



GRADUAÇÃO PRESENCIAL
1º semestre- 2016

Eletrônica Industrial
Tec. Aut. Ind. – 4º/ 5ºsemestres

Profº. Ms.Cristiano Malheiro

cmalheiro@anhanguera.com
cmalheiro@aedu.com
<http://cristianotm.wix.com/aulas>

1



Aula 3

Apresentação do PEA

Principais assuntos abordados:

- Sistemas Trifásicos;
- Diodos eletrônicos de potência;
- Retificadores controlados;
- Circuitos de Disparo



Aula 3

Bibliografia Básica



Análise Básica de Circuitos para Engenharia, 10ª edição

1. IRWIN, J. David. **Análise Básica de Circuitos para Engenharia**. 10ªed. São Paulo: LTC, 2013.

Na biblioteca ebook:

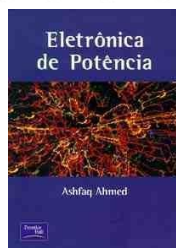
<http://187.86.214.60/pergamum/biblioteca/index.php?id=ANHAN>

1. ☐ Análise básica de circuitos para engenharia - 10 / 2013 - (E-book)

IRWIN, J. David. Análise básica de circuitos para engenharia. 10. Rio de Janeiro LTC 2013 1 recurso online ISBN 978-85-216-2320-5.

online

[Exemplares](#) | [Marc](#)



2. AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. 1ª ed. São Paulo: Pearson- Prentice Hall, 2000.

621.317 A241e São Bernardo Campo/SP-Anchiet - ANHAN

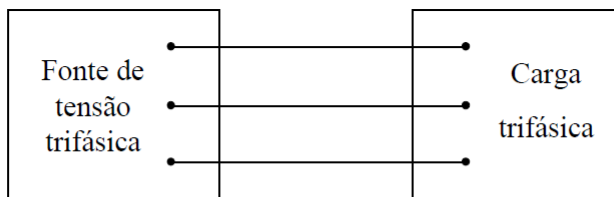
3

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos



Sistema trifásico equilibrado:

- cargas (consumos de potência activa e reactiva) equilibradas, isto é iguais, por fase;
- componentes do sistema (linhas, transformadores e geradores) de características lineares e idênticas em cada fase;
- sistema de tensões trifásicas simétrico.

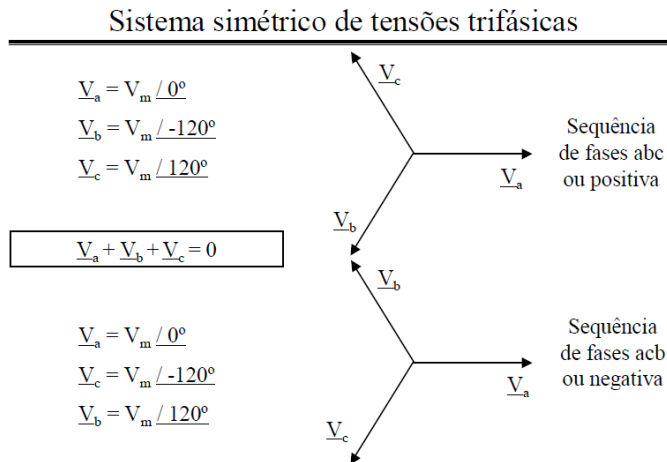
4

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos



5

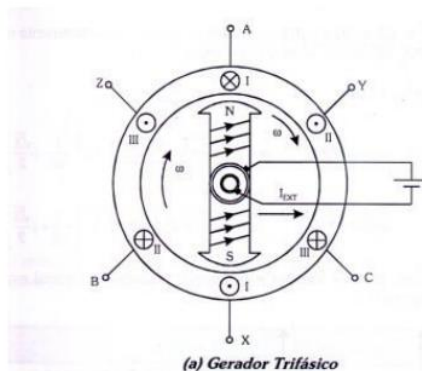
kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

Em um **gerador trifásico**, existem três enrolamentos separados fisicamente de 120° entre si, resultando em **três tensões induzidas defasadas de 120°** . A figura abaixo mostra simplificada um gerador trifásico.



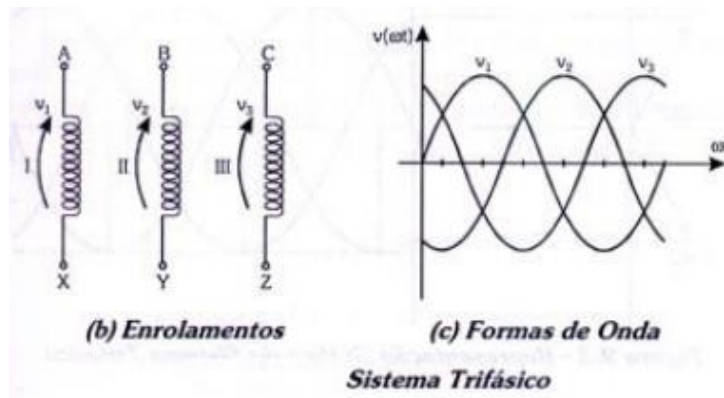
6

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos



7

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

Os três enrolamentos são estáticos e têm o mesmo número de espiras. Esta parte do gerador é denominado **estator**. Os pontos A, B, e C representam uma das extremidades de cada enrolamento e os pontos x, Y, e Z, respectivamente, a outra extremidade.

O campo magnético é girante e produzido por um outro enrolamento energizado a partir de uma fonte CC independente, ou a partir da retificação da própria tensão obtida no gerador (auto-excitação).

Sejam $v_{1(t)}$, $v_{2(t)}$ e $v_{3(t)}$ as tensões induzidas respectivamente nos enrolamentos AX, BY e CZ. Matematicamente, tem-se:

$$v_1(t) = V_p \cdot \sin \omega t \quad \text{ou} \quad v_1 = V_p \angle 0^\circ = V_p$$

$$v_2(t) = V_p \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \quad \text{ou} \quad v_2 = V_p \angle -120^\circ = V_p \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$v_3(t) = V_p \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \quad \text{ou} \quad v_3 = V_p \angle 120^\circ = V_p \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

8

kroton
paixão por educar

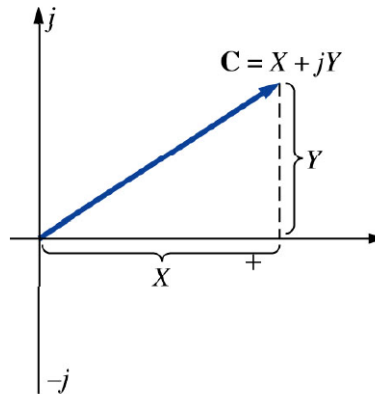


Aula 3

Sistemas Trifásicos

Forma retangular

$$C = X + j \cdot Y$$



9

kroton
paixão por educar



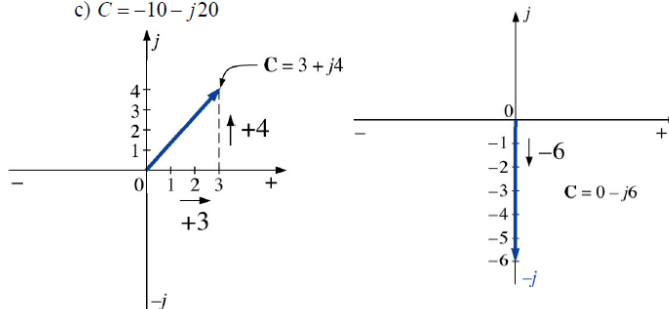
Aula 3

Sistemas Trifásicos

Forma retangular

Exemplo 14.13: Represente os seguintes números no plano complexo:

- a) $C = 3 + j4$
- b) $C = 0 - j6$
- c) $C = -10 - j20$



10

kroton
paixão por educar

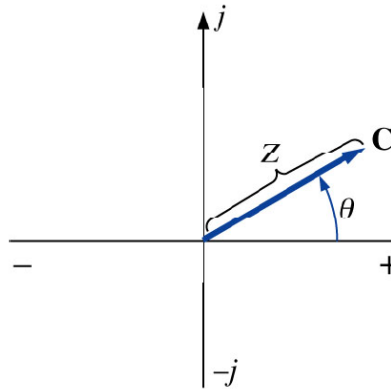


Aula 3

Sistemas Trifásicos

Forma polar

$$C = Z \angle \theta$$



11


 kroton
paixão por educar

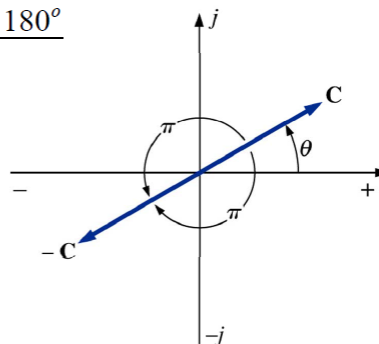

Aula 3

Sistemas Trifásicos

Forma polar

Efeito do sinal negativo:

$$-C = -Z \angle \theta = Z \angle \theta \pm 180^\circ$$



12


 kroton
paixão por educar



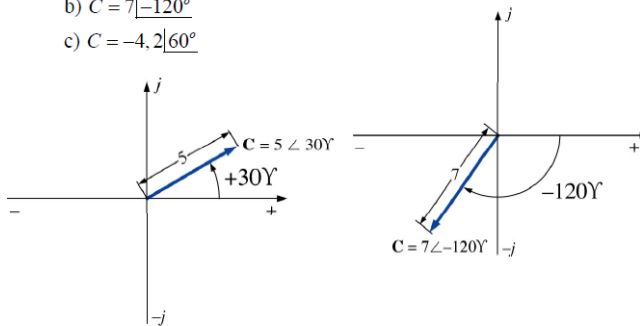
Aula 3

Sistemas Trifásicos

Forma polar

Exemplo 14.14: Represente os seguintes números no plano complexo:

- a) $C = 5 \angle 30^\circ$
- b) $C = 7 \angle -120^\circ$
- c) $C = -4,2 \angle 60^\circ$



13

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

Conversão entre formas

Retangular para polar

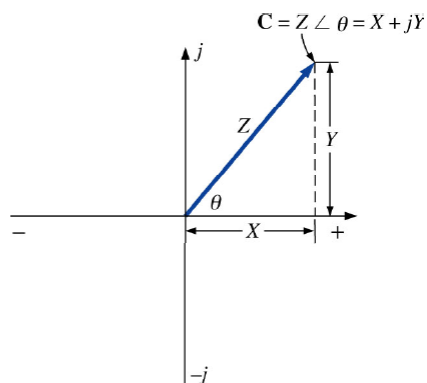
$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$$

Polar para retangular

$$X = Z \cdot \cos(\theta)$$

$$Y = Z \cdot \sin(\theta)$$



14

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

Conversão entre formas

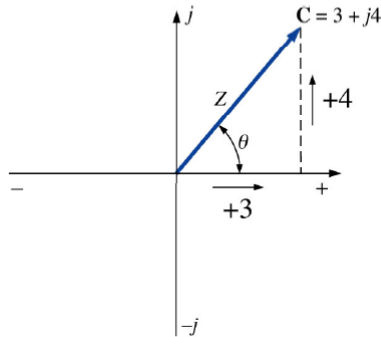
Exemplo 14.15: Converta o número complexo a seguir para a forma polar:

$$C = 3 + j4$$

$$Z = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{4}{3}\right) = 53,13^\circ$$

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



15

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

Conversão entre formas

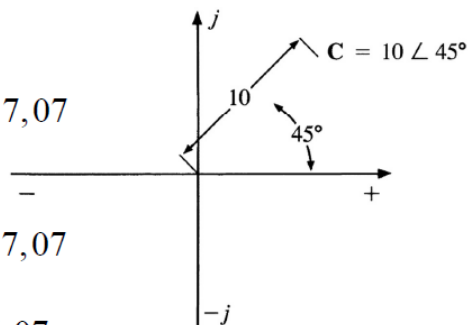
Exemplo 14.16: Converta o número complexo a seguir para a forma retangular:

$$C = 10 \angle 45^\circ$$

$$X = 10 \cdot \cos(45^\circ) = 7,07$$

$$Y = 10 \cdot \operatorname{sen}(45^\circ) = 7,07$$

$$C = 7,07 + j7,07$$



16

kroton
paixão por educar

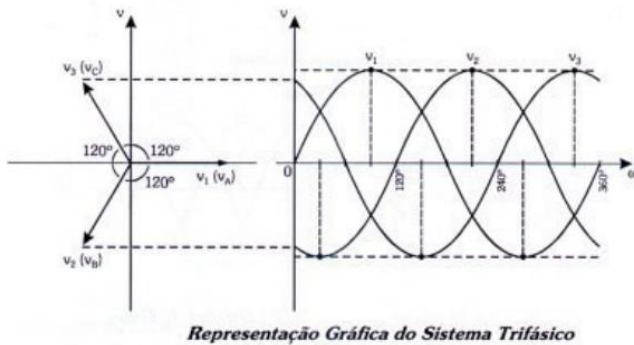


Aula 3

Sistemas Trifásicos

$$v_3(t) = V_p \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \quad \text{ou} \quad v_3 = V_p \angle 120^\circ = V_p \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

O gráfico das três tensões e o respectivo diagrama fasorial estão mostrados abaixo:



17

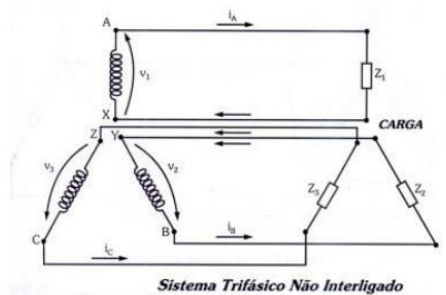
kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

Se cada fase do gerador é conectada a circuitos separados, o sistema trifásico é chamado de **não interligado**, necessitando de seis fios para a conexão de carga trifásica, como mostra a figura abaixo:



Este método não é econômico, não sendo usado na prática. Existem dois métodos comuns de interligar as fases em um sistema trifásico: as ligações estrela (Y) e triângulo ou delta (Δ).

18

kroton
paixão por educar

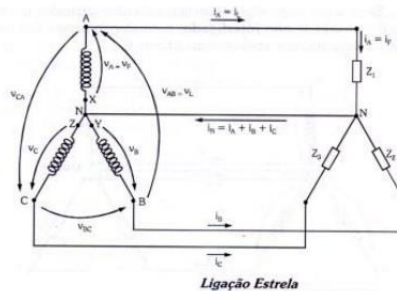


Aula 3

Sistemas Trifásicos

Ligação Estrela

Na ligação estrela, os pontos X,Y, e Z são interligados entre si, formando um ponto comum chamado de neutro(N), sendo este ponto ligado ao neutro da carga. A figura abaixo representa este tipo de ligação.



A corrente no fio neutro é a soma vetorial das correntes de fase, isto é:

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

Tensões de Fase e de Linha

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

As tensões medidas entre os terminais do gerador (pontos AB,BC e CA) são chamadas de tensões de linha (V_{AB}, V_{BC} e V_{CA}) ou, genericamente, V_L .

Na figura anterior, as setas das tensões dão a orientação positiva (arbitrária), podendo-se equacioná-las do seguinte modo:

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

$$V_{BC} = V_B - V_C$$

$$V_{CA} = V_C - V_A$$

Estes três expressões significam que, em cada instante, as tensões de linha (V_{AB}, V_{BC} e V_{CA}) são iguais às diferenças entre os valores instantâneos das respectivas tensões de fase (V_A, V_B, V_C).

As **tensões de fase** podem ser escritas como:

$$v_A(t) = V_p \cdot \sin \omega t$$

ou $v_A = V_F \angle 0^\circ = V_F$

$$v_B(t) = V_p \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \quad \text{ou} \quad v_B = V_F \angle -120^\circ = V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$v_C(t) = V_p \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \quad \text{ou} \quad v_C = V_F \angle 120^\circ = V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$



Aula 3

Sistemas Trifásicos

As tensões de linha podem ser escritas como:

$$v_{AB} = v_A - v_B = V_F - V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = V_F \cdot \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} V_F \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right)$$

Portanto: $v_{AB} = \sqrt{3} V_F \angle 30^\circ$

$$v_{BC} = v_B - v_C = V_F - V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = V_F (-j\sqrt{3}) = -j\sqrt{3} V_F$$

Portanto: $v_{BC} = \sqrt{3} V_F \angle -90^\circ$

$$v_{CA} = v_C - v_A = V_F - V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - V_F = V_F \cdot \left(-\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -\sqrt{3} V_F \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right)$$

Portanto: $v_{CA} = \sqrt{3} V_F \angle 150^\circ$

21



Aula 3

Sistemas Trifásicos

As tensões de linha podem ser escritas como:

Assim, conclui-se que a relação entre os módulos das tensões de linha v_L e de fase v_F é dada:

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

Observação:

- Cuidado pois as tensões de linha e de fase são normalmente dadas em valores eficazes.

Exemplo:

A tensão de linha num sistema trifásico cuja tensão de fase é de $220V_{RMS}$ vale:

$$V_L = \sqrt{3} V_F = \sqrt{3} \cdot 220 \cong 381V_{rms}$$

22

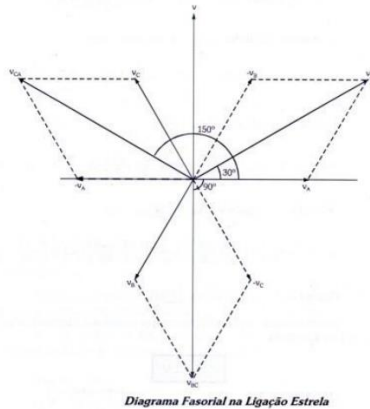




Aula 3

Sistemas Trifásicos

A figura abaixo mostra o diagrama fasorial das tensões de fase e de linha num sistema trifásico em ligação estrela.



23

kroton
paixão por educar



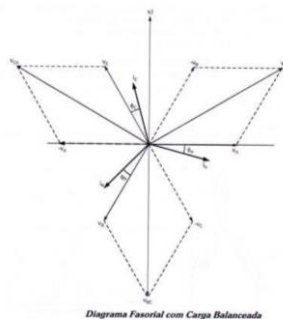
Aula 3

Sistemas Trifásicos

Cargas Balanceada e Desbalanceada

Num sistema trifásico, a carga é **balanceada** quando Z_1, Z_2 e Z_3 são iguais em módulo e fase.

Neste caso, as defasagens entre tensão e corrente em cada fase são iguais, isto é, $\Phi_A = \Phi_B = \Phi_C = \Phi$, como mostra a figura abaixo:



24

kroton
paixão por educar



Aula 3

Sistemas Trifásicos

Porém, a carga é desbalanceada quando Z_1 , Z_2 , e Z_3 possuem módulos ou fases diferentes, caso em que as defasagens entre tensão e corrente em cada fase são também diferentes, isto é: $\phi_A \neq \phi_B \neq \phi_C$

Correntes de Fase e de Linha

A corrente que percorre cada fase é chamada de corrente de fase, designada genericamente por i_F . A corrente que passa na linha que liga o gerador à carga é chamada de corrente de linha, designada genericamente por i_L . No caso de Ligação estrela, $i_L = i_F$.

Se a carga é **balanceada**, a corrente no fio neutro é zero, isto é $i_N = 0$. Se a carga é **desbalanceada**, a corrente no fio neutro é diferente de zero, isto é $i_N \neq 0$ ou, caso não haja o fio de retorno (neutro), as tensões nas cargas são diferentes.

25

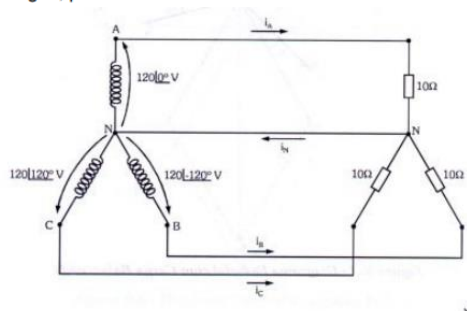


Aula 3

Sistemas Trifásicos

Exemplos:

Dado o circuito a seguir, pede-se:



a) Tensões de fase e de linha

$$V_F = 120V$$

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_F = \sqrt{3} \cdot 120 = 208V$$

26





Aula 3

Sistemas Trifásicos

b) Correntes de fase, de linha e no fio neutro

$$I_F = I_L = \frac{120}{10} = 12A$$

Como a carga é resistiva, as correntes de linha há estão em fase com suas tensões, porém defasadas de 120° entre si, isto é:

$$i_A = 12\angle 0^\circ = 12A \quad i_B = 12\angle -120^\circ = -6 - j10,39A \quad i_C = 12\angle 120^\circ = -6 + j10,39A$$

Portanto:

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 12 + (-6 - j10,39) + (-6 + j10,39) = 0A$$

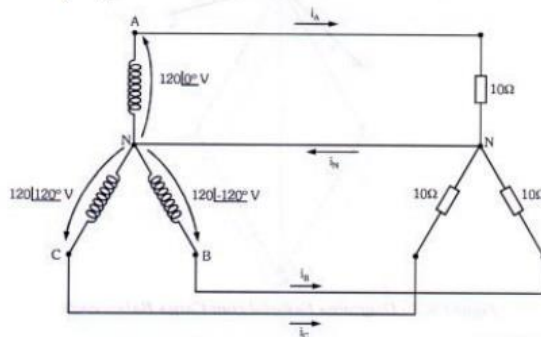
27



Aula 3

Sistemas Trifásicos

2) Dados o circuito a seguir, pede-se a corrente no fio neutro:



28





Aula 3

Sistemas Trifásicos

$$i_A = \frac{120 \angle 0^\circ}{10} = 12 \angle 0^\circ = 12A$$

$$i_B = \frac{120 \angle -120^\circ}{12} = 10 \angle -120^\circ = -5 - j8,66A$$

$$i_C = \frac{120 \angle 120^\circ}{20} = 6 \angle 120^\circ = -3 + j5,2A$$

Portanto:

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 12 + (-5 - j8,66) + (-3 + j5,2) = 4 - j3,46 = 5,29 \angle -40,9^\circ A$$

29



Bibliografia desta aula:

1. IRWIN, J. David.
**Análise de Circuitos
em Engenharia.** 4ªed.
São Paulo: Makron
Books, 2010.
2. <http://www.getulio.eng.br/meusalunos/circuitoseletricos/Sistema%20Trifasico.pdf>

