

ALIMENTADORES

Cálculo da Tensão na Carga e na Fonte

ÍNDICE	PÁG.
1 - OBJETIVO	3
2 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	3
2.1 - Planilhas.....	3
3 - CIRCUITO BÁSICO	3
4 - CARGAS DE POTÊNCIA CONSTANTE	4
4.1 - Potência da Carga Constante.....	4
4.2 - Impedância da Carga Constante.....	5
4.3 - Ângulo da Impedância Carga Constante.....	5
4.4 - Corrente da Carga Constante.....	5
5 - CARGAS DE POTÊNCIA VARIÁVEL	5
5.1 - Potência de Carga Variável	6
5.2 - Impedância da Carga Variável.....	6
5.3 - Ângulo da Impedância Carga Variável	6
5.4 - Corrente da Carga Variável	6
6 - PARTIDA DE MOTORES	7
6.1 - Potência de Partida de Motores	7
6.2 - Impedância do(s) Motor(es) na Partida	7
6.3 - Ângulo da Impedância do(s) Motor(es) na Partida	8
6.4 - Corrente na Partida do(s) Motor(es)	8
7 - ALIMENTADORES	8
7.1 - Impedância dos Alimentadores	8
7.2 - Resistência e Reatância do(s) Alimentador(es).....	9
7.3 - Ângulo da Impedância	9
8 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO QUE SERÃO ANALISADAS	9
9 - CÁLCULO DA TENSÃO NA CARGA.....	9
10 - CÁLCULO DA TENSÃO DA FONTE.....	13
11 - ELABORAÇÃO DAS PLANILHAS EXCEL.....	15

1 - OBJETIVO

O objetivo deste documento é estudar os circuitos alimentadores visando calcular a tensão na carga quando se conhece a tensão na fonte e, calcular a tensão da fonte para atender a tensão definida na carga. Com base nesse estudo serão elaboradas as planilhas Excel para efetuar os cálculos.

2 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

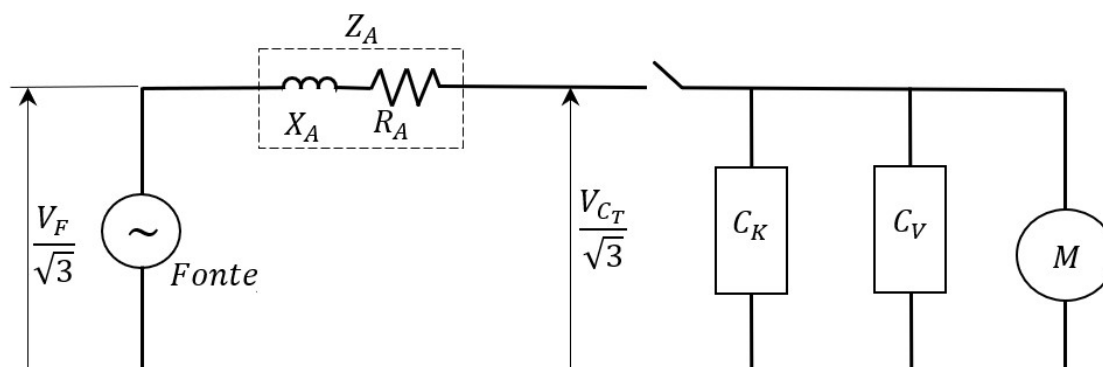
2.1 - Planilhas

PL.EL.SA.CA.04.R1 Alimentadores - Cálculo da Tensão na Carga

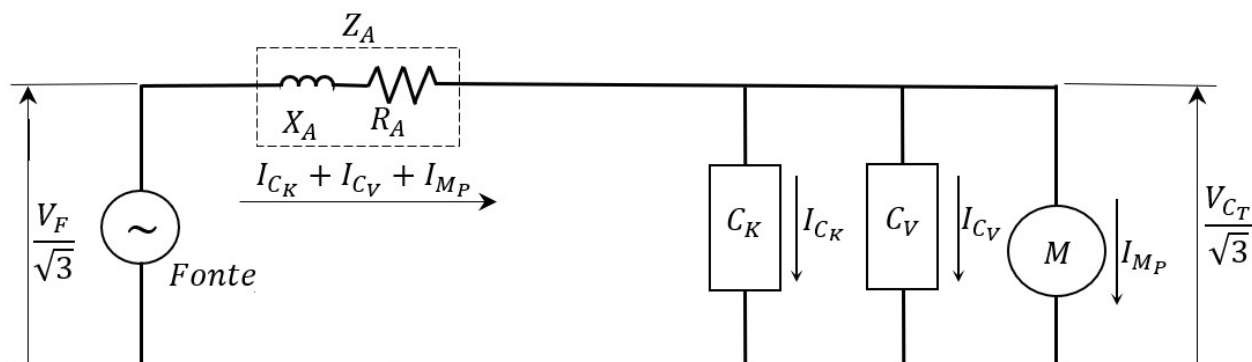
PL.EL.SA.CA.05.R1 Alimentadores - Cálculo da Tensão na Fonte

3 - CIRCUITO BÁSICO

A figura representa o circuito, cuja fonte é um circuito em estrela, solidamente aterrado, para alimentar os diversos tipos de cargas que são normalmente encontrados na prática. As cargas podem ser de potência constante, potência variável e partida de motores.



Antes da carga ser ligada, a tensão no terminal do circuito alimentador V_{C_T} será igual à tensão da fonte V_F .



A figura do circuito acima representa o circuito no instante que as cargas são ligadas.

Sendo:

V_F Tensão da fonte (V)

V_{C_T} Tensão na carga (V)

I_{C_K} Corrente da carga de potência constante C_K (A)

I_{C_V} Corrente da carga de potência variável C_V (A)

I_{M_P} Corrente de partida do(s) motor(es) (A)

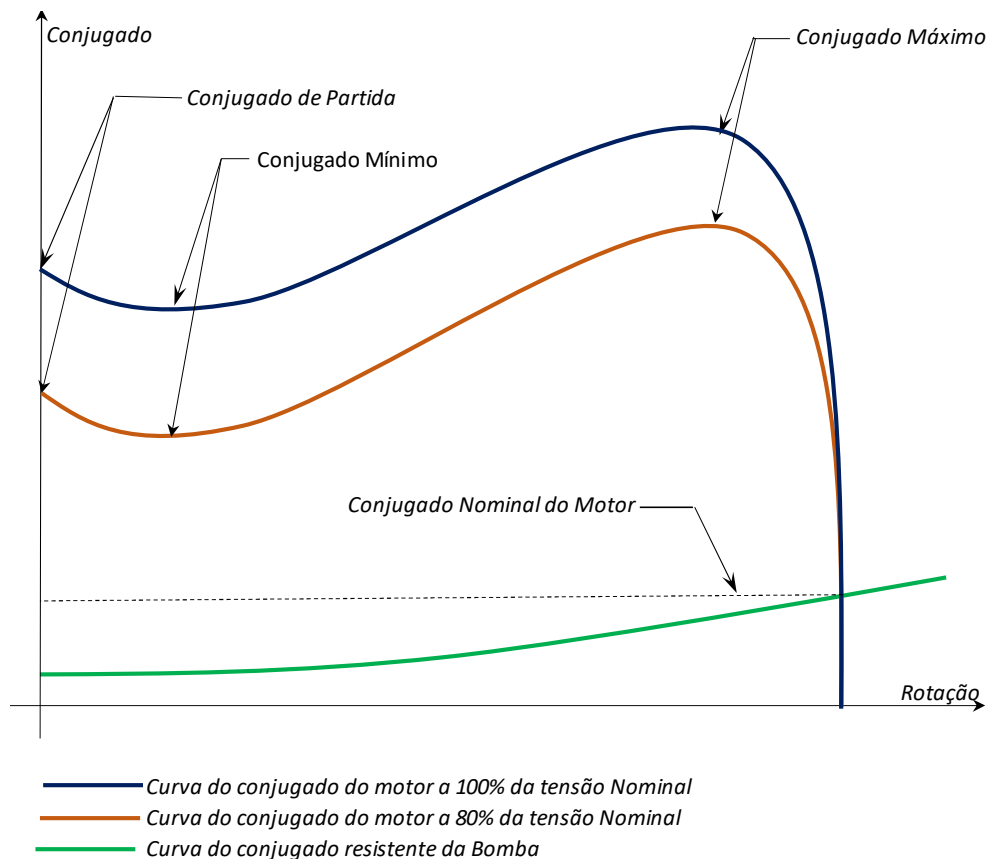
Z_A Impedância do alimentador (Ω)

R_A Resistência do alimentador (Ω)

X_A Reatância do alimentador (Ω)

4 - CARGAS DE POTÊNCIA CONSTANTE

Nas cargas de potência constante, a corrente varia em função da tensão para manter a potência constante. Neste caso estão, por exemplo, os carregadores de baterias, sistemas de comunicação e, principalmente, os motores de indução. Os motores indução têm a característica de manter a rotação praticamente constante com a variação de tensão (ver figura abaixo).



Potência = Força x Velocidade ou Potência = Torque x Velocidade angular

Observar que o conjugado do motor varia durante a partida do motor e é diferente para cada valor de tensão, mas o conjugado e a rotação se mantêm constantes durante a operação. Portanto, como a carga (Força ou Torque) e a Velocidade se mantêm constantes, a Potência também se mantém constante, ou seja, a variação da corrente é inversamente proporcional à variação da tensão.

4.1 - Potência da Carga Constante

A potência da carga constante no circuito é dada por:

$$P_{CK} = \frac{V_{Ts}^2}{Z_{CK}}$$

Onde:

P_{CK} - Potência da carga constante (VA)

V_{Ts} Tensão nos terminais do secundário do transformador (V)

Z_{CK} – Impedância da carga constante (Ω)

Na carga de potência constante, a potência é igual à potência nominal da carga, ou seja:

$$P_{CKn} = \frac{V_{CKn}^2}{Z_{CKn}}$$

P_{CKn} - Potência nominal da carga constante (VA)

V_{CKn} – Tensão nominal da carga constante (V)

Z_{CKn} – Impedância nominal da carga constante (Ω)

4.2 - Impedância da Carga Constante

Como a potência da carga é constante:

$$Z_{CK} = \frac{V_{Ts}^2}{P_{CKn}}$$

4.3 - Ângulo da Impedância Carga Constante

Como o fator de potência da carga é, normalmente, um valor arbitrado, por exemplo, igual a 0,85,

$$\theta_{CK} = \arccos(FP_{CK})$$

Onde:

FP_{CK} Fator de potência da carga constante

4.4 - Corrente da Carga Constante

Como:

$$\vec{I}_{CK} = \frac{\vec{V}_{Ts}}{\vec{Z}_{CK}}$$

$$\vec{I}_{CK} = \frac{\left(\frac{V_{Ts}}{\sqrt{3}}, 0\right)}{(Z_{CK}, \theta_{CK})}$$

$$\vec{I}_{CK} = \left(\frac{V_{Ts}}{\sqrt{3}Z_{CK}}, -\theta_{CK}\right)$$

Mas como,

$$Z_{CK} = \frac{V_{Ts}^2}{P_{CKn}}$$

$$\vec{I}_{CK} = \left(\frac{P_{CKn}}{\sqrt{3}V_{Ts}}, -\theta_{CK}\right)$$

5 - CARGAS DE POTÊNCIA VARIÁVEL

Nas cargas de potência variável a impedância é um valor constante. Portanto, a variação da tensão provoca a variação da corrente em função da impedância da carga. Neste caso podemos considerar, por exemplo, cargas compostas por transformadores, reatores e resistores. Nestas cargas a corrente é diretamente proporcional à variação da tensão.

5.1 - Potência de Carga Variável

Na carga de potência variável temos que:

$$P_{C_V} = \frac{V_{Ts}^2}{Z_{C_V}}$$

Onde:

P_{C_V} Potência da carga variável (VA)

V_{Ts} Tensão nos terminais do secundário do transformador (V)

Z_{C_V} Impedância da carga variável (Ω)

A potência nominal da carga variável é:

$$P_{C_{Vn}} = \frac{V_{C_{Vn}}^2}{Z_{C_{Vn}}}$$

Onde:

$P_{C_{Vn}}$ Potência nominal da carga variável (VA)

$V_{C_{Vn}}$ Tensão nominal da carga variável (V)

$Z_{C_{Vn}}$ Impedância nominal da carga variável (Ω)

5.2 - Impedância da Carga Variável

A carga é variável porque a impedância é constante (por exemplo resistor), logo:

$$Z_{C_V} = Z_{C_{Vn}}$$

$$Z_{C_V} = Z_{C_{Vn}} = \frac{V_{C_{Vn}}^2}{P_{C_{Vn}}}$$

$$Z_{C_V} = \frac{V_{C_{Vn}}^2}{P_{C_{Vn}}}$$

5.3 - Ângulo da Impedância Carga Variável

O fator de potência da carga variável pode ser arbitrado ou conhecido. Por exemplo, se for um resistor o fator de potência é 1.

$$\theta_{C_V} = \arccos(FP_{C_V})$$

Onde:

FP_{C_V} Fator de potência da carga variável

5.4 - Corrente da Carga Variável

Como:

$$\overrightarrow{I_{C_V}} = \frac{\overrightarrow{V_{Ts}}}{Z_{C_V}}$$

$$I_{C_V} = \frac{\left(\frac{V_{Ts}}{\sqrt{3}}, 0\right)}{(Z_{C_V}, \theta_{C_V})}$$

$$\overrightarrow{I_{CV}} = \left(\frac{V_{Ts}}{\sqrt{3}Z_{CV}}, -\theta_{CV} \right)$$

6 - PARTIDA DE MOTORES

Nas cargas compostas por partida de motor(es), a impedância do(s) motor(es) no instante da partida é fixa. Entretanto, por se tratar de uma condição transitória da carga, será tratada de forma diferenciada.

6.1 - Potência de Partida de Motores

Como na partida do(s) motor(es) a impedância dos motores é fixa, seu comportamento é o mesmo que as cargas com potência variável.

$$P_{MP} = \frac{V_{Ts}^2}{Z_{MP}}$$

Onde:

P_{MP} Potência do(s) motor(es) na partida (VA)

V_{Ts} Tensão nos terminais do secundário do transformador (V)

Z_{MP} Impedância do(s) motor(es) na partida (Ω)

A potência nominal do(s) motor(es) na partida é:

$$P_{MPn} = \frac{V_{MPn}^2}{Z_{MPn}}$$

Onde:

P_{MPn} Potência nominal do(s) motor(es) na partida (VA)

V_{MPn} Tensão nominal do(s) motor(es) (V)

Z_{MPn} Impedância nominal do(s) motor(es) na partida (Ω)

6.2 - Impedância do(s) Motor(es) na Partida

Como a impedância do(s) motor(es) na partida é um valor fixo:

$$Z_{MP} = Z_{MPn}$$

$$Z_{MP} = Z_{MPn} = \frac{V_{MPn}^2}{P_{MPn}}$$

Como a potência nominal da partida não é um dado fornecido nas tabelas dos fabricantes, utilizaremos a corrente de partida nominal, ou seja:

$$P_{MPn} = \sqrt{3}V_{MPn} \cdot I_{MPn}$$

Ou:

$$Z_{MP} = \frac{V_{MPn}}{\sqrt{3}I_{MPn}}$$

Onde:

P_{MPn} Potência nominal do(s) motor(es) na partida (VA)

V_{MPn} Tensão nominal do(s) motor(es) (V)

I_{MPn} Corrente de partida do(s) motor(es) na tensão nominal (A)

6.3 - Ângulo da Impedância do(s) Motor(es) na Partida

O(s) valor(es) do fator de potência do(s) motor(es) na partida pode ser estimado ou definido em função dos dados do(s) motor(es). Portanto:

$$\theta_{MP} = \arccos(FP_{MP})$$

Onde:

FP_{MP} Fator de potência do(s) motor(es) na partida

6.4 - Corrente na Partida do(s) Motor(es)

$$\overrightarrow{I_{MP}} = \frac{\frac{\overrightarrow{V_{TS}}}{\sqrt{3}}}{Z_{MP}}$$

$$\overrightarrow{I_{MP}} = \frac{(\frac{V_{TS}}{\sqrt{3}}, 0)}{(Z_{MP}, \theta_{MP})}$$

$$\overrightarrow{I_{MP}} = \left(\frac{V_{TS}}{\sqrt{3}Z_{MP}}, -\theta_{MP} \right)$$

Mas como,

$$Z_{MP} = \frac{V_{MPn}}{\sqrt{3}I_{MPn}}$$

$$\overrightarrow{I_{MP}} = \left(\frac{I_{MPn}V_{TS}}{V_{MPn}}, -\theta_{MP} \right)$$

7 - ALIMENTADORES

Os alimentadores normalmente são cabos ou barramentos ligados a equipamentos, tais como transformadores, quadros, grupos diesel geradores etc.

7.1 - Impedância dos Alimentadores

A impedância dos alimentadores é obtida em função dos dados das resistências e reatâncias definidas pelo usuário, baseado nas condições de utilização e informações dos fabricantes e recomendações das normas.

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2}$$

Onde:

Z_A Impedância do alimentador (Ω)

R_A Resistência do alimentador (Ω)

X_A Reatância do alimentador (Ω)

7.2 - Resistência e Reatância do(s) Alimentador(es)

Os valores da impedância, resistência e reatância são definidos em função do tipo de cabo utilizado, comprimento do circuito, condições de instalação, temperatura ambiente, quantidade cabos por fase, critérios de projeto e outras condições definidas pelo usuário.

$$R_A = R_a \frac{l}{n}$$

Onde:

R_a Resistência do(s) cabo(s) nas condições de instalação (Ω/km)

l Comprimento do(s) cabo(s) (m)

n Número de cabos por fase

Reatância do(s) cabo(s)

$$X_A = X_a \frac{l}{n}$$

X_a Reatância do(s) cabo(s) nas condições de instalação (Ω/km)

l Comprimento do(s) cabo(s) (m)

n Número de cabos por fase

7.3 - Ângulo da Impedância

$$\theta_A = \arctan \frac{X_a}{R_a}$$

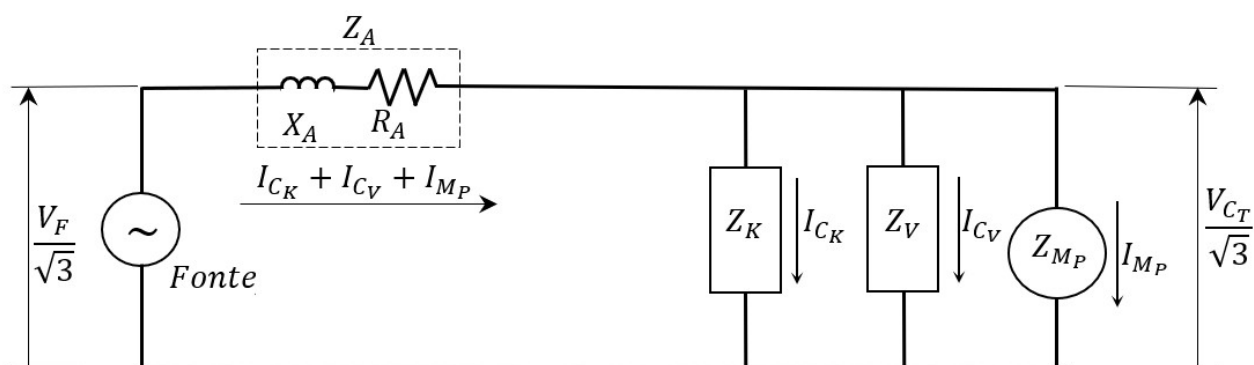
8 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO QUE SERÃO ANALISADAS

As condições de operação que serão analisadas, durante o período permanente ou transitório da alimentação de uma carga ou conjunto de cargas, com ou sem partida de motor(es), levarão em conta os dados das cargas e dos alimentadores.

A apresentação dos cálculos é feita de modo detalhado para permitir o perfeito entendimento da sequência e conceitos adotados, que poderão ser utilizados no desenvolvimento de outras aplicações. Para acompanhar o desenvolvimento usuário deverá ter apenas conhecimento de números complexos, na forma trigonométrica e polar e, naturalmente, eletrotécnica.

9 - CÁLCULO DA TENSÃO NA CARGA

O cálculo a seguir é o cálculo da tensão nos terminais da carga quando se conhece a tensão da fonte.



A figura acima representa o circuito de um alimentador que alimenta uma carga composta de carga com potência constante, carga com potência variável e partida de motor(es).

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \frac{\vec{V}_{C_T}}{\sqrt{3}} + \vec{Z}_A(\vec{I}_{C_K} + \vec{I}_{C_V} + \vec{I}_{M_P})$$

Considerando que:

$$\frac{\vec{V}_{C_T}}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + j0 \right)$$

Utilizando a forma polar para efetuar os cálculos:

$$\frac{\vec{V}_{C_T}}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{\left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right)}{(Z_{C_K}, \theta_{C_K})} \right) + \left(\frac{\left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right)}{(Z_{C_V}, \theta_{C_V})} \right) + \left(\frac{\left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right)}{(Z_{M_P}, \theta_{M_P})} \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}}, -\theta_{C_K} \right) + \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}}, -\theta_{C_V} \right) + \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}}, -\theta_{M_P} \right) \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}}, -\theta_{C_K} \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}}, -\theta_{C_V} \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}}, -\theta_{M_P} \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left(\frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}}, (\theta_A - \theta_{C_K}) \right) + \left(\frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}}, (\theta_A - \theta_{C_V}) \right) + \left(\frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}}, (\theta_A - \theta_{M_P}) \right)$$

Na forma de complexos temos:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} &= \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + j0 + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) + j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}} \sin(\theta_A - \theta_{C_K}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}} \cos(\theta_A - \theta_{C_V}) + \\ &+ j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}} \sin(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}} \cos(\theta_A - \theta_{M_P}) + j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}} \sin(\theta_A - \theta_{M_P}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} &= \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}} \cos(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}} \cos(\theta_A - \theta_{M_P}) + \\ &+ j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_K}} \sin(\theta_A - \theta_{C_K}) + j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}} \sin(\theta_A - \theta_{C_V}) + j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}} \sin(\theta_A - \theta_{M_P}) \end{aligned}$$

Substituindo,

$$Z_{C_K} = \frac{V_{C_T}^2}{P_{C_{Kn}}}$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} \frac{V_{C_T}^2}{P_{C_{Kn}}}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{C_V}} \cos(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3}Z_{M_P}} \cos(\theta_A - \theta_{M_P}) +$$

$$\begin{aligned}
 & +j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} \frac{V_{C_T}^2}{P_{C_{Kn}}}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_K}) + j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{C_V}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_V}) + j \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{M_P}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{M_P}) \\
 \frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} &= \left[\frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{C_V}} \cos(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{M_P}} \cos(\theta_A - \theta_{M_P}) \right] + \\
 & +j \left[\frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_K}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{C_V}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{M_P}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{M_P}) \right] \\
 \left| \frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} \right| &= \left| \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{C_V}} \cos(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{M_P}} \cos(\theta_A - \theta_{M_P}) \right| + \\
 & +j \left[\frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_K}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{C_V}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A V_{C_T}}{\sqrt{3} Z_{M_P}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{M_P}) \right] \\
 \left(\frac{V_F}{\sqrt{3}} \right)^2 &= \left[\left(1 + \frac{Z_A}{Z_{C_V}} \cos(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A}{Z_{M_P}} \cos(\theta_A - \theta_{M_P}) \right) \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2 + \\
 & +j \left[\left(\frac{Z_A}{Z_{C_V}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A}{Z_{M_P}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{M_P}) \right) \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2
 \end{aligned}$$

Finalmente:

$$\begin{aligned}
 & \left[\left(1 + \frac{Z_A}{Z_{C_V}} \cos(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A}{Z_{M_P}} \cos(\theta_A - \theta_{M_P}) \right) \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2 + \\
 & +j \left[\left(\frac{Z_A}{Z_{C_V}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_V}) + \frac{Z_A}{Z_{M_P}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{M_P}) \right) \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2 - \frac{V_F^2}{3} = 0 \\
 & \left[\left(1 + \left(\frac{\cos(\theta_A - \theta_{C_V})}{Z_{C_V}} + \frac{\cos(\theta_A - \theta_{M_P})}{Z_{M_P}} \right) Z_A \right) \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2 + \\
 & + \left[\left(\frac{\text{sen}(\theta_A - \theta_{C_V})}{Z_{C_V}} + \frac{\text{sen}(\theta_A - \theta_{M_P})}{Z_{M_P}} \right) Z_A \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{\sqrt{3} V_{C_T}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2 - \frac{V_F^2}{3} = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[\left(1 + \left(\frac{\cos(\theta_A - \theta_{C_V})}{Z_{C_V}} + \frac{\cos(\theta_A - \theta_{M_P})}{Z_{M_P}} \right) Z_A \right) \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{3 \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}} \cos(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2 + \\
 & + \left[\left(\frac{\text{sen}(\theta_A - \theta_{C_V})}{Z_{C_V}} + \frac{\text{sen}(\theta_A - \theta_{M_P})}{Z_{M_P}} \right) Z_A \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{3 \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}} \text{sen}(\theta_A - \theta_{C_K}) \right]^2 - \frac{V_F^2}{3} = 0
 \end{aligned}$$

Se:

$$x = \frac{V_{C_T}}{\sqrt{3}}$$

$$a_1 = 1 + \left(\frac{\cos(\theta_A - \theta_{C_V})}{Z_{C_V}} + \frac{\cos(\theta_A - \theta_{M_P})}{Z_{M_P}} \right) Z_A$$

$$b_1 = \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{3} \cos(\theta_A - \theta_{C_K})$$

$$c_1 = \left(\frac{\sin(\theta_A - \theta_{C_V})}{Z_{C_V}} + \frac{\sin(\theta_A - \theta_{M_P})}{Z_{M_P}} \right) Z_A$$

$$d_1 = \frac{P_{C_{Kn}} Z_A}{3} \sin(\theta_A - \theta_{C_K})$$

$$e_1 = -\frac{V_F^2}{3}$$

Podemos escrever a equação em destaque como:

$$\left[a_1 x + \frac{b_1}{x} \right]^2 - \left[c_1 x + \frac{d_1}{x} \right]^2 + e_1 = 0$$

$$\left(a_1^2 x^2 + 2a_1 x \frac{b_1}{x} + \left(\frac{b_1}{x} \right)^2 \right) + \left(c_1^2 x^2 + 2c_1 x \frac{d_1}{x} + \left(\frac{d_1}{x} \right)^2 \right) + e_1 = 0$$

$$a_1^2 x^2 + 2a_1 x \frac{b_1}{x} + \frac{b_1^2}{x^2} + c_1^2 x^2 + 2c_1 x \frac{d_1}{x} + \frac{d_1^2}{x^2} + e_1 = 0$$

$$a_1^2 x^2 + c_1^2 x^2 + 2a_1 x \frac{b_1}{x} + 2c_1 x \frac{d_1}{x} + \frac{b_1^2}{x^2} + \frac{d_1^2}{x^2} + e_1 = 0$$

$$(a_1^2 + c_1^2) x^2 + 2a_1 b_1 + 2c_1 d_1 + \frac{b_1^2 + d_1^2}{x^2} + e_1 = 0$$

$$(a_1^2 + c_1^2) x^2 + 2(a_1 b_1 + c_1 d_1) + e_1 + \frac{b_1^2 + d_1^2}{x^2} = 0$$

Multiplicando por x^2

$$(a_1^2 + c_1^2) x^4 + (2(a_1 b_1 + c_1 d_1) + e_1) x^2 + b_1^2 + d_1^2 = 0$$

A solução da equação acima será a raiz real e positiva da equação abaixo:

$$ax^4 + cx^2 + e = 0$$

Onde:

$$a = a_1^2 + c_1^2$$

$$c = 2(a_1 b_1 + c_1 d_1) + e_1$$

$$e = b_1^2 + d_1^2$$

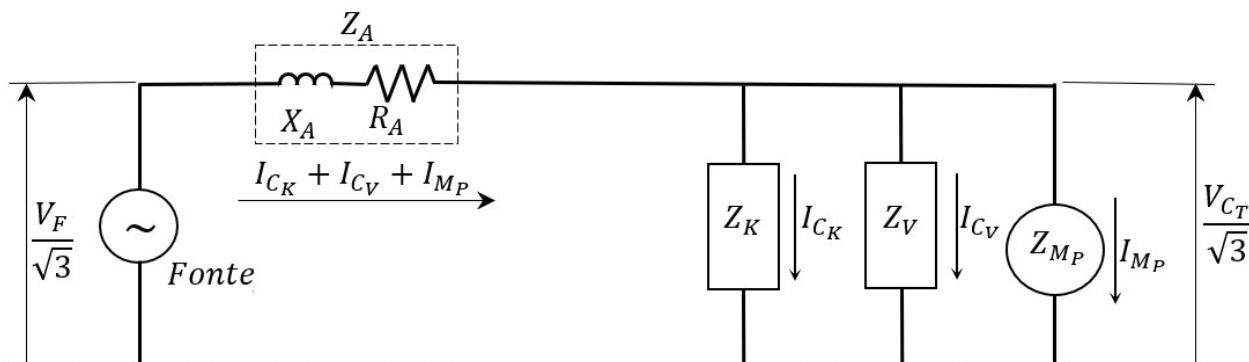
$$\frac{V_C}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{-c + \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}}$$

$$V_{C_T} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{-c + \sqrt{c^2 - 4ae}}{2a}}$$

A fórmula acima fornece o valor da tensão nos terminais da carga considerando os dados da fonte, dos alimentadores e das cargas.

10 - CÁLCULO DA TENSÃO DA FONTE

O cálculo a seguir é o cálculo da tensão necessária na fonte para atender uma tensão definida na carga.



A figura acima representa o circuito de um alimentador que alimenta uma carga composta de carga com potência constante, carga com potência variável e partida de motor(es).

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \frac{\vec{V}_{CT}}{\sqrt{3}} + \vec{Z}_A (\vec{I}_{CK} + \vec{I}_{CV} + \vec{I}_{MP})$$

Considerando que:

$$\frac{\vec{V}_{CT}}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, j0 \right)$$

Utilizando a forma polar para efetuar os cálculos:

$$\frac{\vec{V}_{CT}}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{\left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right)}{(Z_{CK}, \theta_{CK})} \right) + \left(\frac{\left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right)}{(Z_{CV}, \theta_{CV})} \right) + \left(\frac{\left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right)}{(Z_{MP}, \theta_{MP})} \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CK}}, -\theta_{CK} \right) + \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CV}}, -\theta_{CV} \right) + \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{MP}}, -\theta_{MP} \right) \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CK}}, -\theta_{CK} \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CV}}, -\theta_{CV} \right) + (Z_A, \theta_A) \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{MP}}, -\theta_{MP} \right)$$

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \left(\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left(\frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CK}}, (\theta_A - \theta_{CK}) \right) + \left(\frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CV}}, (\theta_A - \theta_{CV}) \right) + \left(\frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{MP}}, (\theta_A - \theta_{MP}) \right)$$

Na forma de complexos temos:

$$\frac{\vec{V}_F}{\sqrt{3}} = \frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + j0 + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CK}} \cos(\theta_A - \theta_{CK}) + j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CK}} \sin(\theta_A - \theta_{CK}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3}Z_{CV}} \cos(\theta_A - \theta_{CV}) +$$

$$+j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \sin(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \cos(\theta_A - \theta_{MP}) + j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \sin(\theta_A - \theta_{MP})$$

$$\begin{aligned} \frac{\overrightarrow{V_F}}{\sqrt{3}} &= \frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CK}} \cos(\theta_A - \theta_{CK}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \cos(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \cos(\theta_A - \theta_{MP}) + \\ &+ j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CK}} \sin(\theta_A - \theta_{CK}) + j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \sin(\theta_A - \theta_{CV}) + j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \sin(\theta_A - \theta_{MP}) \end{aligned}$$

Substituindo,

$$Z_{CK} = \frac{V_{CT}^2}{P_{CKn}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\overrightarrow{V_F}}{\sqrt{3}} &= \frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} \frac{V_{CT}^2}{P_{CKn}}} \cos(\theta_A - \theta_{CK}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \cos(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \cos(\theta_A - \theta_{MP}) + \\ &+ j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} \frac{V_{CT}^2}{P_{CKn}}} \sin(\theta_A - \theta_{CK}) + j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \sin(\theta_A - \theta_{CV}) + j \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \sin(\theta_A - \theta_{MP}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\overrightarrow{V_F}}{\sqrt{3}} &= \left[\frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{CKn} Z_A}{\sqrt{3} V_{CT}} \cos(\theta_A - \theta_{CK}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \cos(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \cos(\theta_A - \theta_{MP}) \right] + \\ &+ j \left[\frac{P_{CKn} Z_A}{\sqrt{3} V_{CT}} \sin(\theta_A - \theta_{CK}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \sin(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \sin(\theta_A - \theta_{MP}) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left| \frac{\overrightarrow{V_F}}{\sqrt{3}} \right| &= \left| \frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{CKn} Z_A}{\sqrt{3} V_{CT}} \cos(\theta_A - \theta_{CK}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \cos(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \cos(\theta_A - \theta_{MP}) \right| + \\ &+ \left| \frac{P_{CKn} Z_A}{\sqrt{3} V_{CT}} \sin(\theta_A - \theta_{CK}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{CV}} \sin(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3} Z_{MP}} \sin(\theta_A - \theta_{MP}) \right| \end{aligned}$$

Finalmente:

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_F}{\sqrt{3}} \right)^2 &= \left[\left(1 + \frac{Z_A}{Z_{CV}} \cos(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A}{Z_{MP}} \cos(\theta_A - \theta_{MP}) \right) \frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{CKn} Z_A}{\sqrt{3} V_{CT}} \cos(\theta_A - \theta_{CK}) \right]^2 + \\ &+ \left[\left(\frac{Z_A}{Z_{CV}} \sin(\theta_A - \theta_{CV}) + \frac{Z_A}{Z_{MP}} \sin(\theta_A - \theta_{MP}) \right) \frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{CKn} Z_A}{\sqrt{3} V_{CT}} \sin(\theta_A - \theta_{CK}) \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_F &= \left(\left[\left(1 + \left(\frac{\cos(\theta_A - \theta_{CV})}{Z_{CV}} + \frac{\cos(\theta_A - \theta_{MP})}{Z_{MP}} \right) Z_A \right) \frac{V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{CKn} Z_A \cos(\theta_A - \theta_{CK})}{\sqrt{3} V_{CT}} \right]^2 + \right. \\ &\left. + \left[\left(\frac{\sin(\theta_A - \theta_{CV})}{Z_{CV}} + \frac{\sin(\theta_A - \theta_{MP})}{Z_{MP}} \right) \frac{Z_A V_{CT}}{\sqrt{3}} + \frac{P_{CKn} Z_A \sin(\theta_A - \theta_{CK})}{\sqrt{3} V_{CT}} \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{3} \end{aligned}$$

A fórmula acima fornece o valor da tensão necessária da fonte, considerando os dados dos alimentadores e das cargas, para atender a tensão mínima definida nos terminais da carga.

11 - ELABORAÇÃO DAS PLANILHAS EXCEL

As planilhas Excel foram elaboradas com base nos cálculos desenvolvidos. A parte teórica não é indispensável para sua utilização, mas é importante para eventuais estudos mais aprofundados.

Foram elaboradas duas planilhas para determinar a tensão na carga quando se conhece o valor da tensão na fonte e outra. Para determinar a tensão na fonte para atender a tensão definida na carga. Cada pasta contém duas planilhas, uma completa e outra simplificada. Nas planilhas completas estão indicadas as fórmulas de todos os termos utilizados nos cálculos e, nas simplificadas, que são idênticas às completas, apenas as informações básicas estão visíveis. Entretanto, nas planilhas simplificadas, os mesmos campos da planilha completa estão ocultos, mas ativos.

A utilização das planilhas facilita a realização dos cálculos, que seriam muito trabalhosos de efetuar através de forma manual.

As planilhas podem ser utilizadas para quaisquer valores de tensão das fontes e das cargas.

Como em uma instalação podem existir cargas com tensões nominais diferentes da do sistema, existem os campos para preenchimento destas informações. Por exemplo, podem existir motores com tensões nominais de 440V e 460V.

Os campos com fatores de potência das cargas também foram deixados para serem preenchidos com os dados reais.

A referência feita a motor(es) é para permitir que se considere um único motor ou conjunto de motores, cujos dados devem ser definidos. Por exemplo, se deseja saber exatamente o comportamento do sistema com a partida simultânea de dois motores com características diferentes. Neste caso, deverá ser determinada a corrente de partida e fator de potência equivalentes para inseri-los na planilha.