

Distribuição de Energia Elétrica

Regulação de Tensão

Lucas S Melo

Universidade Federal do Ceará

Junho de 2017

Regulação de Tensão

A regulação de tensão é uma importante função de um sistema de distribuição.

Os meios mais comuns de se realizar regulação de tensão são:

- Uso de reguladores de tensão;
- Uso de transformadores com comutador de derivação sobcarga;
- Uso de banco de capacitores.

Níveis padrões de tensão

A ANSI define alguns termos para tratarmos de níveis de tensão:

- Tensão nominal do sistema;
- Tensão máxima do sistema;
- Tensão de serviço;
- Tensão de utilização;
- Tensão de utilização nominal;

Níveis padrões de tensão

O PRODIST em seu módulo 8 sobre qualidade de energia define três níveis de tensão no sistema, são eles:

- adequada;
- precário;
- crítico;

Níveis de padrões de tensão

Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Tabela 5 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(348 \leq TL \leq 396)/(201 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(327 \leq TL < 348$ ou $396 < TL \leq 403)/$ $(189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 327$ ou $TL > 403)/(TL < 189$ ou $TL > 233)$

Regulador de tensão

Um método muito comum de realizar regulação de tensão em um alimentador é a utilização de **reguladores de tensão** que podem ser trifásicos ou monofásicos, conectados em estrela, delta ou delta aberto.

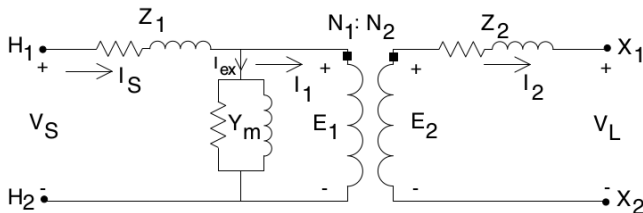
Um regulador de tensão nada mais é que um **autotransformador**, com um mecanismo de **mudança de tap** do enrolamento série. A tensão é então modificada de acordo com a **variação do número de espiras** do enrolamento do autotransformador.

Regulador de tensão

Um **autotransformador** pode ser visto como um transformador de dois enrolamentos, onde existe uma conexão elétrica entre um dos terminais do primário a um dos terminais do secundário. Por isso é importante revisarmos a teoria de **transformadores monofásicos e autotransformadores**.

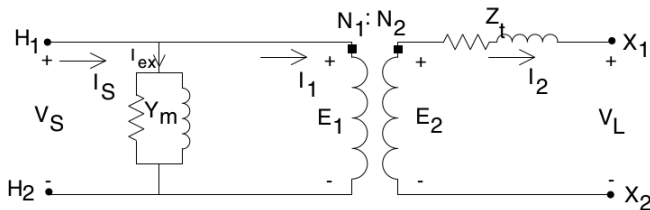
Transformador monofásico

Na figura é mostrado o modelo de um transformador monofásico simples:



Transformador monofásico

Referindo a impedância do primário para o lado secundário:



Com:

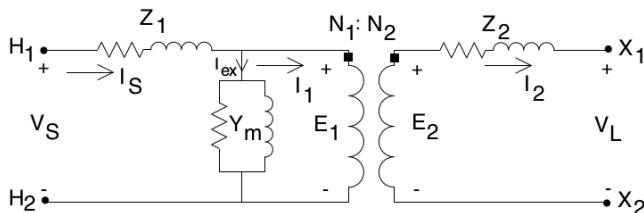
$$Z_t = n^2 \cdot Z_1 + Z_2 \quad (1)$$

Em que:

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (2)$$

Transformador monofásico

De acordo com este modelo:

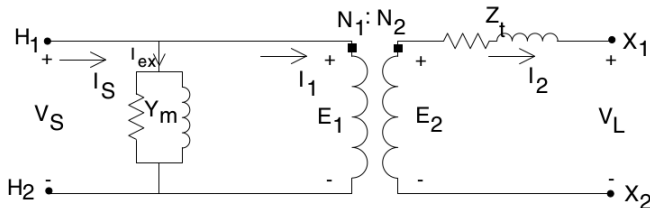


$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 = n \cdot E_1 \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = n \cdot I_2 \quad (4)$$

Transformador monofásico

Aplicando a Lei de Kirchhoff no secundário do transformador:



$$E_2 = V_L + Z_t \cdot I_2 \quad (5)$$

$$V_S = E_1 = \frac{1}{n} \cdot E_2 = \frac{1}{n} \cdot V_L + \frac{Z_t}{n} \cdot I_2 \quad (6)$$

Transformador monofásico

$$V_S = \frac{1}{n} \cdot V_L + \frac{Z_t}{n} \cdot I_2 \quad (7)$$

De forma geral:

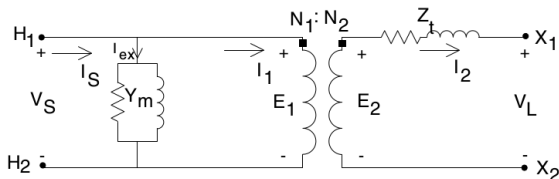
$$V_S = a \cdot V_L + b \cdot I_2 \quad (8)$$

Em que:

$$a = \frac{1}{n} \quad (9)$$

$$b = \frac{Z_t}{n} \quad (10)$$

Transformador monofásico



A corrente de entrada do transformador é dada por:

$$I_S = Y_m \cdot V_S + I_1 \quad (11)$$

Substituindo o termo V_S e I_1 encontrados anteriormente:

$$I_S = Y_m \cdot \frac{1}{n} V_L + Y_m \cdot \frac{Z_t}{n} \cdot I_2 + n \cdot I_2 \quad (12)$$

$$I_S = \frac{Y_m}{n} \cdot V_L + \left(\frac{Y_m \cdot Z_t}{n} + n \right) \cdot I_2 \quad (13)$$

Transformador monofásico

$$I_S = \frac{Y_m}{n} \cdot V_L + \left(\frac{Y_m \cdot Z_t}{n} + n \right) \cdot I_2 \quad (14)$$

Escrevendo na forma geral:

$$I_S = c \cdot V_L + d \cdot I_2 \quad (15)$$

Em que:

$$c = \frac{Y_m}{n} \quad (16)$$

$$d = \frac{Y_m \cdot Z_t}{n} + n \quad (17)$$

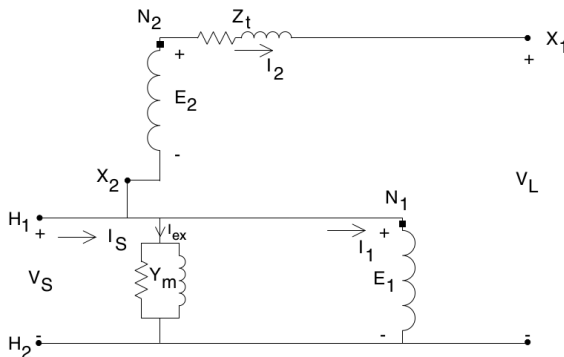
Transformador monofásico

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_L \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

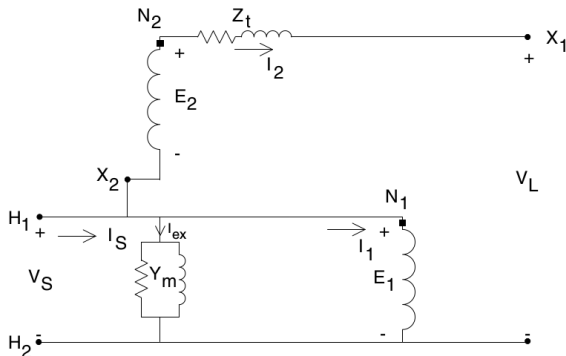
Essas equações para cálculo de tensões e correntes no lado da fonte em função das tensões e correntes no lado da carga têm aspecto muito semelhante ao desenvolvido nas equações que modelam linhas de distribuição, conforme visto em aulas anteriores.

Autotransformador

Um transformador de dois enrolamentos pode ser conectado como um autotransformador, por exemplo conectando o terminal H_1 ao terminal X_2 , conforme mostrado na figura:

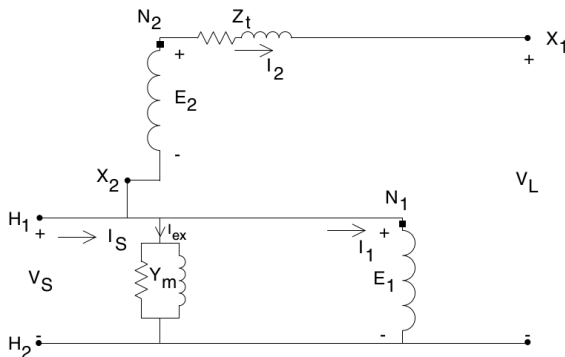


Autotransformador



Conforme mostrado na figura o enrolamento secundário será chamado de **enrolamento série**, enquanto o enrolamento primário será chamado **enrolamento em derivação**.

Autotransformador



Com base no modelo do transformador monofásico:

$$E_1 + E_2 = V_L + Z_t \cdot I_2 \quad (19)$$

Autotransformador

$$E_1 + E_2 = V_L + Z_t \cdot I_2 \quad (20)$$

Utilizando a relação de tensão no transformador monofásico:

$$E_1 + n \cdot E_1 = (1 + n) \cdot E_1 = V_L + Z_t \cdot I_2 \quad (21)$$

Uma vez que a tensão $V_S = E_1$ e $I_2 = I_L$. Então:

$$V_S = \frac{1}{1 + n} \cdot V_L + \frac{Z_t}{1 + n} \cdot I_L \quad (22)$$

Autotransformador

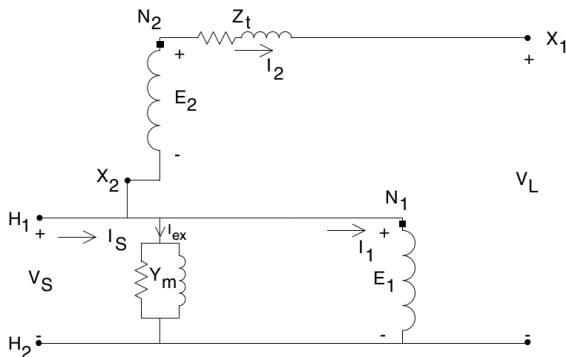
Na forma geral:

$$V_S = a \cdot V_L + b \cdot I_L \quad (23)$$

$$a = \frac{1}{1+n} \quad (24)$$

$$b = \frac{Z_t}{1+n} \quad (25)$$

Autotransformador



Agora, aplicado lei de Kirchhoff das correntes no nó H_1 :

$$I_S = I_1 + I_2 + I_{ex} \quad (26)$$

$$I_S = (1 + n) \cdot I_2 + Y_m \cdot V_S \quad (27)$$

Autotransformador

$$I_S = (1 + n) \cdot I_2 + Y_m \cdot V_S \quad (28)$$

Substituindo V_S nessa equação:

$$I_S = (1 + n) \cdot I_2 + Y_m \cdot \left(\frac{1}{1 + n} \cdot V_L + \frac{Z_t}{1 + n} \cdot I_2 \right) \quad (29)$$

$$I_S = \frac{Y_m}{1 + n} \cdot V_L + \left(\frac{Y_m \cdot Z_t}{1 + n} + n + 1 \right) \cdot I_2 \quad (30)$$

$$I_S = c \cdot V_L + d \cdot I_2 \quad (31)$$

Com:

$$c = \frac{Y_m}{1 + n} \quad (32)$$

$$d = \frac{Y_m \cdot Z_t}{1 + n} + n + 1 \quad (33)$$

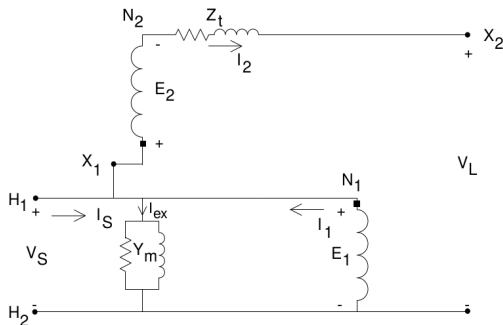
Autotransformador

Novamente, temos:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_L \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Autotransformador

Caso o terminal do primário H_1 for conectado no terminal secundário X_1 ao invés do terminal X_2 , a conexão será do tipo subtrativa:



$$E_1 - E_2 = V_L + Z_t \cdot I_2 \quad (35)$$

Autotransformador

Se desenvolvermos chegaremos a equações bem semelhantes da conexão aditiva. De forma geral as equações para conexão aditiva e subtrativa ficam:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_L \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$a = \frac{1}{1 \pm n} \quad (37)$$

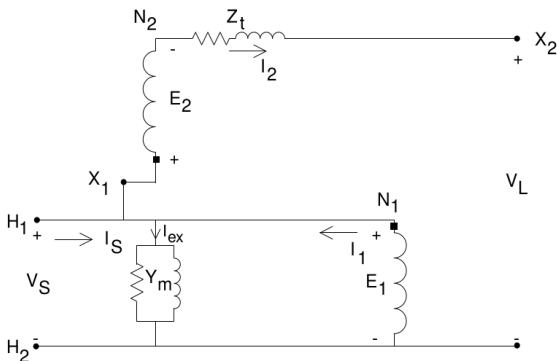
$$b = \frac{Z_t}{1 \pm n} \quad (38)$$

$$c = \frac{Y_m}{1 \pm n} \quad (39)$$

$$d = \frac{Y_m \cdot Z_t}{1 \pm n} + n \pm 1 \quad (40)$$

Valores nominais de um autotransformador

A potência nominal de um autotransformador é dada pelo produto da tensão no primário pela corrente no primário, ou pelo produto da tensão no secundário pela corrente no secundário.



Valores nominais de um autotransformador

Relacionando as potências de um autotransformador com as potências de um transformador simples de dois enrolamentos, teremos:

$$V_{autoL} = E_1 \pm E_2 = (1 \pm n) \cdot E_1 \quad (41)$$

A potência de saída fica:

$$S_{auto} = V_{autoL} \cdot I_2 = (1 \pm n) \cdot E_1 \cdot I_2 \quad (42)$$

Agora como $I_2 = \frac{I_1}{n}$, então:

$$S_{auto} = \frac{1 \pm n}{n} \cdot E_1 \cdot I_1 \quad (43)$$

Já que $S_{trafo} = E_1 \cdot I_1$, então:

$$S_{auto} = \frac{1 \pm n}{n} \cdot S_{trafo} \quad (44)$$

Valores nominais de um autotransformador

$$S_{auto} = \frac{1 \pm n}{n} \cdot S_{trafo} \quad (45)$$

Essa equação dá a relação entre as potências de um transformador monofásico quando tem seus terminais conectados como autotransformador.

O que se pode constatar é que:

Quando se tem $n \rightarrow \infty$ então $S_{auto} \approx S_{trafo}$.

Quando, $n \rightarrow 0$, então $S_{auto} \rightarrow \infty$

Em geral nos **autotransformadores** o valor de n é pequeno, então:

$$S_{auto} \gg S_{trafo} \quad (46)$$

Valores nominais de um autotransformador

Por exemplo, se tivermos um transformador de 150 kVA
13,8kV : 380V, conectado como autotransformador, então:

$$n = \frac{380}{13,8 \cdot 10^3} = 0,0275 \quad (47)$$

Este, quando conectado como autotrafo elevador terá relação
13,8 kV : 14,2 kV e será capaz de entregar uma potência de:

$$S_{auto} = \frac{1+n}{n} \cdot S_{trafo} = \frac{1+0,0275}{0,0275} \cdot 150 \cdot 10^3 \approx 5,6 \text{ MVA} \quad (48)$$

A corrente de linha suportada por este autotransformador será de:

$$I_{linha} = \frac{5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 10^3} = 234,56 \text{ A} \quad (49)$$

Regulador de tensão

O **regulador de tensão** consiste de um **autotransformador** e de um **comutador de derivação sob-carga**.

Assim, o nível de tensão é modificado por meio da **mudança dos taps** do enrolamento série do autotransformador, em que a posição do tap é definida por um **controlador automático**.

Em geral estes equipamentos permitem uma faixa de ajuste de $\pm 10\%$ na tensão, em até 32 passos e podem ser conectados tanto para **eleva a tensão** quanto para **rebaixá-la**.
Logicamente, sua **maior aplicação é na elevação de tensão**.

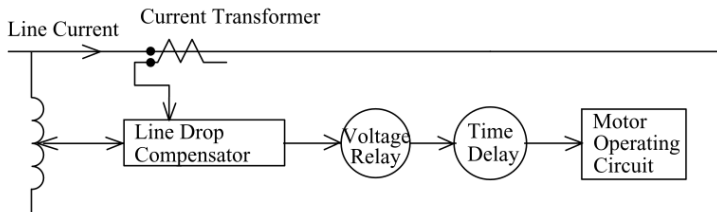
[illegible]

Regulador de tensão

Alguns ajustes típicos necessários à configuração do regulador de tensão são:

- **Nível de tensão** desejado na carga;
- **Faixa de variação da tensão:** por exemplo se o nível de tensão desejado for 120,0V, e a faixa de variação for de 2,0V, então o regulador de tensão fará mudança nos taps até que a tensão fique dentro da faixa de 119-121V;
- **Atraso na atuação:** tempo de atraso na atuação para evitar mudanças em transitórios ou alterações de corrente de curta duração;
- **Compensação de linha:** impedância total da linha entre o regulador e a carga com tensão a ser ajustada.

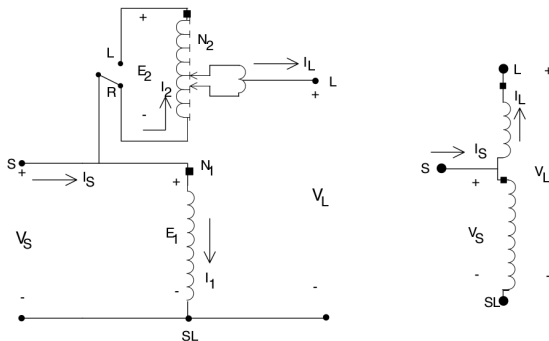
Regulador de tensão



Componentes de um regulador de tensão.

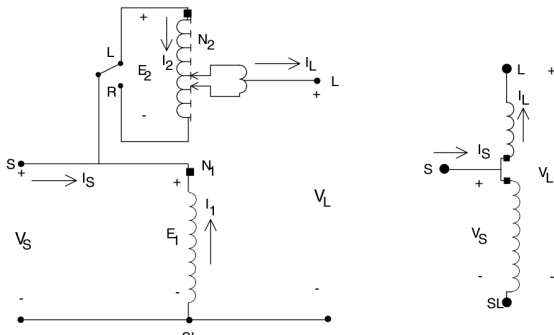
Regulador de Tensão Monofásico Tipo A

O Regulador tipo A tem seu enrolamento em derivação ligado ao circuito primário e o enrolamento série é ligado ao enrolamento em derivação e à carga. Nesse tipo de ligação a corrente de excitação do autotransformador varia.



Regulador de tensão tipo A em ligação elevadora.

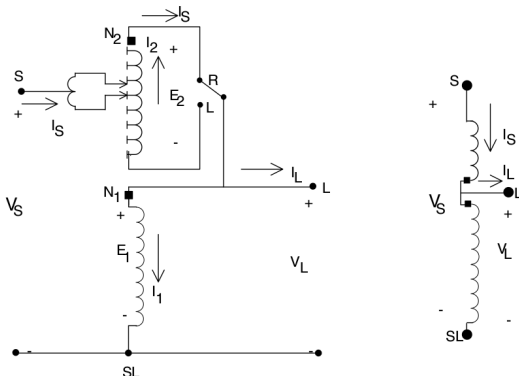
Regulador de Tensão Monofásico Tipo A



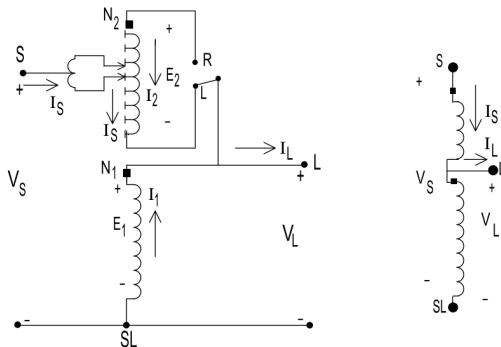
Regulador de tensão tipo A em ligação rebaixadora.

Regulador de Tensão Monofásico Tipo B

O regulador tipo B tem o enrolamento tipo série ligado ao circuito primário e ao enrolamento em derivação, que é ligado diretamente à carga. Nesse caso a corrente de excitação do autotrafo não varia pois ele está ligado a um circuito regulado.



Regulador de Tensão Monofásico Tipo B



Regulador de tensão tipo A em ligação rebaixadora.

Regulador de Tensão Monofásico Tipo B

As equações de tensão que modelam o comportamento do **regulador tipo B elevador** são:

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \quad (50)$$

$$V_s = E_1 - E_2 \quad (51)$$

$$V_L = E_1 \quad (52)$$

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_L \quad (53)$$

$$V_S = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot V_L \quad (54)$$

$$V_S = a_R \cdot V_L \quad (55)$$

$$a_R = 1 - \frac{N_2}{N_1} \quad (56)$$

Regulador de Tensão Monofásico Tipo B

As equações de corrente que modelam o comportamento do **regulador tipo B elevador** são:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (57)$$

$$I_L = I_S - I_1 \quad (58)$$

$$I_2 = I_S \quad (59)$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_S \quad (60)$$

$$I_L = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot I_S \quad (61)$$

$$I_L = a_R \cdot I_S \quad (62)$$

$$a_R = 1 - \frac{N_2}{N_1} \quad (63)$$

Constantes Generalizadas

Colocando as equações de tensão e corrente do **regulador tipo B elevador de tensão** é possível encontrar suas constantes generalizadas, *abcd*:

$$V_S = \frac{1}{a_R} \cdot V_L \quad (64)$$

$$I_S = a_R \cdot I_L \quad (65)$$

Dessa forma:

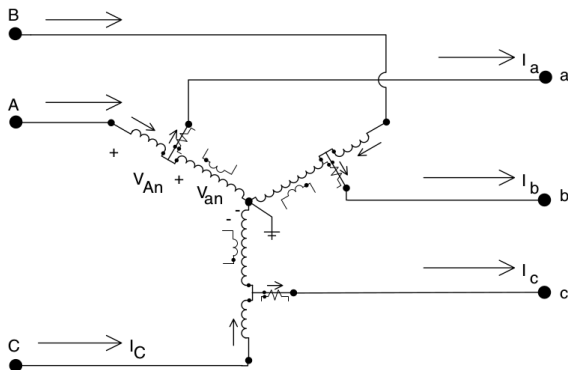
$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_R} & 0 \\ 0 & a_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_L \\ I_L \end{bmatrix} \quad (66)$$

Reguladores de tensão trifásicos

Três reguladores de tensão monofásicos podem ser conectados em uma ligação trifásica, sendo assim, cada regulador terá seu próprio mecanismo de regulação de tensão e irá aterar os taps do transformador individualmente. As ligações comuns de reguladores de tensão são:

- Ligação estrela;
- Ligação Delta;
- Ligação Delta-aberto;
- Ligação Estrela-aberta;

Reguladores de tensão trifásicos



Ligação Estrela de reguladores de tensão monofásicos

Reguladores de tensão trifásicos



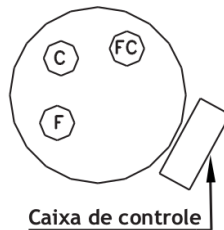
Instalação comum de reguladores de tensão

Itens a serem verificados antes do regulador ser ligado

- Nível de óleo;
- Porcelana das buchas;
- Rigidez dielétrica do óleo (se estiver abaixo de 30kV será necessário filtrá-lo);
- Megar as buchas de fonte, carga e neutro (Valor mínimo de resistência entre as buchas curto-circuitadas deve ser de $2.000M\Omega$)

Nomenclatura das buchas

ISOLADORES	NOMENCLATURA	
	ANSI	ABNT
FONTE	"S"	"F"
CARGA	"L"	"C"
NEUTRO	"SL"	"FC"



Disposição dos isoladores na tampa do regulador

Ligações

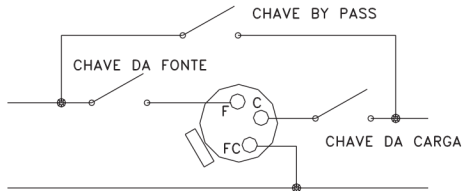


Figura 42 - MONOFÁSICO
Conexão de um regulador monofásico em uma linha monofásica.

Ligações

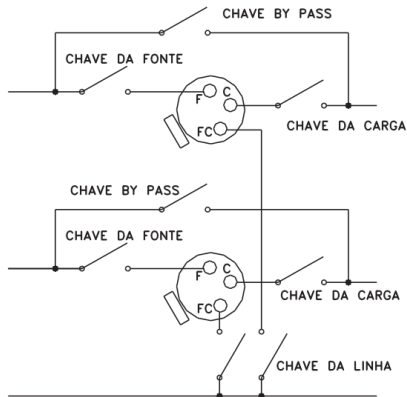


Figura 43 - DELTA ABERTO

Conexão de dois reguladores monofásicos em uma linha trifásica em delta aberto fornecendo ao sistema 10% de faixa de regulação nas 3 (três) fases.

Ligações

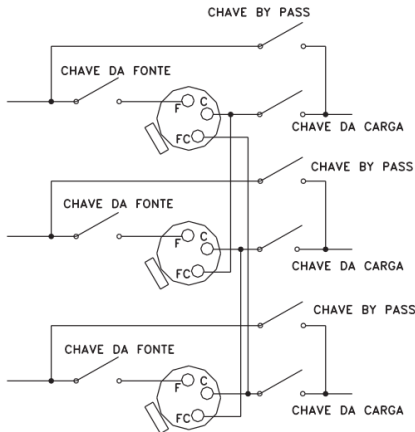


Figura 44 - DELTA FECHADO

Conexão de três reguladores monofásicos em uma linha trifásica em delta fechado fornecendo ao sistema 15% de faixa de regulação.

Ligações

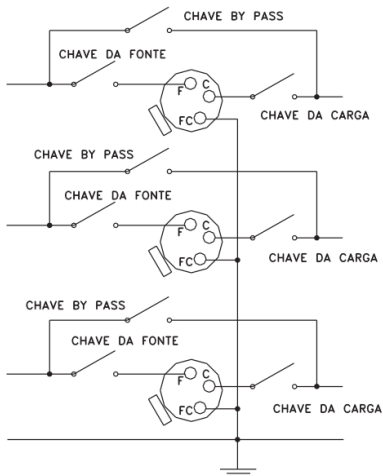


FIGURA 45 - CONECTADO EM ESTRELA

Conexão de três reguladores monofásicos em estrela em uma linha trifásica com neutro aterrado fornecendo ao sistema 10% de faixa de regulação.