

em que:

- Q_i é a potência reativa inicial (ângulo φ_1);
- Q_c a potência reativa do capacitor ou conjunto de capacitores;
- Q a potência reativa final (ângulo φ_2).

O valor do capacitor é dado por:

$$C = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{(\omega V_{\text{ef}}^2)}$$

em que P é a potência ativa.

Exemplo

Determine o valor do capacitor para corrigir o fator de potência para 0,95 de um circuito com V_{ef} do gerador igual a 220 V, potência ativa de 2,2 kW, frequência de 60 Hz e fator de potência 0,8.

Solução:

$$\cos\varphi_1 = 0,8 \Rightarrow \varphi_1 = 36,87^\circ$$

$$\cos\varphi_2 = 0,95 \Rightarrow \varphi_2 = 18,19^\circ$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 60 = 377 \text{ rad/s}$$

$$C = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{(\omega V_{\text{ef}}^2)}$$

$$C = \frac{2200(\operatorname{tg}36,87^\circ - \operatorname{tg}18,19^\circ)}{377 \cdot 220^2}$$

$$C = \frac{2200 \cdot (0,75 - 0,33)}{377 \cdot 220^2}$$

$$C = 50,6 \mu\text{F}$$

Capítulo 15

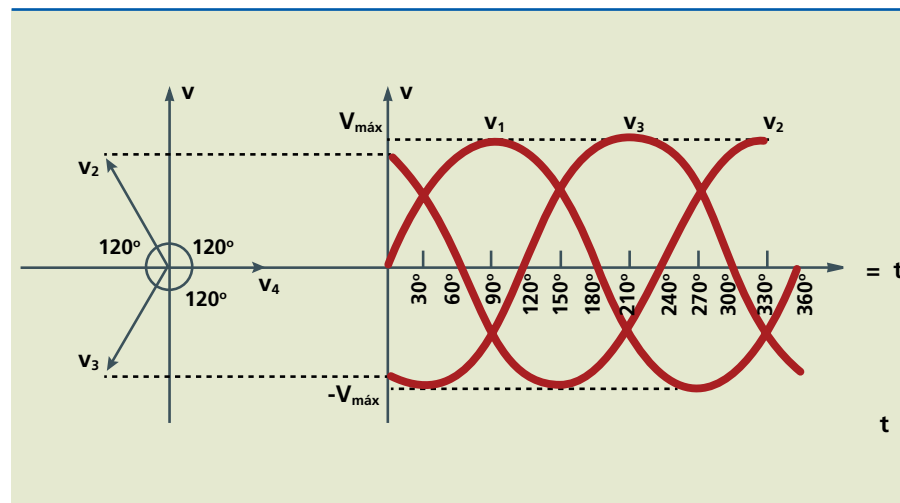
Circuitos trifásicos em corrente alternada



Em um sistema trifásico, o gerador possui três enrolamentos fixos, posicionados no elemento do gerador denominado estator. Os enrolamentos estão dispostos de modo que haja uma separação física de 120° entre eles. Essa mesma diferença se reflete nas tensões geradas com defasagem de 120° , como mostra a figura 15.1.

Figura 15.1

Gráficos das tensões com defasagem de 120° .



Considerando os enrolamentos iguais e, portanto, a mesma tensão máxima ($V_{máx}$), por esse gráfico é possível estabelecer as seguintes relações:

- $V_1(t) = V_{máx} \text{sen}(\omega t)$
- $V_2(t) = V_{máx} \text{sen}(\omega t + 120^\circ)$
- $V_3(t) = V_{máx} \text{sen}(\omega t - 120^\circ)$

Dependendo da ligação dos enrolamentos à carga, o sistema trifásico pode ser: não interligado ou independente; interligado.

15.1 Sistema trifásico não interligado ou independente

Cada enrolamento é ligado a um circuito separado, não havendo nenhuma relação entre eles a não ser o gerador físico (figura 15.2).

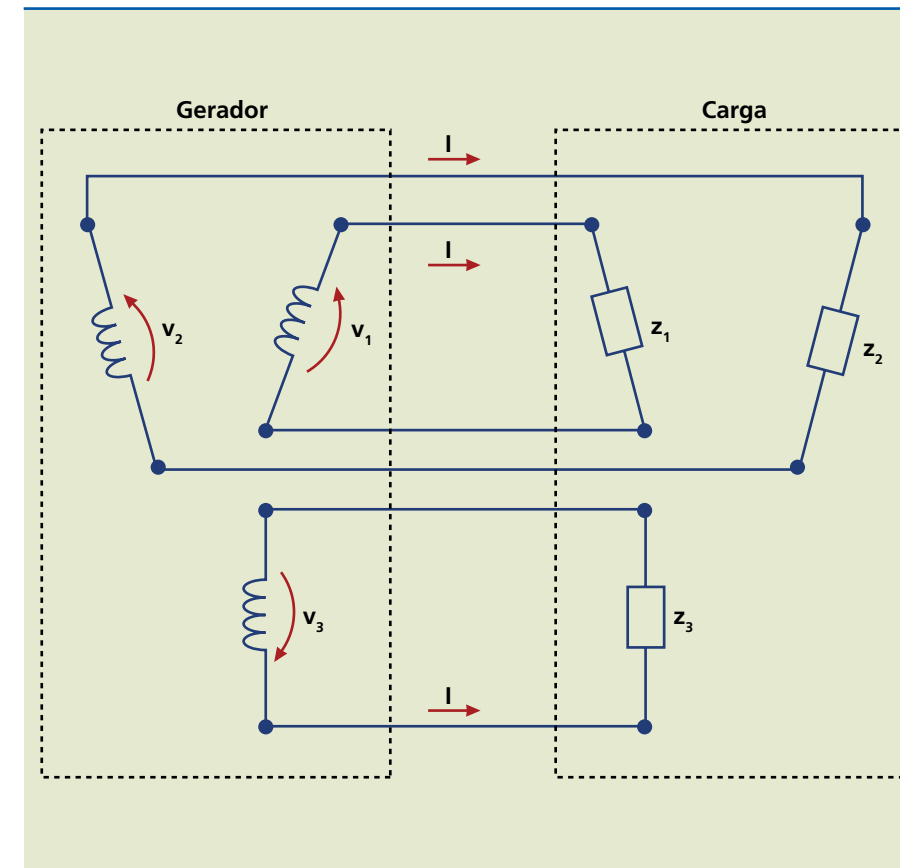


Figura 15.2

Sistema trifásico independente.

Esse sistema não é muito utilizado, porque exige seis fios para as ligações com a carga, o que o torna antieconômico.

15.2 Sistema trifásico interligado

Também chamado simplesmente de sistema trifásico, nesse sistema, há duas formas básicas de ligação, de acordo com a ligação entre os enrolamentos: em estrela ou ípsilon (Y) e triângulo ou delta (Δ).

Neste estudo, vamos analisar apenas os circuitos com cargas balanceadas ou iguais ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$), chamados de sistemas equilibrados, pois, do contrário, a parte matemática se torna complexa por causa da defasagem de 120° entre os sinais.

Nada impede, ainda, que o gerador esteja ligado, por exemplo, em triângulo e a carga em estrela ou vice-versa, porém faremos as representações apenas com ligações dos mesmos tipos, ou seja, triângulo-triângulo ou estrela-estrela.

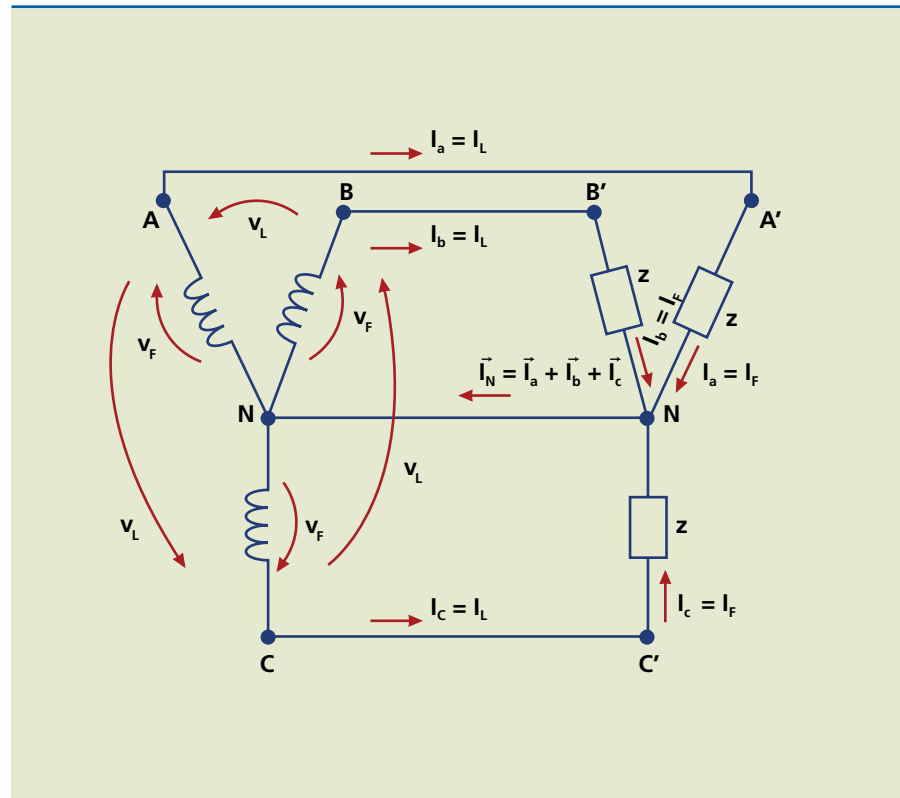
15.2.1 Ligação em estrela ou ípsilon (Y)

Nesse caso, os três enrolamentos do gerador, ou as três cargas, possuem um ponto comum, denominado neutro. Geralmente também são interligados o neutro do gerador com o neutro da carga (figura 15.3).



Figura 15.3

Ligação de carga e geradores em estrela com neutros interligados.



Como se observa na figura:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \text{ (soma vetorial)}$$

Para o sistema equilibrado, $I_n = 0$.

Tensões e correntes de linha e fase

Tensões de fase (V_F) são as tensões sobre cada enrolamento do gerador, ou sobre cada carga, ou, ainda, entre um dos terminais do gerador e o ponto comum ou neutro. Correntes de fase (I_F) são as correntes que circulam entre os terminais e o neutro, ou nos enrolamentos, ou, ainda, em cada carga separadamente em direção ao neutro.

Tensões de linha (V_L) são as tensões entre cada dois terminais do gerador (menos o neutro) e, no caso da carga, a tensão do gerador. Correntes de linha (I_L) são as correntes que saem do gerador em direção à carga.

Analisando as tensões e correntes de linha e fase do gerador e da carga em estrela, obtêm-se as relações:

$$V_L = V_F \sqrt{3}$$

e

$$I_L = I_F$$

15.2.2 Ligação em delta ou triângulo (Δ)

Nesse caso, os enrolamentos do gerador, ou as cargas, possuem dois a dois um ponto em comum, e a ligação adquire o formato de um triângulo (figura 15.4).

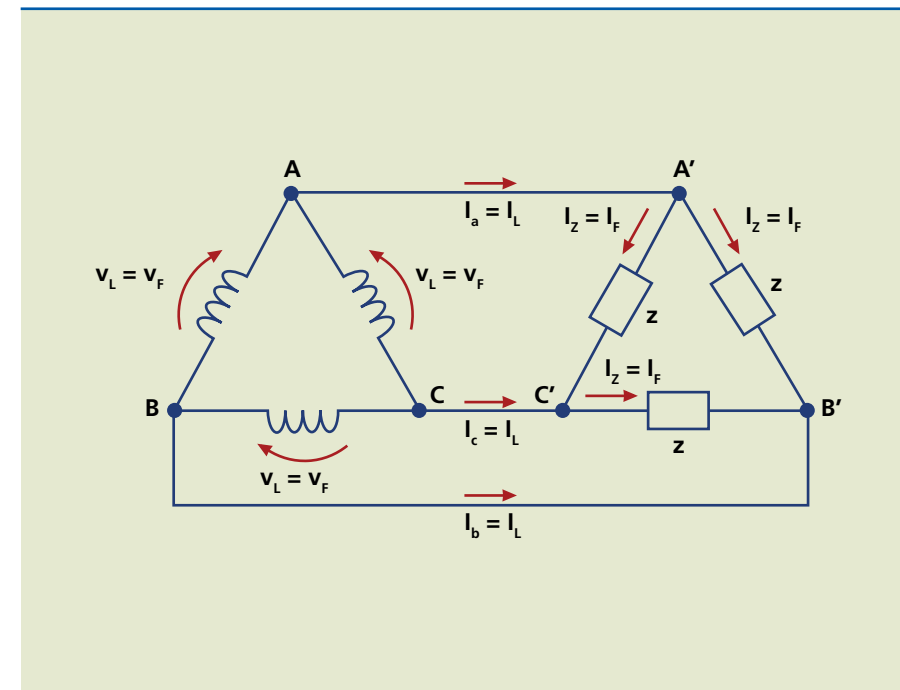


Figura 15.4

Ligação dos geradores em triângulo.

Como se pode observar, a tensão do gerador é a mesma que chega à carga, e ocorre uma composição de correntes duas a duas em cada carga, devido à soma vetorial, por causa da defasagem de 120° entre elas, resultando em:

$$V_L = V_F$$

e

$$I_L = I_F \sqrt{3}$$

15.3 Potências em sistemas trifásicos

Lembrando os estudos de circuitos em série e paralelo, não importa o circuito, sua potência total é sempre a soma das potências individuais. O mesmo se repete em sistemas trifásicos.

A potência que interessa aqui é a potência sobre cada carga, ou seja, a potência com valores de fase e eficazes do circuito. Assim, analisando cada ligação (triângulo ou estrela), observa-se que a relação entre as tensões e correntes de fase e linha estão invertidas, ou seja, ora as tensões de linha e fase são iguais (triângulo) e as correntes têm relação de $\sqrt{3}$, ora o inverso (estrela), porém os produtos finais mantêm a mesma relação.



Potência ativa por fase

$$P = v_F \cdot i_F \cdot \cos\varphi$$

Relacionando com valores de linha em estrela:

$$P = (v_L/\sqrt{3}) \cdot i_L \cdot \cos\varphi$$

Relacionando com valores de linha em triângulo:

$$P = (i_L/\sqrt{3}) \cdot v_L \cdot \cos\varphi$$

Nota

Por diversas razões, as relações entre as potências calculadas por valores de fase e por valores de linha em estrela e triângulo são iguais. Logo, efetuaremos a representação de apenas uma delas, uma vez que a relação final é a mesma. É importante lembrar, no entanto, que os valores em cada uma das ligações são diferentes; o que se mantém são as relações.

Potência ativa total no sistema trifásico (circuitos equilibrados)

$$P_T = 3P = 3v_F i_F \cos\varphi \text{ [W]}$$

ou

$$P_T = \sqrt{3} v_L i_L \cos\varphi \text{ [W]}$$

Potência reativa total no sistema trifásico (circuitos equilibrados)

$$Q_T = 3Q = 3v_F i_F \sin\varphi \text{ [VAr]}$$

ou

$$Q_T = \sqrt{3} v_L i_L \sin\varphi \text{ [VAr]}$$

Potência aparente total no sistema trifásico (circuitos equilibrados)

$$S_T = 3S = 3v_F i_F \text{ [VA]}$$

ou

$$S_T = \sqrt{3} v_L i_L \text{ [VA]}$$

Exemplo

Um motor possui enrolamentos com reatância indutiva de 4Ω e resistência interna de 3Ω cada um. A tensão da rede que alimenta o motor é de 220 V_{ef} (tensão de linha). Determine as correntes de linha e fase, bem como as potências ativa, aparente e reativa totais, para as ligações em estrela e em triângulo.

Solução:

a) Ligação em estrela (figura 15.5):

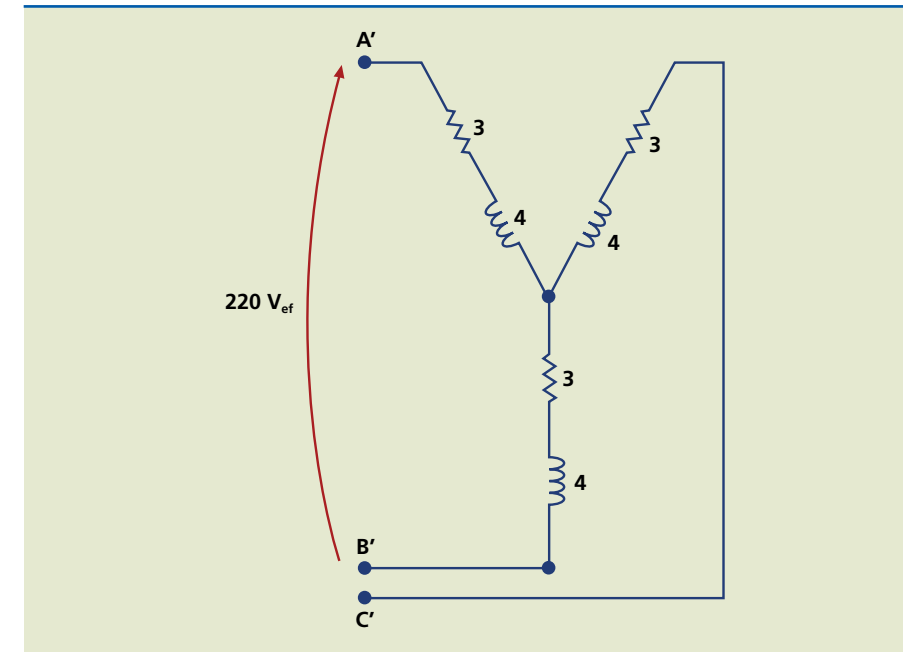


Figura 15.5

$$z = 3 + 4j \text{ [\Omega]}$$

logo:

$$z = 5 \angle 53,13^\circ$$

Trabalhando apenas com o módulo, temos:

$$v_L = v_F \cdot \sqrt{3} \Rightarrow 220 = v_F \cdot \sqrt{3} \Rightarrow v_F = 127 \text{ [V}_{ef}]$$

$$i_L = i_F = \frac{v_F}{Z} \Rightarrow i_L = i_F = \frac{127}{5} \Rightarrow i_L = i_F = 25,4 \text{ [A}_{ef}]$$

$$S_T = 3S = 3v_F i_F = 127 \cdot 25,4 \rightarrow S_T = 3 \, 225,8 \text{ [VA]}$$

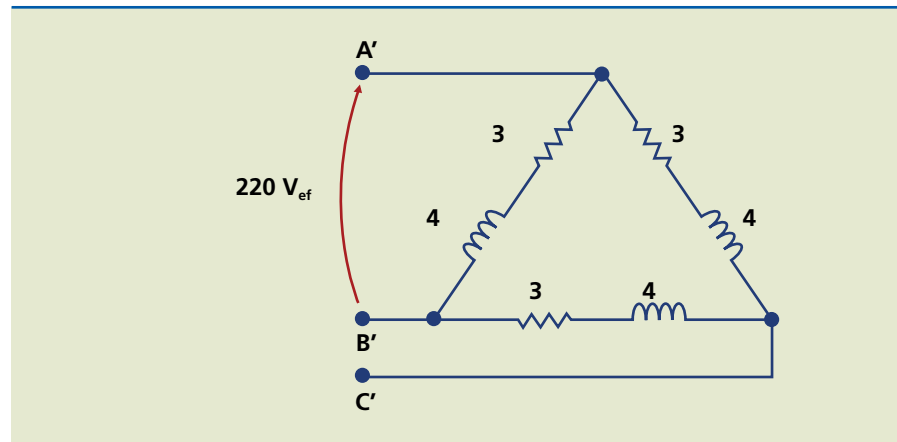
$$P_T = S_T \cos\varphi = 3 \, 225,8 \cdot \cos 53,13^\circ \Rightarrow P_T = 1 \, 935,48 \text{ [W]}$$

$$Q_T = S_T \sin\varphi = 3 \, 225,8 \cdot \sin 53,13^\circ \Rightarrow Q_T = 2 \, 580,64 \text{ [VAr]}$$



b) Ligação em triângulo (figura 15.6):

Figura 15.6



$$v_L = v_F = 220 V_{ef}$$

$$i_F = \frac{v_F}{Z} = \frac{220}{5} \Rightarrow i_F = 44 [A_{ef}]$$

$$i_L = i_F \sqrt{3} = 44 \sqrt{3} \Rightarrow i_L = 76,21 [A_{ef}]$$

$$S_T = 3S = 3 v_F i_F = 220 \cdot 44 \Rightarrow S_T = 9680 [VA]$$

$$P_T = S_T \cos \varphi = 9680 \cdot \cos 53,13^\circ \Rightarrow P_T = 5808 [W]$$

$$Q_T = S_T \sin \varphi = 9680 \cdot \sin 53,13^\circ \Rightarrow Q_T = 7744 [VA_r]$$

Comparando os resultados obtidos com as duas ligações, para mesma tensão e mesma carga, observa-se que a corrente de linha em triângulo é três vezes maior que em estrela, e o mesmo vale entre as potências.

Por isso, a partida de um motor trifásico é feita em estrela, pois na partida a corrente do motor aumenta. Como em estrela o valor inicial é menor, a corrente de pico de partida também é. Entretanto, como em triângulo as potências são maiores, utiliza-se, por exemplo, uma chave estrela-triângulo automática, com a partida em estrela e o regime nominal em triângulo.

Referências bibliográficas



ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. *Curso de física*. Vol. 3. 3ª ed. São Paulo: Scipione, 2007.

ANZENHOFER, K. et al. *Eletrotécnica para escolas profissionais*. 3ª ed. São Paulo: Mestre Jou, 1980.

BENCHIMOL, A. *Uma breve história da eletrônica*. Rio de Janeiro: Interciência, 1995.

COTRIM, A. A. M. B. *Instalações elétricas*. 4ª ed. São Paulo: Pearson-Makron Books, 2008.

CREDER, H. *Instalações elétricas*. 15ª ed. revista e atualizada. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lições de física*. Porto Alegre: Bookman, 2008.

FILIPPO FILHO, G. *Motor de indução*. São Paulo: Érica, 2000.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. *Máquinas elétricas*. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GOZZI, G. G. M. *Circuitos magnéticos*. São Paulo: Érica, 1996.

GUSSOW, M. *Eletricidade básica*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

JORDÃO, R. G. *Máquinas síncronas*. Rio de Janeiro: LTC; São Paulo: Edusp, 1980.

MARTINS, J. B. *A história da eletricidade*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

PAZOS, F. *Automação de sistemas e robótica*. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.

RAMALHO, F. et al. *Os fundamentos da física*. Vol. 3.ª ed. São Paulo: Moderna, 1978.

YOUNG, H.; SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W. *Física 3: eletricidade e magnetismo*. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

SITES

ABNT: <<http://www.abnt.org.br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

ANSI-J-STD 607-A - Normas para aterramento: <<http://www.ansi.org>>. Acesso em: 29 jun. 2011.



CPFL: <<http://www.cpfl.com.br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Elektor: <<http://www.elektor.com>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Força atrativa e força repulsiva: <<http://educacao.uol.com.br/fisica/condutores-retilineos-e-paralelos-regra-da-mao.jhtm>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Máquinas elétricas: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_T07.asp>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Motores elétricos – CTAI (Centro de Tecnologia em Automação e Informática):
- <<http://www.ctai.senai.br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Projeto Física e Cidadania: <<http://www.ufjf.br/fisicaecidadania/>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

WEG: <<http://www.weg.net/br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.



CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO





Excelência no ensino profissional

Administrador da maior rede estadual de educação profissional do país, o Centro Paula Souza tem papel de destaque entre as estratégias do Governo de São Paulo para promover o desenvolvimento econômico e a inclusão social no Estado, na medida em que capta as demandas das diferentes regiões paulistas. Suas Escolas Técnicas (Etecs) e Faculdades de Tecnologia (Fatecs) formam profissionais capacitados para atuar na gestão ou na linha de frente de operações nos diversos segmentos da economia.

Um indicador dessa competência é o índice de inserção dos profissionais no mercado de trabalho. Oito entre dez alunos formados pelas Etecs e Fatecs estão empregados um ano após concluírem o curso. Além da excelência, a instituição mantém o compromisso permanente de democratizar a educação gratuita e de qualidade. O Sistema de Pontuação Acrescida beneficia candidatos afrodescendentes e oriundos da Rede Pública. Mais de 70% dos aprovados nos processos seletivos das Etecs e Fatecs vêm do ensino público.

O Centro Paula Souza atua também na qualificação e requalificação de trabalhadores, por meio do Programa de Formação Inicial e Educação Continuada. E ainda oferece o Programa de Mestrado em Tecnologia, recomendado pela Capes e reconhecido pelo MEC, que tem como área de concentração a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável.