

ANÁLISE DA CONEXÃO DE CARGAS TRIFÁSICAS

Relatório 02 de ELT 229

Batista H.O.B.¹, Barcelos C. O.², Alves W.F.O.³

Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Brasil

Laboratório de Circuitos Polifásicos, Departamento de Engenharia Elétrica.

E-mails: hiago.batista@ufv.br¹, celso.barcelos@ufv.br², werikson.alves@ufv.br³.

Resumo - Este relatório tem como objetivo apresentar um estudo das possíveis formas de conexões elétricas para alimentar cargas trifásicas. As tipologias de conexões estudadas são a delta e estrela. Em algumas situações, a conexão do cabo de neutro foi retirada para analisarmos se a sua falta pode influenciar as grandezas elétricas do circuito e de que forma isto ocorre.

Palavras-chaves - Cargas trifásicas, Conexão em Delta, Conexão em estrela, Circuitos Trifásicos.

1 Introdução

O estudo de conexões trifásicas tem muita relevância no estudo de sistemas de potência, pois é a partir do estudo de conexões trifásicas que podemos criar sistemas equilibrados e eficientes.

Existe, basicamente, duas formas de se fazer uma conexão trifásica:

- i) Conexão em Delta, também conhecida como Conexão em Triângulo (Δ).
- ii) Conexão em Estrela (Y).
 - (a) Com neutro;
 - (b) Sem neutro.

A conexão em Delta (Δ) é feita de forma que temos três fases, e nenhum fio neutro. Esta conexão é muito utilizada em linhas de transmissão, pois permite que utilizemos apenas três fios, diferentemente do sistema em estrela que para transmissão de energia requer a aplicação de quatro fios, logo o sistema em delta é mais econômico sob o ponto de vista financeiro.

Por outro lado, a conexão em Estrela (Y) é feita de duas formas, podendo ter três fios ou quatro, sendo

que na configuração com três fios, temos três fases, e na de quatro fios temos três fases e um neutro. Esta conexão é mais utilizada em baixa tensão, pois permite ter duas tensões para trabalhar, a **tensão de linha** e a **tensão de fase**.

Não obstante, também é muito comum encontrar conexões em motores de partida do tipo $\Delta - Y$, pois este tipo de conexão permite uma menor corrente de partida do motor, tornando seu acionamento mais suave. Este é apenas um exemplo das inúmeras aplicações que existem, e isso só pode ser feito devido ao estudo das conexões de cargas trifásicas.

Assim como nas ligações do gerador, uma carga trifásica pode ser conectada em estrela ou triângulo, dependendo da aplicação final. Diz-se que uma carga conectada em estrela ou em triângulo está desequilibrada se as impedâncias por fase não forem iguais em magnitude ou fase. De maneira mais específica, podemos encontrar a seguinte definição em (SADIKU),

“Uma carga equilibrada é aquela na qual as impedâncias por fase são iguais em magnitude e fase.”

2 Metodologia de ensaio

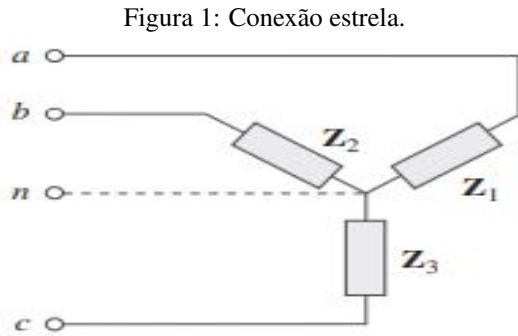
Para as análises teóricas, foram utilizados os seguintes componentes:

- 1 capacitor de $25 \mu F$;
- 1 resistor de 100Ω ;
- 1 voltímetro (medido em rms);
- 1 painel trifásico com tensões de linha de 220 V.

2.1 Circuito Estrela - Y

A Figura 1 ilustra uma carga trifásica conectada na configuração estrela. Para uma carga equilibrada conectada em estrela, temos que:

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_Y \quad (1)$$



Fonte: Extraída de [1].

De acordo com[3], as relações necessárias para análise matemática de circuito na configuração estrela estão definidas nas Equações 2 à 6.

$$V_{nn'} = -\frac{Y_a \cdot V_{an} + Y_b \cdot V_{bn} + Y_c \cdot V_{cn}}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_N} \quad (2)$$

$$I_a = \frac{V_{an} + V_{nn'}}{Z_a} \quad (3)$$

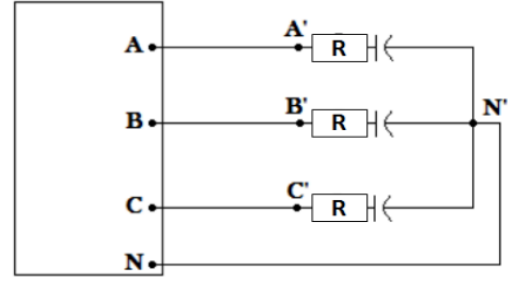
$$I_b = \frac{V_{bn} + V_{nn'}}{Z_b} \quad (4)$$

$$I_c = \frac{V_{cn} + V_{nn'}}{Z_c} \quad (5)$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (6)$$

O circuito analisado com a carga equilibrada ligada em estrela pode ser visto na Figura 2.

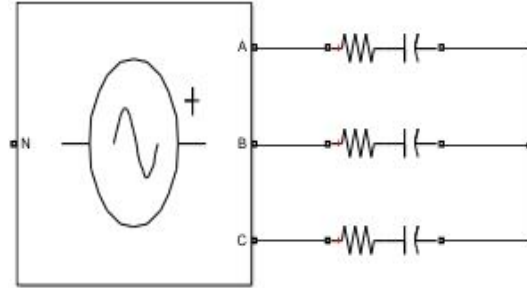
Figura 2: Conexão Estrela.



Fonte: Extraída de [2]

Após retirar o fio de neutro, simulamos o circuito apresentado na Figura 3.

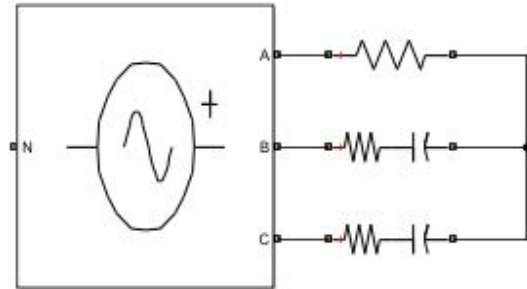
Figura 3: Circuito estrela sem neutro.



Fonte: Próprio autor

Ao retirar o capacitor da fase A, a carga passa a ser desequilibrada, vide o circuito completo na Figura 4.

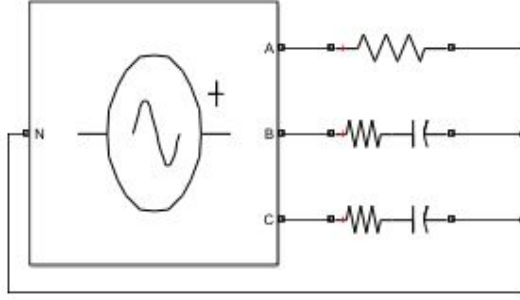
Figura 4: Circuito estrela desequilibrado sem neutro.



Fonte: Próprio autor.

Ao reconectar o fio neutro, obtemos o circuito apresentado na Figura 5.

Figura 5: Circuito estrela desequilibrado com neutro.

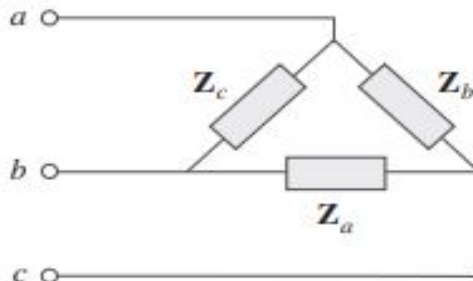


Fonte: Próprio autor.

2.2 Circuito Delta - Δ

Seja o circuito em delta evidenciado na Figura 6:

Figura 6: Conexão delta.



Fonte: Extraída de [1]

Quando uma carga trifásica é conectada nesta configuração, para que a mesma esteja equilibrada, as impedâncias por fase tem a seguinte relação:

$$Z_a = Z_b = Z_c = Z_{\Delta} \quad (7)$$

As demais expressões empregadas nos cálculos dos parâmetros desejados encontram se apresentados pelas Equações 8 à 13 segundo [3].

$$I_{ab} = \frac{V_{an}}{Z_{ab}} \quad (8)$$

$$I_{bc} = \frac{V_{bn}}{Z_{bc}} \quad (9)$$

$$I_{ca} = \frac{V_{cn}}{Z_{ca}} \quad (10)$$

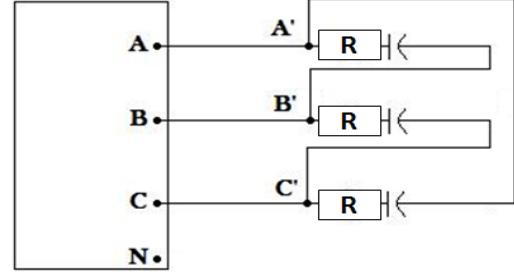
$$I_a = I_{ab} - I_{ca} \quad (11)$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} \quad (12)$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} \quad (13)$$

Na Figura 7, podemos observar que a carga conectada aos terminais da fonte trifásica encontra-se na configuração delta.

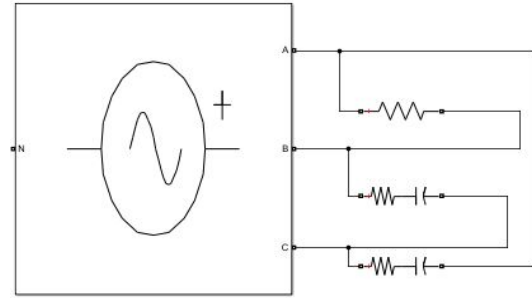
Figura 7: Circuito em delta com carga equilibrada.



Fonte: Extraída de [2]

Neste ponto, o capacitor que se encontrava entre as fases A e B foi retirado, resultando em uma carga desequilibrada apresentada pelo circuito da Figura 8.

Figura 8: Circuito delta desequilibrado.



Fonte: Próprio autor.

3 Resultados

As Tabelas 1 e 2 são referentes aos resultados medidos e simulados no circuito da Figura 2. Vale se atentar aos erros percentuais entre os valores medidos e simulados que seguem informados nas tabelas; os termos Med., Sim. e Calc. são referentes aos valores medidos, simulados e calculados.

Tabela 1: Tensões de linha e de fase na carga.

	V_{ab}	$V_{a'n'}$	$V_{b'n'}$	$V_{c'n'}$	$V_{nn'}$
Med.	220	128	127	128	0
Sim.	220	127	127	127	0
Calc.	220	127	127	127	0
Erro %	0	0,79	0	0,79	0

Tabela 2: Correntes de Linha e de neutro.

	I_a	I_b	I_c	I_n
Med.	0,82	0,86	0,85	0,03
Sim.	0,87	0,87	0,87	0
Calc.	0,87	0,87	0,87	0
Erro %	-5,75	-1,15	-2,30	-

Após desconectarmos o neutro, como pode ser visto na Figura 3, os resultados encontrados nas medições nos laboratórios, simulações e cálculos estão apresentados na Tabela 3 e 4.

Tabela 3: Tensões de linha e de fase na carga.

	V_{ab}	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	$V_{nn'}$
Med.	220	129	125	128	1,8
Sim.	220	127	127	127	0
Calc.	200	127	127	127	0
Erro %	0	1,57	-1,57	0,79	-

Tabela 4: Correntes de Linha.

	I_a	I_b	I_c
Med.	0,82	0,86	0,86
Sim.	0,87	0,87	0,87
Calc.	0,87	0,87	0,87
Erro %	-5,75	-1,15	-1,15

Ao simular o circuito Figura 4 para analisar a falta do neutro no circuito, os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Tensões de linha e de fase na carga.

	V_{ab}	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	$V_{nn'}$
Med.	220	124	105	170	42
Sim.	220	119,73	104,56	168,82	42,35
Calc.	220	119,73	104,56	168,82	42,35
Erro %	0	3,59	0,38	0,71	-0,83

Tabela 6: Correntes de linha.

	I_a	I_b	I_c
Med.	1,17	0,70	1,14
Sim.	1,20	0,72	1,16
Calc.	1,20	0,72	1,16
Erro %	-2,5	-2,78	-1,72

Resultados referentes as Figura 5.

Tabela 7: Tensões de linha e de fase na carga.

	V_{ab}	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	$V_{nn'}$
Med.	220	129	129	129	0
Sim.	220	127	127	127	0
Calc.	220	127	127	127	0
Erro %	0	1,57	1,57	1,57	-

Tabela 8: Correntes de Linha e de neutro.

	I_a	I_b	I_c	I_n
Med.	1,22	0,87	0,86	0,89
Sim.	1,27	0,87	0,87	0,92
Calc.	1,27	0,87	0,87	0,92
Erro %	-3,94	0	-1,15	-3,26

Os resultados pela análise do circuito ilustrado na Figura 7 são apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9: Tensões de linha na carga.

	$V_{a'b'}$	$V_{b'c'}$	$V_{c'a'}$
Med.	220	221	222
Sim.	220	220	220
Calc.	220	220	200
Erro %	0	0,45	0,91

Tabela 10: Correntes de Linha.

	I_a	I_b	I_c
Med.	2,56	2,53	2,53
Sim.	2,61	2,61	2,61
Calc.	2,61	2,61	2,61
Erro %	-1,92	-3,07	-3,07

Tabela 11: Correntes de Fase.

	$I_{a'b'}$	$I_{b'c'}$	$I_{c'a'}$
Med.	1,48	1,43	1,41
Sim.	1,51	1,51	1,51
Calc.	1,51	1,51	1,51
Erro %	-1,97	-5,30	-6,62

Por fim, as Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os resultados das análises do circuito da Figura 8.

Tabela 12: Tensões de linha na carga.

	$V_{a'b'}$	$V_{b'c'}$	$V_{c'a'}$
Med.	224	224	224
Sim.	220	220	220
Calc.	220	220	220
Erro %	1,82	1,82	1,82

Tabela 13: Correntes de Linha

	I_a	I_b	I_c
Med.	3,75	2,28	2,72
Sim.	3,69	2,28	2,61
Calc.	3,68	2,28	2,61
Erro %	1,63	0	4,21

Tabela 14: Correntes de Fase.

	$I_{a'b'}$	$I_{b'c'}$	$I_{c'a'}$
Med.	2,20	1,53	1,53
Sim.	2,20	1,51	1,51
Calc.	2,2	1,51	1,51
Erro %	0	1,32	1,32

Observe da Tabela 13 e 14 que a corrente de fase, ou seja, a corrente que percorre a carga é menor que a corrente de linha. Essa característica é muito importante, pois revela que podemos transmitir correntes altas, e a corrente a que percorre a carga trifásica ser menor.

Ademais, observe que à configuração Y, pelos resultados das Tabelas 7 e 5 revelam que este tipo de configuração pode fornecer dois tipos de tensões: a tensão de linha e tensão de fase. Esta peculiaridade é muito significativa, pois mostra que podemos fornecer à carga, duas tensões diferentes.

Em aplicações práticas, essas duas características são observadas em alguns exemplos, como: Partida de motores elétricos ($\Delta - Y$) e Instalações elétricas, pois nas instalações polifásicas temos a opção de alimentar a carga com tensão de linha ou tensão de fase.

4 Conclusão

Nossas simulações focaram nas análises das conexões de carga tanto em Y como em Δ , seja equilibrada ou desequilibrada, isso nos permitiu uma análise comparativa entre alguns casos. De acordo com os resultados obtidos, podemos concluir que os circuitos simulados com cargas equilibradas apresentaram resultados menos suscetíveis à variações relevantes entre as tensões e correntes de fase e de linha. Isso pode ser explicado, pelo fato de que ao impormos tensões equilibradas, consequentemente essa tipologia de circuito apresentará correntes também equilibradas. Além disso, como fora apresentado por meio de tabelas, os erros percentuais relativos estiveram em todos os casos sempre abaixo dos 5,75%, o que torna nossos resultados condizentes com os valores teóricos.

Entretanto, devemos nos atentar que em situações de cargas equilibradas, que podem se tornar desequilibradas pela "queima" de alguns componentes por conta de possíveis curtos circuitos. Nesses casos, isso pode prejudicar o funcionamento adequado do sistema devido ao desbalanceamento das cargas. Logo os sistemas de proteção devem ser bem projetados quando o desbalanceamento do sistema é algo indesejado. O que também torna o balanceamento de cargas uma técnica muito importante neste segmento.

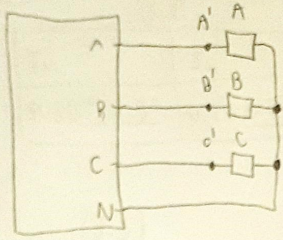
Referências

- [1] Charles K Alexander and Matthew NO Sadiku. *Fundamentos de circuitos elétricos*. AMGH Editora, 2013.
- [2] PRATES M. O. *PRaTICA 1 - Simulação Sequências de fases em um Sistema Trifásico*. 2020.
- [3] Carlos César Barioni OLIVEIRA, Hernán Pietro SCHMIDT, Nelson KAGAN, and Ernesto João ROBBA. *Introdução a sistemas elétricos de potência—componentes simétricas*. 2000.

5 Anexo

A seguir, encontram-se anexadas os cálculos utilizados para determinação dos parâmetros desejados.

Relatório 2 - ECT 229



$V_{AB} = 220 \angle 30^\circ$
 $V_{BC} = 220 \angle -90^\circ$
 $V_{CA} = 220 \angle 150^\circ$

$V_{AN} = 127 \angle 0^\circ$
 $V_{BN} = 127 \angle -120^\circ$
 $V_{CN} = 127 \angle 120^\circ$

$Z_A = 145.80 \angle -46.70^\circ \Omega$
 $Z_B = 145.80 \angle -46.70^\circ \Omega$
 $Z_C = 145.80 \angle -46.70^\circ \Omega$
 $Z_N = 0 \Omega$

$x_c = \frac{1}{j\omega C} = +106.10 \angle -90^\circ \Omega$
 $R = 100 \Omega$

$V_{NN'} = \frac{Y_A V_{AN} + Y_B V_{BN} + Y_C V_{CN}}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N} = 0 [V]$

$I_A = \frac{V_{AN} + V_{NN'}}{Z_A} = 0.87 \angle 46.70^\circ [A]$
 $I_B = \frac{V_{BN} + V_{NN'}}{Z_B} = 0.87 \angle -120^\circ [A]$
 $I_C = \frac{V_{CN} + V_{NN'}}{Z_C} = 0.87 \angle 120^\circ [A]$
 $I_N = 0 [A]$

Por ser um circuito equilibrado e simétrico, temos:

(3.2) Como é um sistema de cargas equilibradas, ao retirar o neutro, os valores continuam iguais.

(3.3) $Z_A = 100 \angle 0^\circ \Omega$
 $Z_B = 145.8 \angle -46.2^\circ \Omega$
 $Z_C = 145.8 \angle -46.2^\circ \Omega$
 $Z_N = \infty$

$V_{NN'} = -\frac{Y_A V_{AN'} + Y_B V_{BN'} + Y_C V_{CN'}}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N} = 42.35 \angle 109.48^\circ [V]$
 $I_A = \frac{V_{AN} + V_{NN'}}{Z_A} = 1.2 \angle 19.48^\circ [A]$
 $I_B = \frac{V_{BN} + V_{NN'}}{Z_B} = 0.72 \angle -91.23^\circ [A]$
 $I_C = \frac{V_{CN} + V_{NN'}}{Z_C} = 1.16 \angle 164.07^\circ [A]$

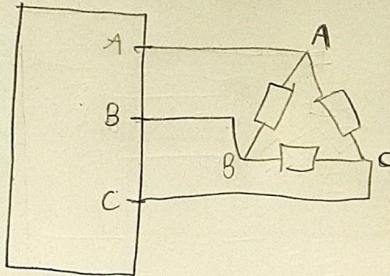
(3.4) $Z_N = 0$

$V_{NN'} = -\frac{Y_A V_{AN'} + Y_B V_{BN'} + Y_C V_{CN'}}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N} = 0$
 Tabela igual a tabela (3.3)

$I_A = \frac{V_{AN} + V_{NN'}}{Z_A} = 1.27 [A]$
 $I_B = \frac{V_{BN} + V_{NN'}}{Z_B} = 0.87 \angle -93.30^\circ [A]$
 $I_C = 0.87 \angle 166.70^\circ [A]$
 $I_N = 0.92 \angle -43.30^\circ [A]$

Figura 9: Cálculos para o circuito estrela.

Relatório Elt 229 - Δ



$$\left. \begin{aligned} V_{AB} = V_{AN} &= 220 \angle 0^\circ \text{ [V]} \\ V_{BC} = V_{BN} &= 220 \angle -120^\circ \text{ [V]} \\ V_{CA} = V_{CN} &= 220 \angle 120^\circ \text{ [V]} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} Z_{AB} &= 145.80 \angle -46.7^\circ \Omega \\ Z_{BC} &= 145.80 \angle -46.7^\circ \Omega \\ Z_{CA} &= 145.80 \angle -46.7^\circ \Omega \end{aligned}$$

(4.1)

$$\dot{I}_{AB} = \frac{V_{AN}}{Z_{AB}} = 1.51 \angle 46.7^\circ \text{ [A]}; \dot{I}_{BC} = 1.51 \angle -73.3^\circ \text{ [A]}; \dot{I}_{CA} = 1.51 \angle 166.7^\circ \text{ [A]}$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 2.64 \angle 16.70^\circ \text{ [A]}; \dot{I}_B = 2.64 \angle -103.30^\circ \text{ [A]}; \dot{I}_C = 2.64 \angle 136.70^\circ \text{ [A]}$$

(4.2)

$$\left. \begin{aligned} Z_{AB} &= 100 \Omega \\ Z_{BC} &= 145.80 \angle -46.7^\circ \Omega \\ Z_{CA} &= 145.80 \angle -46.7^\circ \Omega \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{V_{AN}}{Z_{AB}} = 2.2 \text{ A} \\ \dot{I}_{BC} &= 1.51 \angle -73.3^\circ \text{ A} \\ \dot{I}_{CA} &= 1.51 \angle 166.7^\circ \text{ A} \end{aligned} \left\{ \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 3.68 \angle -5.41^\circ \text{ A} \\ \dot{I}_B &= 2.28 \angle -140.71^\circ \text{ A} \\ \dot{I}_C &= 2.64 \angle 136.70^\circ \text{ A} \end{aligned} \right.$$

Figura 10: Cálculos para o circuito delta.