K_p.e_1 + K_i.e_0.T + \frac{K_D}{T}.e_0 - 2.\frac{K_D}{T}.e_1 + \frac{K_D}{T}.e_2$$

EVIDENCIANDO OS ERROS:

$$Y_0 = Y_1 + e_0.\left(K_p + K_i.T + \frac{K_D}{T}\right) + e_1.\left(-K_p - 2.\frac{K_D}{T}\right) + e_2.\left(\frac{K_D}{T}\right)$$

$$K_1 = K_p + K_i.T + \frac{K_D}{T}$$

$$K_2 = -\left(K_p + 2.\frac{K_D}{T}\right)$$

$$K_3 = \frac{K_D}{T}$$

EQUAÇÃO OTIMIZADA:

$$Y_0 = Y_1 + K_1.e_0 + K_2.e_1 + K_3.e_2$$

- NESTA NOVA EQUAÇÃO NÃO EXISTE K_P, K_I E K_D. ELES FORAM SUBSTITUÍDOS POR K_1, K_2 E K_3.

ESTA TÉCNICA CONSISTE PORTANTO EM CALCULAR K_1, K_2 E K_3 FORA DO ALGORITMO (NA MÃO), E COLOCAR OS VALORES CALCULADOS NO ALGORITMO.

DESTA FORMA OS CALCULOS REALIZADOS PELO PROCESSADOR FICAM MUITO MAIS SIMPLES E CONSEQUENTEMENTE MUITO MAIS RÁPIDOS.

- ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO DO PID OTIMIZADO:

```
INT16_T K1, K2, K3;
INT16_T Y0, Y1, e0, e1, e2, SP, ADC_READ;

VOID PID_COMPUTE ()
{
    Y1 = Y0;
    e2 = e1;
    e1 = e0;
    e0 = SP - ADC_READ;

    Y0 = Y1 +
         (INT32_T) (K1 . e0) +
         (INT32_T) (K2 . e1) +
         (INT32_T) (K3 . e2);

    DAC_OUTPUT (Y0);
}
```

DE PREFERENCIA MULTIPLOS DE 2.

OBS: 1- PODE SER NECESSÁRIO SHIFTAR OS K'S PARA ADEQUAÇÃO DOS CALCULOS (POR ESTAR TRABALHANDO EM PONTO FIXO).

2- K_P, K_I, K_D E T UTILIZADOS PARA CALCULAR K_1, K_2 E K_3 DEVEM SER PONTO FLUTUANTES.

3- ESTA IMPLEMENTAÇÃO QUE DEU 30,69 NA.

- TEMPO REAL:
  - O T DE $z = e^{sT}$ DEVE SER CONSTANTE PARA QUE TODA ESTA TEORIA FUNCIONE.
  - T É UM CICLO DE PROCESSAMENTO COMPLETO.
    - AMOSTRAGEM DO SINAL.
    - PROCESSAMENTO.
    - ATUALIZAÇÃO DA SAÍDA.
  - COMO IMPLEMENTAR?
    - TIMER START/WAIT
    - INTERRUPÇÃO DO TIMER
    - RTOS
  - QUANDO NEM AS OTIMIZAÇÕES COM PONTO FIXO FOREM SUFICIENTES PARA O TEMPO REAL DO SISTEMA, PODE SER NECESSÁRIO UTILIZAR UM HARDWARE QUE IMPLEMENTE O PID, EX:
    - PIC 16F1619
      - IMPLEMENTA POR HW A EQUAÇÃO OTIMIZADA DO PID.
      - GARANTE POR HW QUE NÃO HAVERÁ OVERFLOW DO TAMANHO DOS REGISTRADORES.
      - PODE SER IMPLEMENTADO USANDO AS FERRAMENTAS DA MICROCHIP: MCC - MICROCHIP CODE CONFIGURATOR.
      - TEMPOS ALCANÇADOS:
        - USANDO O CÓDIGO GERADO PELO MCC: 61,2 μs (16,34 KHz)
        - OTIMIZANDO O CÓDIGO GERADO PELO MCC: 8,17 μs (122,1 KHz)

- SINTONIZAÇÃO DE PID:

- MÉTODO MANUAL (EMPÍRICO):

  - DEPENDE DE ALGUMA EXPERIÊNCIA SOBRE O SISTEMA.
  - EFEITO DE AUMENTAR CADA UM DOS PARÂMETROS:

GANHO	TEMPO DE SUBIDA	OVERSHOOT	TEMPO DE ACOMODAÇÃO	ERRO EM REGIME PERMANENTE	ESTABILIDADE
K_p	DIMINUI	AUMENTA	AUMENTA MUITO POUCO	DIMINUI	DIMINUI
K_i	DIMINUI	AUMENTA	AUMENTA	ELIMINA	DIMINUI
K_D	QUASE SEM IMPACTO	DIMINUI	DIMINUI	SEM EFEITO	AUMENTA SE O K_D FOR PEQUENO

- MÉTODO DE SENSIBILIDADE LIMITE (EMPÍRICO - ZIEGLER/NICHOLS MF)

  - BASEADO NA RESPOSTA EM MALHA FECHADA.
  - O SISTEMA É LEVADO A OSCILAÇÃO APENAS COM GANHO PROPORCIONAL (K_p).
    - O SISTEMA DEVE SER CAPAZ DE OSCILAR.
  - AUMENTA-SE O GANHO K_p ATÉ QUE O SISTEMA COMECE A OSCILAR COM AMPLITUDE E FREQUÊNCIA CONSTANTES, ESTE VALOR DE K_p SERÁ O K_c (GANHO CRÍTICO).
  - MEDE-SE O T_c (PERÍODO DA OSCILAÇÃO).
  - CALCULA-SE K_p, T_i, T_D DE ACORDO COM A TABELA ABAIXO:

	K_p	T_i	T_D
CONTROLADOR P	$0{,}5K_c$	∞	0
CONTROLADOR PI	$0{,}4K_c$	$0{,}8T_c$	0
CONTROLADOR PID	$0{,}6K_c$	$0{,}5T_c$	$0{,}125T_c$

$$K_i = K_p / T_i$$

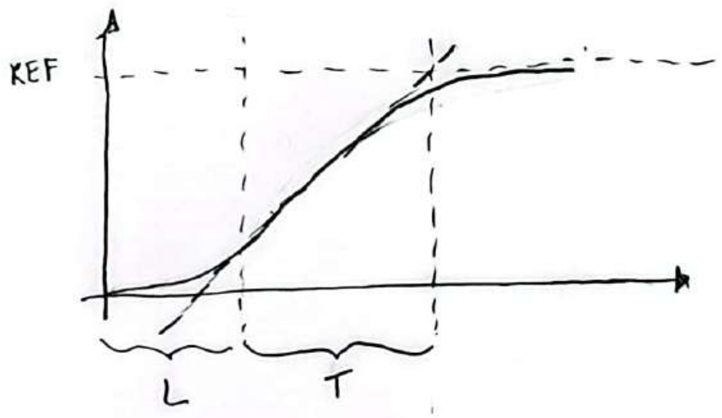
$$K_D = K_p \cdot T_D$$

- ESTE MÉTODO FORNECE BONS RESULTADOS, MAS QUE PODEM DEMANDAR ALGUNS AJUSTES FINOS.

- EXISTEM OUTRAS TABELAS PARA ESTE MÉTODO.

- POSSUI OVERSHOOT DE UNS 25%.

- MÉTODO DA CURVA DE REAÇÃO (EMPÍRICO - ZIEGLE/NICHOLS MA).
  - BASEADO NA RESPOSTA DE MALHA ABERTA DO SISTEMA.
  - UTILIZADO QUANDO NÃO QUEREMOS/PODEMOS COLOCAR O SISTEMA PARA OSCILAR.
  - UTILIZA-SE UM DEGRAU PARA A ANÁLISE DO SISTEMA.
  - A RESPOSTA DEVE POSSUIR O FORMATO DE UMA CURVA EM S.



	K_P	T_i	T_D
CONTROLADOR P	$\frac{T}{L}$	∞	0
CONTROLADOR PI	$0{,}9 \cdot \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0{,}3}$	0
CONTROLADOR PID	$1{,}2 \cdot \frac{T}{L}$	$2L$	$0{,}5 \cdot L$

$$K_i = K_p / T_i$$

$$K_d = K_p \cdot T_D$$

- MÉTODOS DE COMPESAÇÃO POR FASE E ALOCAÇÃO DE PÓLOS (PROJETO):
  - DEVE-SE CONHECER A EQUAÇÃO DA PLANTA.
  - UTILIZADO QUANDO É NECESSÁRIO "DOMAR" O SISTEMA PARA QUALQUER SITUAÇÃO QUE SE APRESENTE.
  - ATRAVÉS DE DEFINIÇÕES DE TEMPO DE ACOMODAÇÃO E MÁXIMO OVERSHOOT, SÃO ENCONTRADOS K_P, K_i E K_D.