

COMPENSAÇÃO ANGULAR E REMOÇÃO DA COMPONENTE DE SEQUÊNCIA ZERO NA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

Por Rafael Cardoso

I. INTRODUÇÃO

O princípio da proteção diferencial é de que a soma das correntes que entram na zona de proteção deve ser igual à soma das correntes que saem desta zona.

A zona de proteção é definida como a região entre os transformadores de corrente, como ilustra a figura 1:

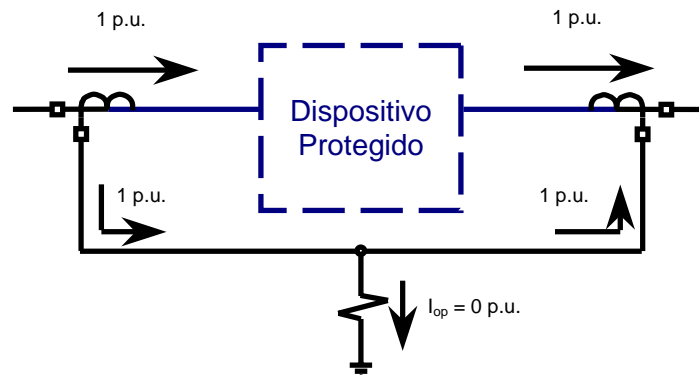


Figura 1- Zona de proteção

No caso de um transformador como dispositivo protegido, a correta operação da proteção diferencial requer que as correntes do primário e secundário medidas pelo relé diferencial estejam em fase. Por exemplo, em um transformador conectado em delta/estrela, as correntes dos enrolamentos estarão defasadas 30° entre si. Se não houver uma compensação deste defasamento, o relé entenderá como uma condição de falta e irá portanto operar. A correção do defasamento deve sempre ser considerada.

II. COMPENSAÇÃO ANGULAR

Em algumas conexões de transformadores de potência, as correntes do lado primário não estão em fase com as correntes do secundário. Por exemplo, a figura 2 mostra um transformador com conexão delta no primário (enrolamento 1) e conexão estrela no secundário (enrolamento 2).

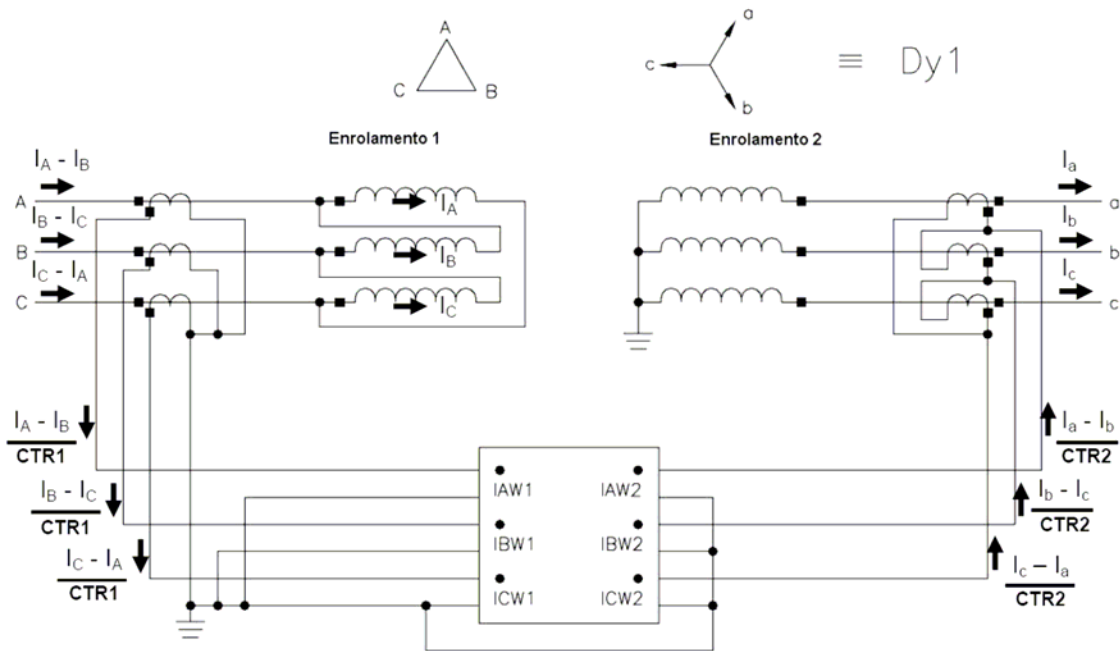


Figura 2 - Transformador Delta-Estrela

A corrente no enrolamento 1, $I_A - I_B$, está adiantada em 30° da corrente do enrolamento 2. Com relés eletromecânicos, a compensação da diferença angular era feita na conexão dos TCs, ou seja, os TCs do lado estrela do transformador eram conectados em delta e os TCs do lado delta do transformador eram conectados em estrela. No enrolamento 1 as correntes que chegam ao relé são:

$$IAW1 = \frac{I_A - I_B}{CTR1}$$

$$IBW1 = \frac{I_B - I_C}{CTR1}$$

$$ICW1 = \frac{I_C - I_A}{CTR1}$$

Para o enrolamento 2, as correntes são:

$$IAW2 = -\frac{1}{CTR2} \cdot (I_a - I_b)$$

$$IBW2 = -\frac{1}{CTR2} \cdot (I_b - I_c)$$

$$ICW2 = -\frac{1}{CTR2} \cdot (I_c - I_a)$$

Verifica-se portanto que a conexão delta dos TCs no secundário compensaram o defasamento angular no transformador, como mostra a figura 3:

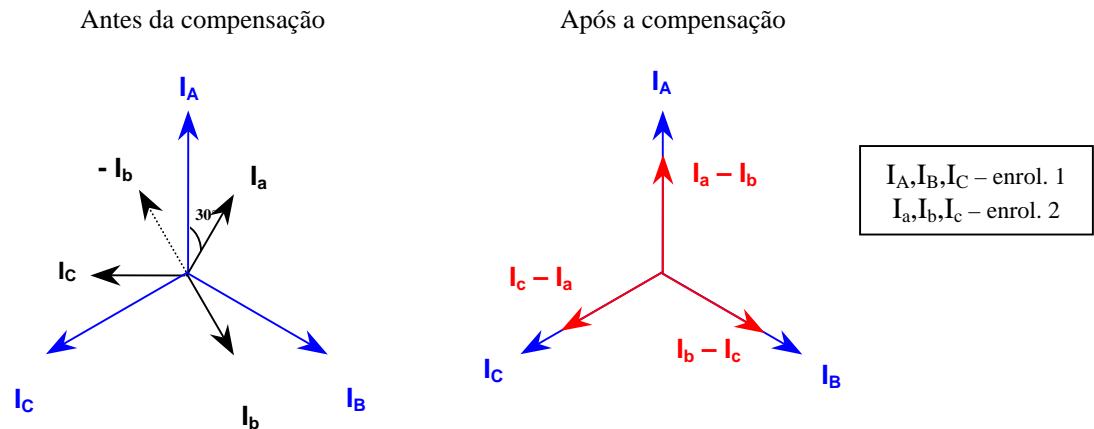


Figura 3 - Diagramas fasoriais

Hoje com os relés microprocessados, estas compensações podem ser feitas através de software, estando os TCs conectados de qualquer maneira. Os relés para proteção diferencial matematicamente criam uma conexão delta. As equações a seguir mostram as três correntes de linha do lado primário do transformador na figura 2:

$$I_{AB} = I_A - I_B$$

$$I_{BC} = I_B - I_C$$

$$I_{CA} = I_C - I_A$$

Colocando numa forma matricial, vem:

$$\begin{bmatrix} I_{AB} \\ I_{BC} \\ I_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Renomeando $I_{AB} = I_{A_COMP}$, completamos as relações entre as correntes da conexão Dy1 (dividido por raiz de 3 para corrigir a magnitude).

$$\begin{bmatrix} I_{A_COMP} \\ I_{B_COMP} \\ I_{C_COMP} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Por exemplo, para calcular os valores compensados das três correntes do sistema (tomando I_A como referência), multiplica-se as três correntes que entram no relé pela matriz de compensação M:

$$M = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{A_COMP} \\ I_{B_COMP} \\ I_{C_COMP} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ \\ 1 \angle -120^\circ \\ 1 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{A_COMP} \\ I_{B_COMP} \\ I_{C_COMP} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1,73 \angle 30^\circ \\ 1,73 \angle -90^\circ \\ 1,73 \angle -150^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{A_COMP} \\ I_{B_COMP} \\ I_{C_COMP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 30^\circ \\ 1 \angle -90^\circ \\ 1 \angle -150^\circ \end{bmatrix}$$

1.1. Ajustes nos relés

Através do ajuste $WnCTC = m$, o relé seleciona uma de suas matrizes para fazer a compensação. Os valores que “m” pode assumir são valores discretos de 0 a 12 que fisicamente representam o número de incrementos de 30° no sentido anti-horário para sistema com rotação de fases ABC ou 30° no sentido horário para o sistema ACB.

As correntes que entram no terminal n do relé (I_{AWn} , I_{BWn} e I_{CWn}) são compensadas através da multiplicação por alguma das matrizes ($CTC(m)$) originando as correntes compensadas (I_{AWnC} , I_{BWnC} e I_{CWnC}).

$$\begin{bmatrix} I_{AWnC} \\ I_{BWnC} \\ I_{CWnC} \end{bmatrix} = [CTC(m)] \cdot \begin{bmatrix} I_{AWn} \\ I_{BWn} \\ I_{CWn} \end{bmatrix}$$

As 13 matrizes de compensação são:

$$[CTC(0)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(1)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(2)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(3)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(4)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(5)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(6)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(7)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(8)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(9)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(10)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(11)] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[CTC(12)] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

I.2. Processo para determinar a matriz de compensação

Passo 1: Adote o enrolamento 1 como referência.

Para o enrolamento 1 escolha entre as matrizes 0 ou 12, as quais não aplicam nenhum defasamento nas correntes de entrada. Escolha 0 se já houver alguma conexão delta até o relé, ou seja, se este lado do transformador estiver conectado em delta ou então se os TCs estiverem fechados desta maneira. Se ambos, enrolamento 1 e TCs, estiverem fechados em conexão estrela, escolha a matriz 12 para remoção da componente de seqüência zero.

Passo 2: Verifique em quantos graus o secundário está atrasado com relação ao primário e escolha a matriz de compensação conforme a figura 4:

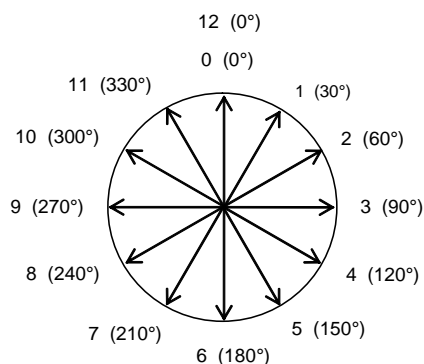


Figura 4 – Rotação

Obs: com sentido de rotação de fases ABC as matrizes compensam os ângulos no sentido anti-horário. Se o sentido de rotação for ACB a correção é feita no sentido horário.

Exemplo:

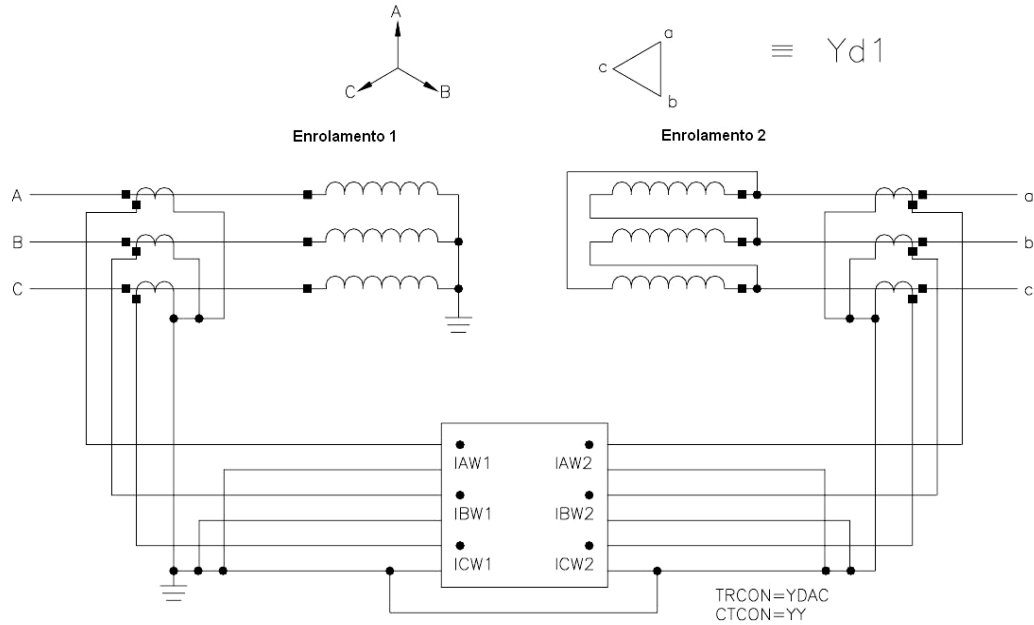


Figura 5 - Transformador Yd1 e TCs em estrela

Neste exemplo o enrolamento 1 do transformador está conectado em estrela e os TCs deste lado foram também fechados em estrela. Portanto, adota-se para o enrolamento 1 a matriz 12 a fim de remover a componente de seqüência zero.

Pela conexão Yd1, o secundário (neste caso em delta) se atrasa do primário em 30°. Se o sentido de rotação do sistema for ABC adota-se a matriz 1 (adiantar a corrente em 30°). Agora se o sentido de rotação for ACB, utiliza-se a matriz 11 (atrasar a corrente em 330°). Obs: ver rotação na figura 3.

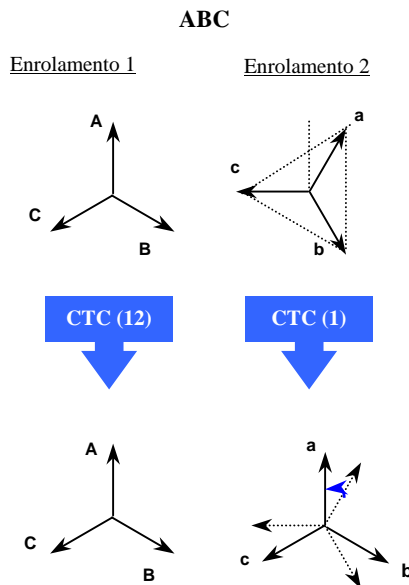


Figura 6 - Compensação com rotação ABC

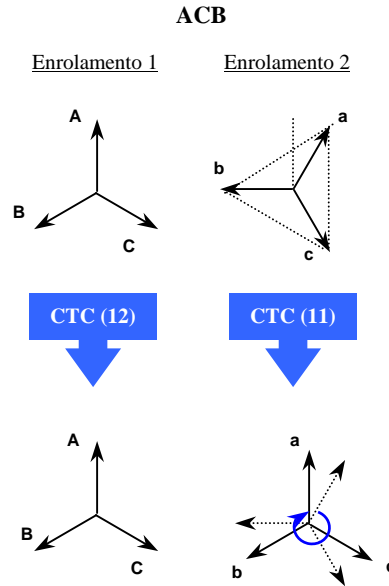


Figura 7 - Compensação com rotação ACB

III. PORQUE ELIMINAR A CORRENTE DE SEQUÊNCIA ZERO?

A figura 8 mostra um transformador delta-estrela aterrado. Falta envolvendo a terra no lado de alta do transformador resultam em correntes de linha e conseqüentemente correntes no secundário dos TCs de alta. No lado de baixa do transformador a corrente de falta de seqüência zero circula dentro da conexão delta do transformador mas não circula no secundário dos TCs de baixa. Para o relé diferencial, a corrente de falta chega apenas no enrolamento 1 o que pode causar operação indevida, ou seja, uma atuação para falta fora da zona de proteção.

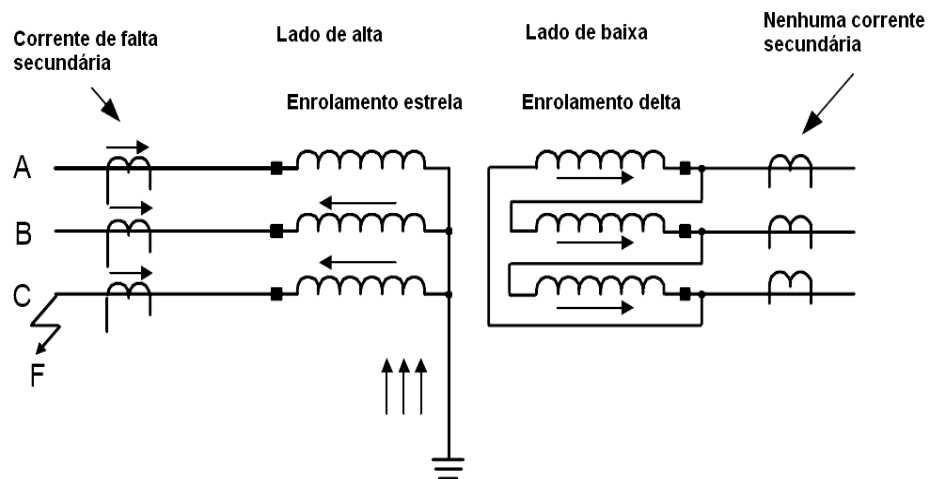


Figura 8 - Falta fora da zona de proteção

Vê-se claramente a necessidade de remover a corrente de seqüência zero que chega ao relé por um dos enrolamentos, uma vez que no outro enrolamento esta corrente será filtrada no delta do próprio transformador. Para demonstrar a remoção da componente de seqüência zero pela conexão delta pode-se utilizar a corrente de linha I_{ab} em termos de componentes simétricas, como segue:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2}$$

$$I_c = I_{c0} + I_{c1} + I_{c2}$$

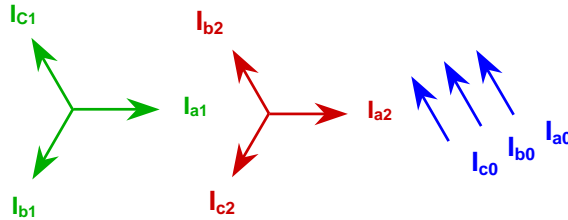


Figura 9 - Diagramas das componentes simétricas

Colocando em termos das componentes da fase A, vem:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2}$$

$$I_c = I_{a0} + a \cdot I_{a1} + a^2 \cdot I_{a2}$$

onde,

$$a = e^{j120}$$

$$a^2 = e^{j240}$$

Sabe-se que:

$$I_{ab} = I_a - I_b = (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) - (I_{a0} + a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2})$$

$$I_{ab} = I_{a1} \cdot (1 - a^2) + I_{a2} \cdot (1 - a)$$

De fato a conexão delta elimina a componente de seqüência zero, mas além disso ela também acrescenta um defasamento.

Os relés microprocessados são capazes de matematicamente remover a seqüência zero e não criar nenhum defasamento. É o caso da matriz 12 da página 5. Veja:

$$I_{A_COMP} = (I_A - I_0)$$

onde,
$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_{A\text{COMP}} = \left[I_A - \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \right]$$

$$I_{A\text{COMP}} = \frac{1}{3}(3.I_A - I_A - I_B - I_C)$$

$$I_{A\text{COMP}} = \frac{1}{3}(2.I_A - I_B - I_C)$$

Da mesma maneira para as demais fases:

$$I_{B\text{COMP}} = \frac{1}{3}(2.I_B - I_A - I_C)$$

$$I_{C\text{COMP}} = \frac{1}{3}(2.I_C - I_B - I_A)$$

E de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_{A\text{COMP}} \\ I_{B\text{COMP}} \\ I_{C\text{COMP}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

IV. CONCLUSÃO

Como apresentado neste artigo, é necessário ao se utilizar a proteção diferencial em um transformador atentar-se para a forma de conexão de seus enrolamentos. Se esta conexão originar algum defasamento entre as fases do enrolamento primário e secundário será preciso uma compensação. Para todos os casos, os relés diferenciais microprocessados são capazes de compensar matematicamente estes defasamentos e de forma bastante simples de ser ajustada.