



REASON



Curso sobre Medição Fasorial Teoria e Prática

Teoria de Sincrofasores

Prof. I. C. Decker - LabPlan / UFSC

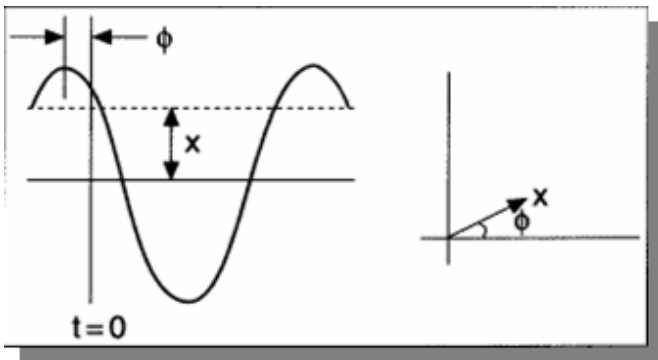
08-09/11/2007

Escopo

- ❑ Definição e Cálculo de Fasores
- ❑ Sincrofasores e Sincronização
- ❑ Cálculo prático de fasores
- ❑ PMU

Definição de Fasor

- ❑ O fasor é um número complexo associado a um sinal senoidal em regime permanente
- ❑ O módulo do fasor é igual ao valor eficaz do sinal e o ângulo de fase é a fase da onda para $t=0$



$$\left\{ \begin{array}{l} x(t) = X_m \cos(\omega_0 t + \phi) \\ \text{onde } X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \end{array} \right\}$$

 $\Leftrightarrow$

$$X \angle \phi$$

Cálculo de Fasores

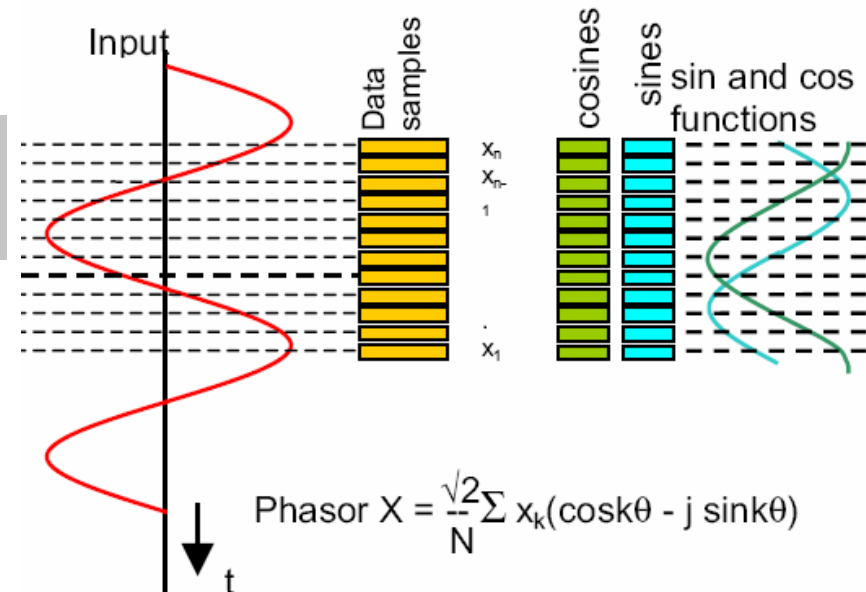
- Realizado, em geral, a partir do cálculo da Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*), após a conversão A/D (analógico/digital), das grandezas tensão e corrente.
- A DFT extrai a componente fundamental do sinal.
- Fasor:

$$X_r + jX_i = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N x_k \left[\cos(k \frac{2\pi}{N}) - j \sin(k \frac{2\pi}{N}) \right]$$

$$X = \sqrt{X_r^2 + X_i^2}$$

$$\phi = -\arctan \frac{X_i}{X_r}$$

N é o número de amostras

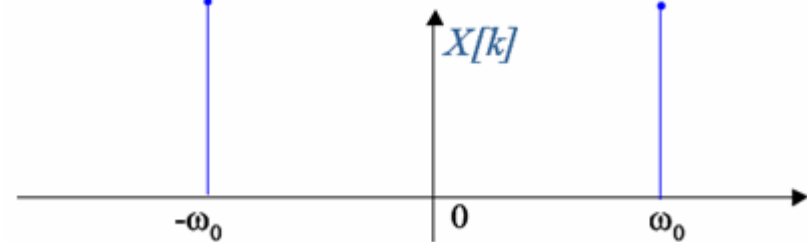
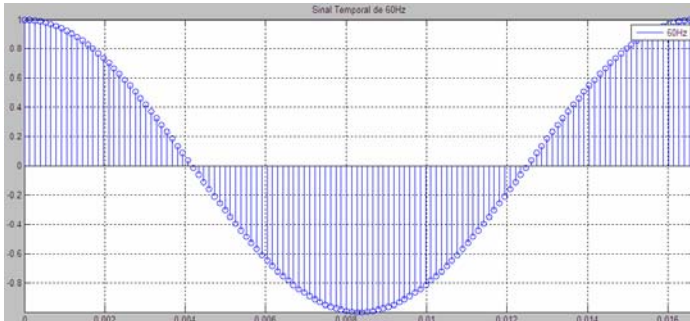


Cálculo de Fasores

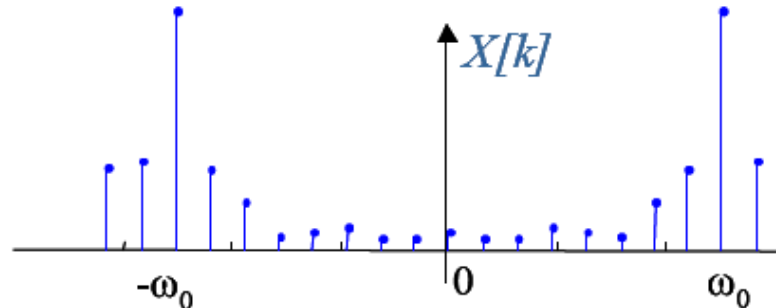
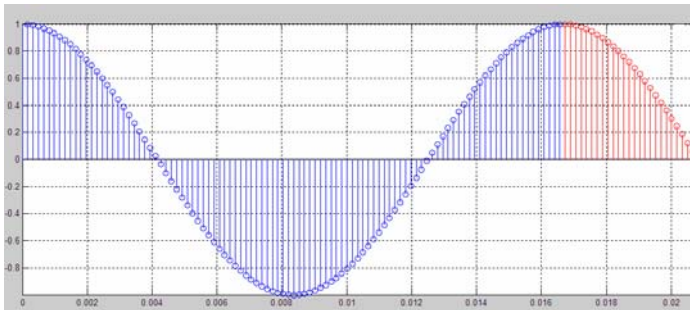
❑ Frequência fora da Nominal – Vazamento Espectral:

- O cálculo de fasores para frequências fora da nominal gera um erro acumulativo conhecido como vazamento espectral.

a) Frequência nominal



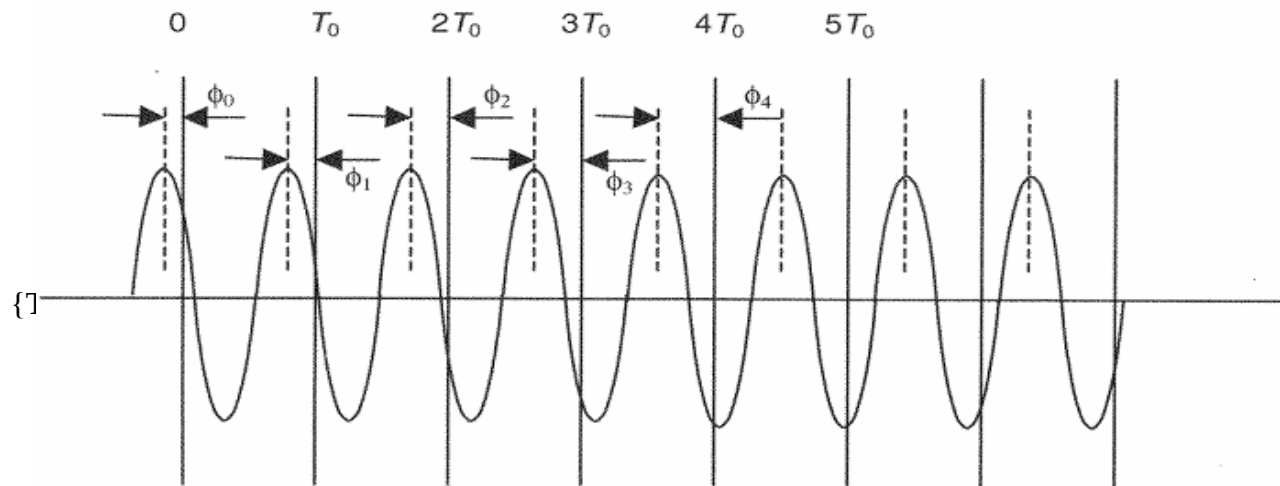
b) Frequência fora da nominal



Cálculo de Fasores

■ Frequência fora da nominal – Determinação do Ângulo:

➤ Considere a figura:



- Para uma senóide observada nos intervalos tem-se a representação fasorial $\{X_0, X_1, X_2, X_3, \dots\}$
- Se o intervalo de observação T_0 não for um múltiplo inteiro de $T = 1/f$ o fasor observado terá magnitude constante e o ângulo irá variar à taxa de $2\pi(f - f_0)/T_0$, onde $f_0 = 1/T_0$

Sincrofasores

❑ Definição:

- Dado o sinal $x(t) = X_m \cos(2\pi ft + \phi)$;
- A representação do sincrofasor X do sinal $x(t)$ é o número complexo dado por:

$$\dot{X} = X_r + jX_i = (X_m / \sqrt{2})e^{j\phi} = X_m / \sqrt{2}(\cos \phi + j \sin \phi)$$

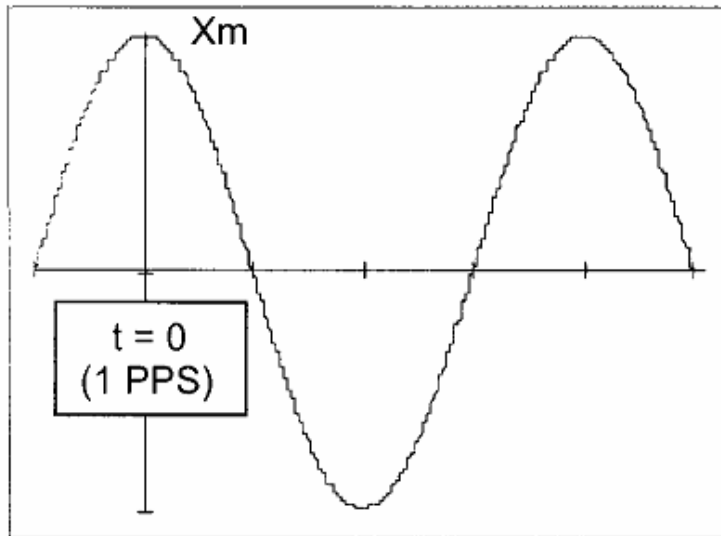
- $X_m / \sqrt{2}$ é o valor *rms* do sinal $x(t)$ na frequência instantânea;
- ϕ é o ângulo de fase instantâneo relativo à cossenóide de frequência nominal sincronizada pelo UTC (*Universal Time Coordinated*).

A representação do fasor é independente da sua frequência.

Sincrofasores

Definição (cont.):

- O ângulo é definido como 0° quando o valor máximo de $x(t)$ ocorrer no mesmo instante do PPS, e -90° quando o cruzamento positivo ocorrer no pulso do UTC

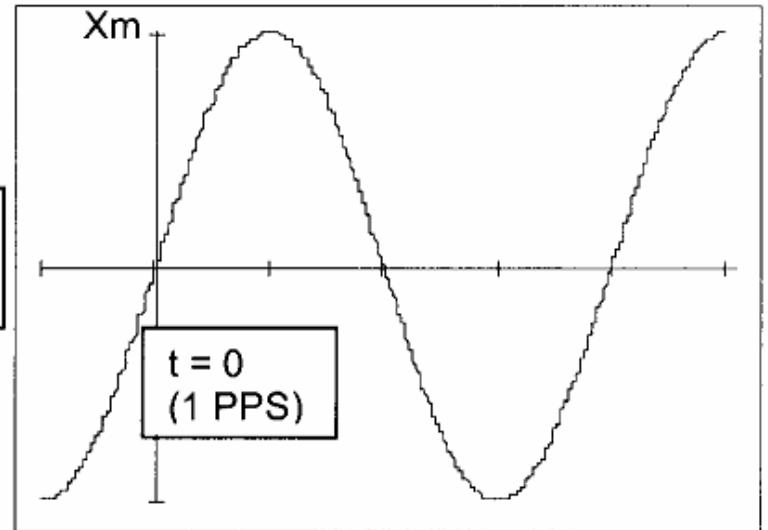


$$X = X_m / \sqrt{2}$$

(0 Graus)

sinal
 $x(t)$

Representação do
Sincrofasor

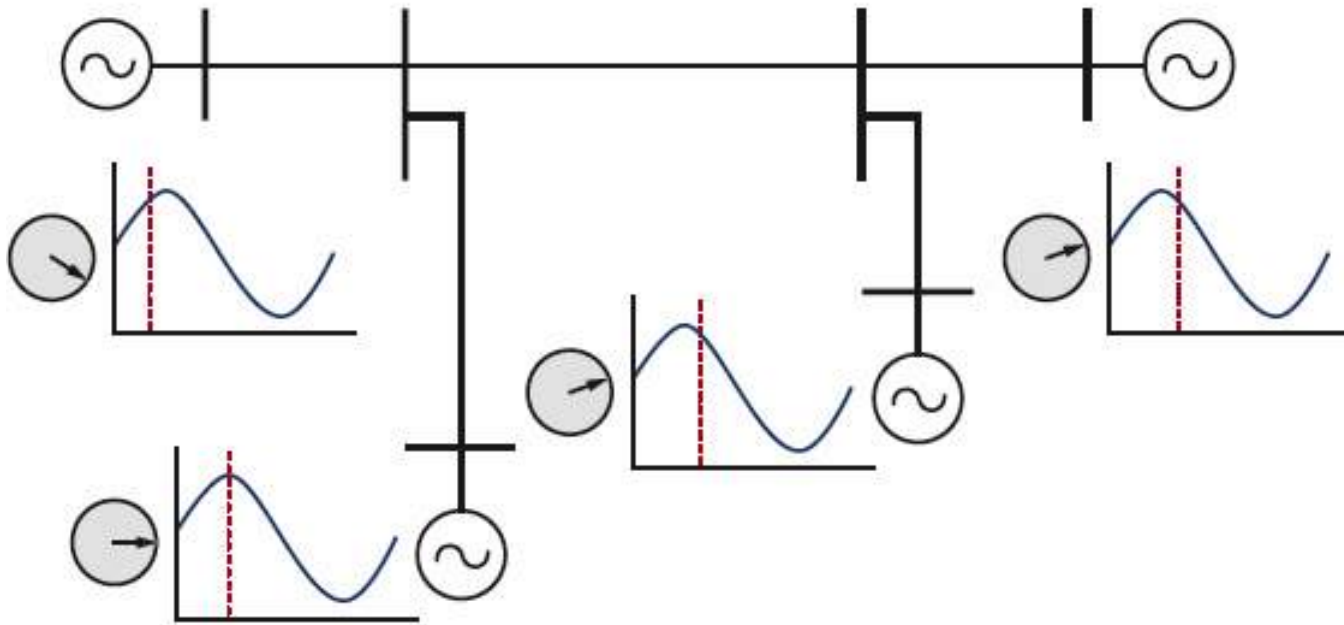


$$X = (X_m / \sqrt{2}) e^{-j\pi/2}$$

(-90 Graus)

Medição de Sincrofasores (Aplicação à Rede Elétrica)

- ❑ Fasores calculados em instalações geograficamente distantes usando-se a mesma referência de tempo



Há necessidade de uma referência temporal única - Sincronização!

Tarefa não-trivial: Envolve grandes distâncias e alta precisão temporal

Sincronização

❑ Requisitos da Fonte de Sincronização:

- Altamente confiável e precisa;
- A precisão temporal deve atender aos requisitos das aplicações

❑ Estimativas para sistemas de 60 Hz:

- Erro temporal de $1\mu\text{s}$ → erro de 0,021 graus
- Erro temporal de 1ms → erro de 21,6 graus

❑ Fontes de Sincronização:

- GOES, GPS, GALILEO, GLONAS

O GPS é atualmente o único sistema com disponibilidade e precisão suficiente para SPMS.

Sistema GPS

❑ 24 Satélites

❑ Tempo de órbita:

- 12 horas

❑ Visibilidade:

- 5 a 8 unidades de qualquer lugar e a qualquer tempo

❑ Sinais:

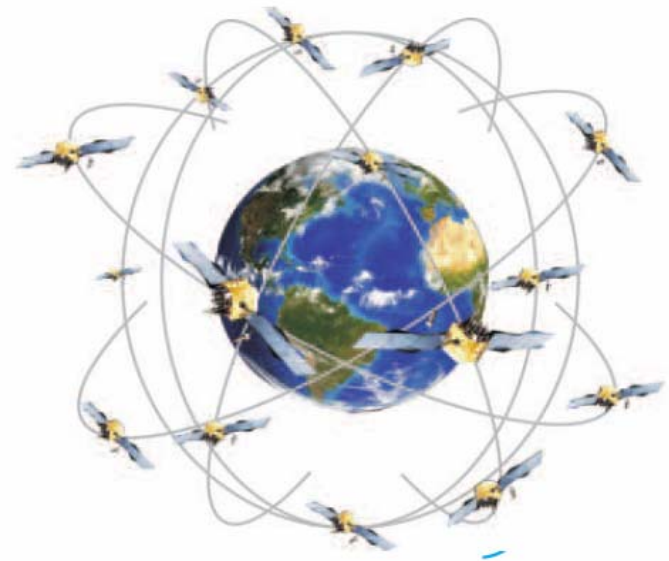
- Posição

❑ Velocidade

- **Tempo (1 PPS)**

❑ Precisão:

- Horizontal: 22 m.
- Vertical: 27.7 m.
- **Temporal: ≈ 100 nanosegundos**

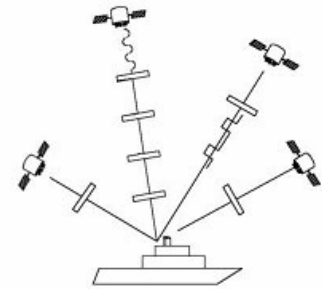
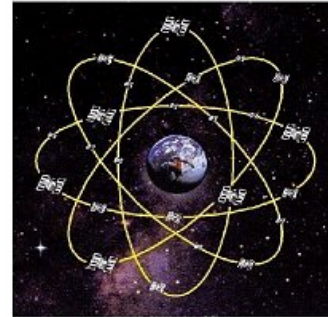


GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200km Altitudes, 55 Degree Inclination

Sistema GPS

❑ Aspectos Técnicos:

- Os sinais de 1 PPS chegam ao receptor GPS em tempos ligeiramente diferentes devido a diferença de distâncias entre os satélites
- As distâncias são determinadas estimando-se o tempo gasto pelo sinal para alcançar o receptor
- Estimada a distância de pelo menos 4 satélites, é possível calcular a sua posição em 3 dimensões
- Conhecida a posição é possível calcular o atraso de propagação de cada satélite com elevada precisão



Método usado para sincronizar o relógio do receptor GPS com o relógio dos satélites.

Sistema GPS

Aspectos Técnicos (cont.):

Modelo Matemático:

$$(X_1 - U_X)^2 + (Y_1 - U_Y)^2 + (Z_1 - U_Z)^2 = (R_1 - C_B)^2$$

$$(X_2 - U_X)^2 + (Y_2 - U_Y)^2 + (Z_2 - U_Z)^2 = (R_2 - C_B)^2$$

$$(X_3 - U_X)^2 + (Y_3 - U_Y)^2 + (Z_3 - U_Z)^2 = (R_3 - C_B)^2$$

$$(X_4 - U_X)^2 + (Y_4 - U_Y)^2 + (Z_4 - U_Z)^2 = (R_4 - C_B)^2$$

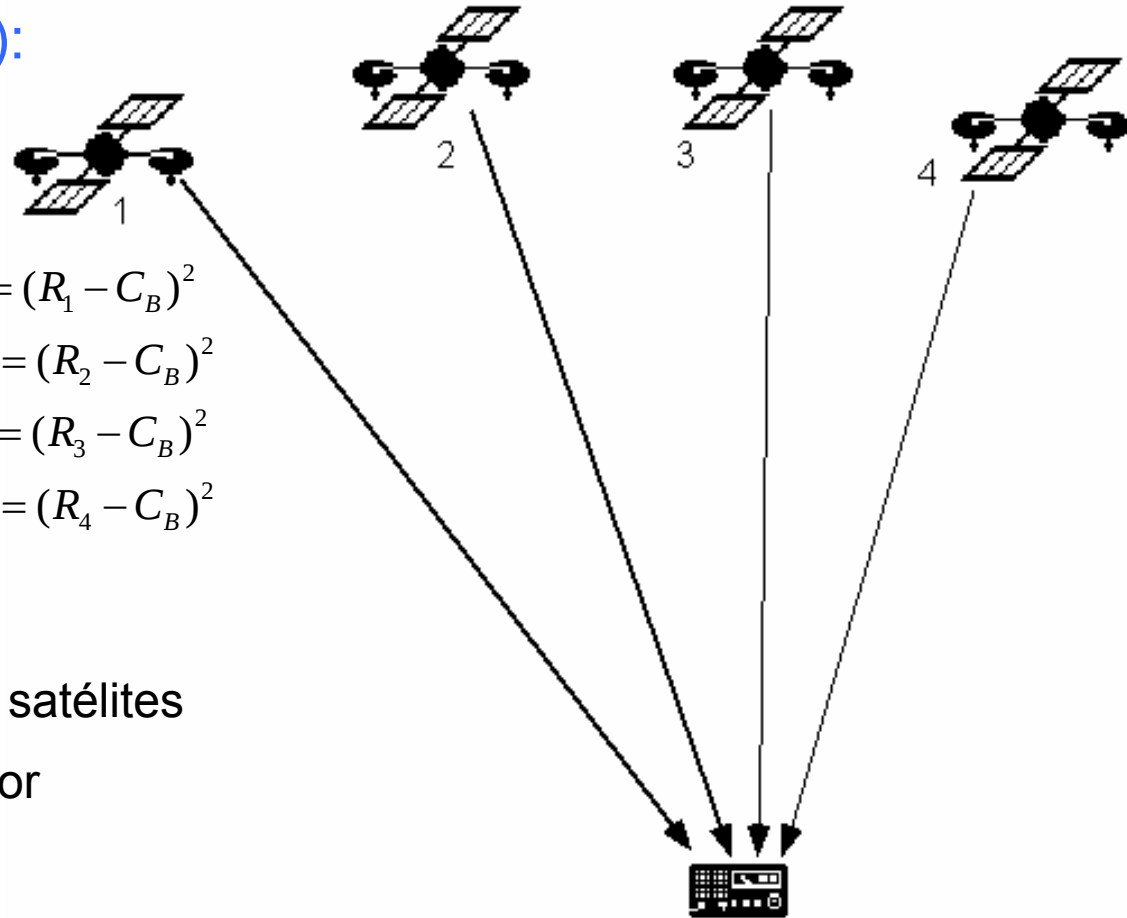
Onde:

$X_{1...4}, Y_{1...4}, Z_{1...4}$: coordenadas dos satélites

$R_{1...4}$: distância satélite - receptor

$U_{X,Y,Z}$: posição do usuário

C_B : tempo



Sincronização em Instalações

❑ Distribuição do sinal de sincronismo:

- Visa sincronizar diversos equipamentos de uma mesma instalação
- O padrão IRIG-B do grupo IRIG (*American Inter Range Instrument Group*) é o mais utilizado em sistemas elétricos

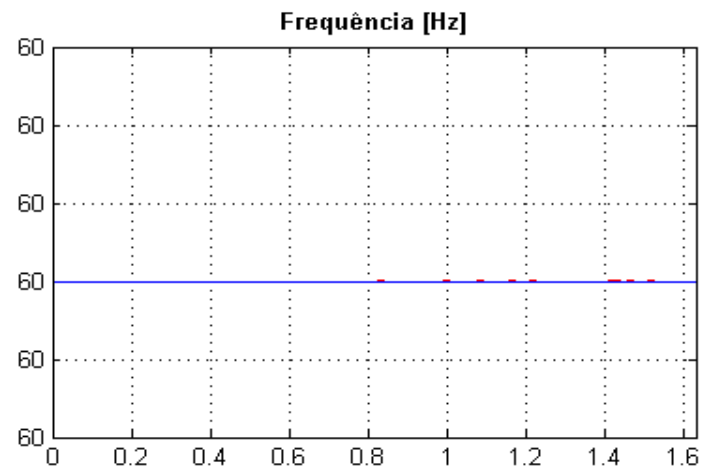
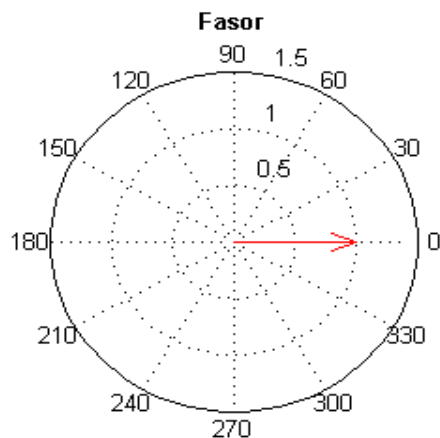
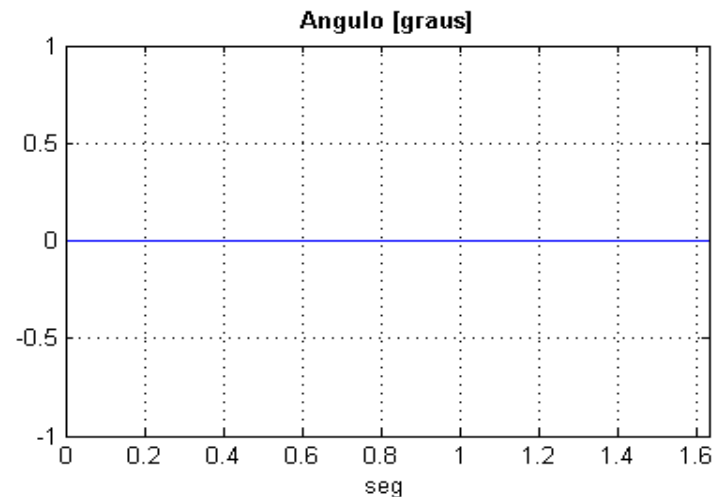
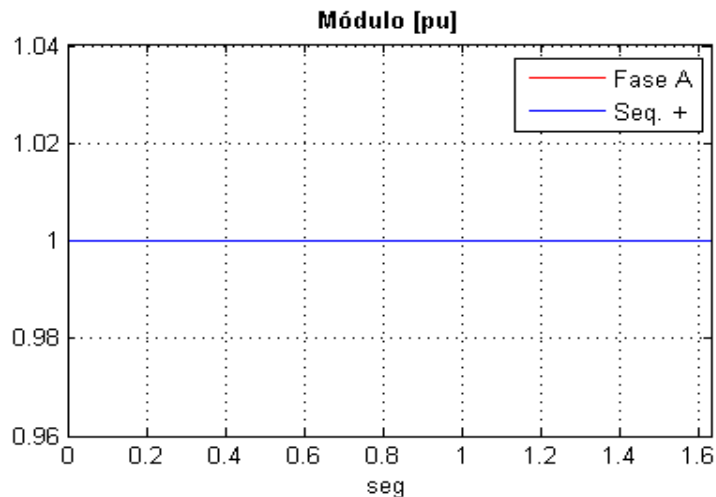
❑ Formato do sinal IRIG-B:

- Modulado:
 - » Utiliza sinal portador de 1kHz
 - » Fornece precisão típica de 1ms
 - » Sinal robusto, atingindo maiores distâncias
- Demodulado:
 - » Fornece precisão típica de 1ns
 - » Sensível a ruído

Para maior precisão o sinal IRIG-B modulado pode ser acompanhado por um sinal de 1 PPS, exigindo do equipamento entradas IRIG-B e de PPS.

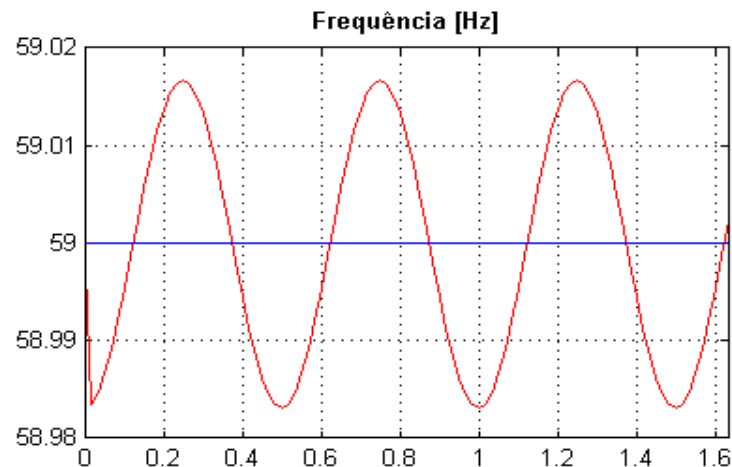
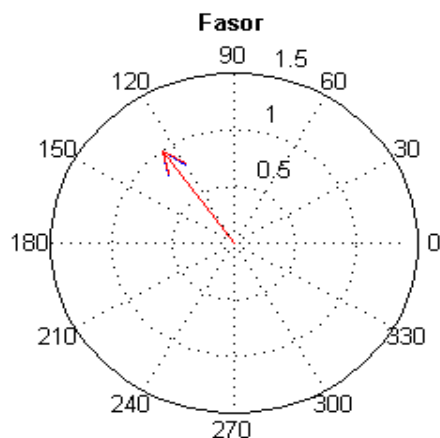
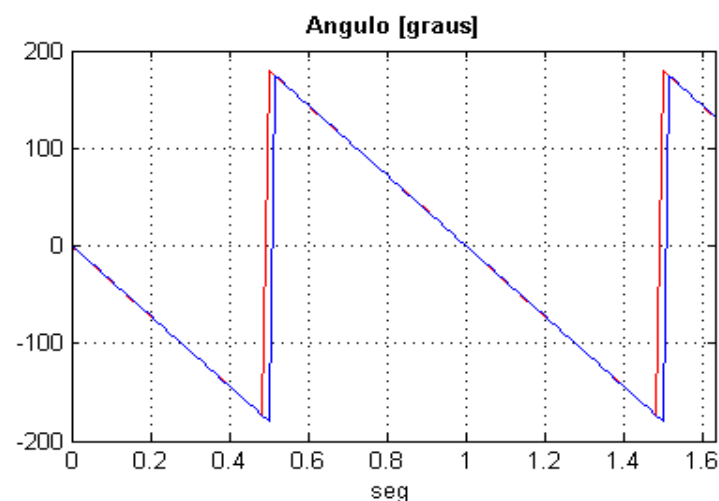
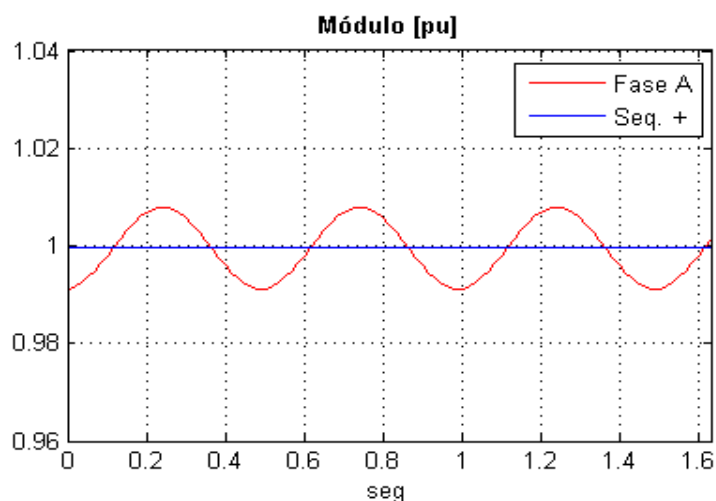
Cálculo Prático de Sincrofasores

❑ Caso 1: Sinal de 60 Hz



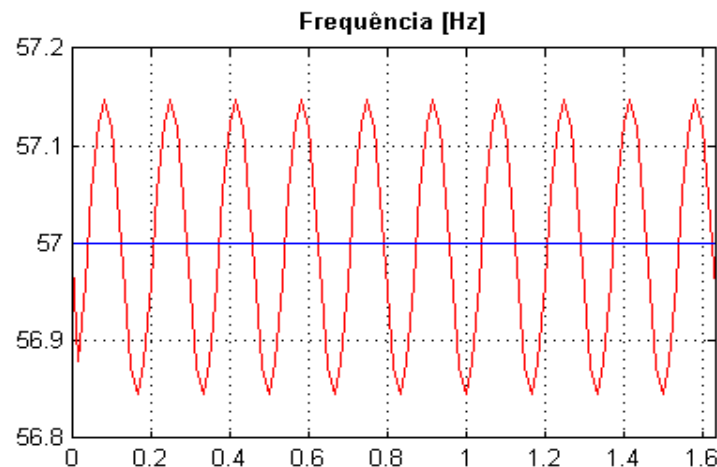
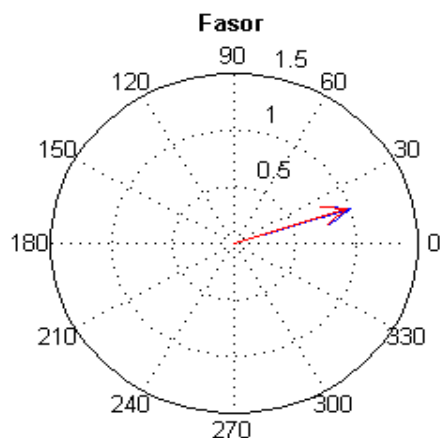
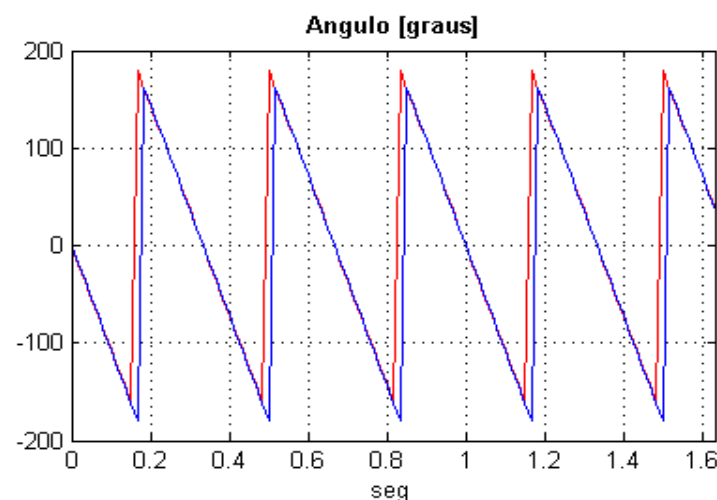
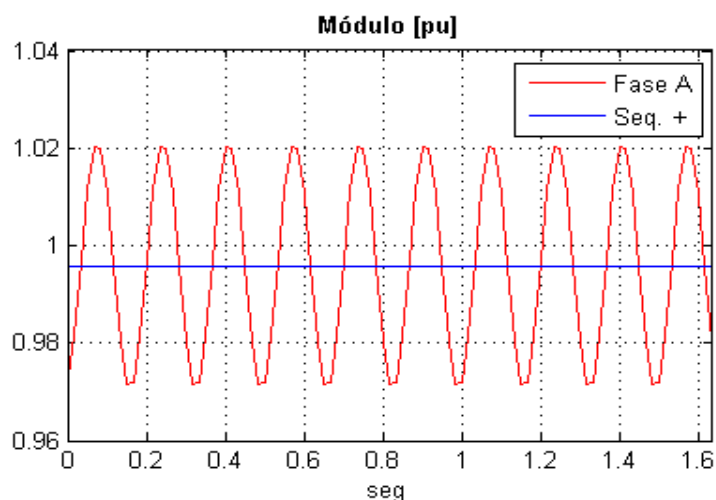
Cálculo Prático de Sincrofasores

□ Caso 2: Sinal de 59 Hz



Cálculo Prático de Sincrofasores

□ Caso 3: Sinal de 57 Hz



Cálculo Prático de Sincrofasores (Demonstrações)

❑ Sinal de 60 Hz

❑ Sinal de 61 Hz

❑ Sinal de 63 Hz

Comentários

❑ Sinal fora da frequência nominal:

- Produz vazamento espectral
- Gera comportamento oscilatório para o módulo do fasor por fase
- Produz variação do ângulo de fase
- O comportamento oscilatório para o módulo do fasor e frequência instantânea é eliminado para fasores de sequência positiva
- Diversas medidas podem ser implementadas para corrigir esse erro e os resultados dependem da opção adotada

É essencial o estabelecimento de padrões de desempenho e de procedimentos de verificação de conformidades

Cálculo Prático de Sincrofasores

Requisitos da Norma IEEE C37.118

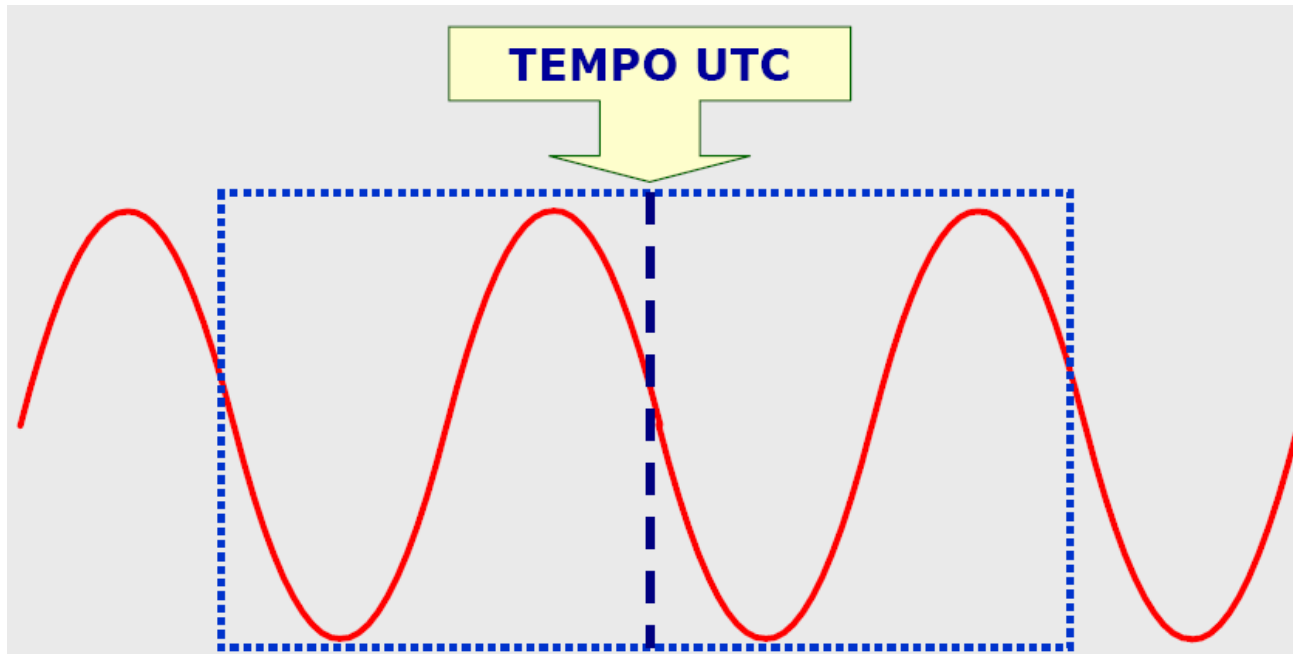
- ❑ Módulo: valor eficaz do sinal para a frequência instantânea
- ❑ Ângulo: deve atender aos parâmetros abaixo:

Time	Fractional time		Synchrophasor—60 Hz		Synchrophasor—61 Hz	
Second	Frame number	Fractional second	Synchrophasor (0°)	Synchrophasor (-90°)	Synchrophasor (0°)	Synchrophasor (-90°)
k-1	9	0.900000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -36^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -126^\circ$
k	0	0.000000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$
k	1	0.100000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 36^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -54^\circ$
k	2	0.200000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 72^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -18^\circ$
k	3	0.300000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 108^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 18^\circ$
k	4	0.400000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 144^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 54^\circ$
k	5	0.500000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 180^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 90^\circ$
k	6	0.600000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -144^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 126^\circ$
k	7	0.700000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -108^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 162^\circ$
k	8	0.800000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -72^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -162^\circ$
k	9	0.900000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -36^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -126^\circ$
k+1	0	0.000000	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle 0^\circ$	$X_m/\sqrt{2}, \angle -90^\circ$

Sincrofasores de um sistema de 60Hz a uma taxa de 10 frames por segundo.

Etiqueta de Tempo do Fator

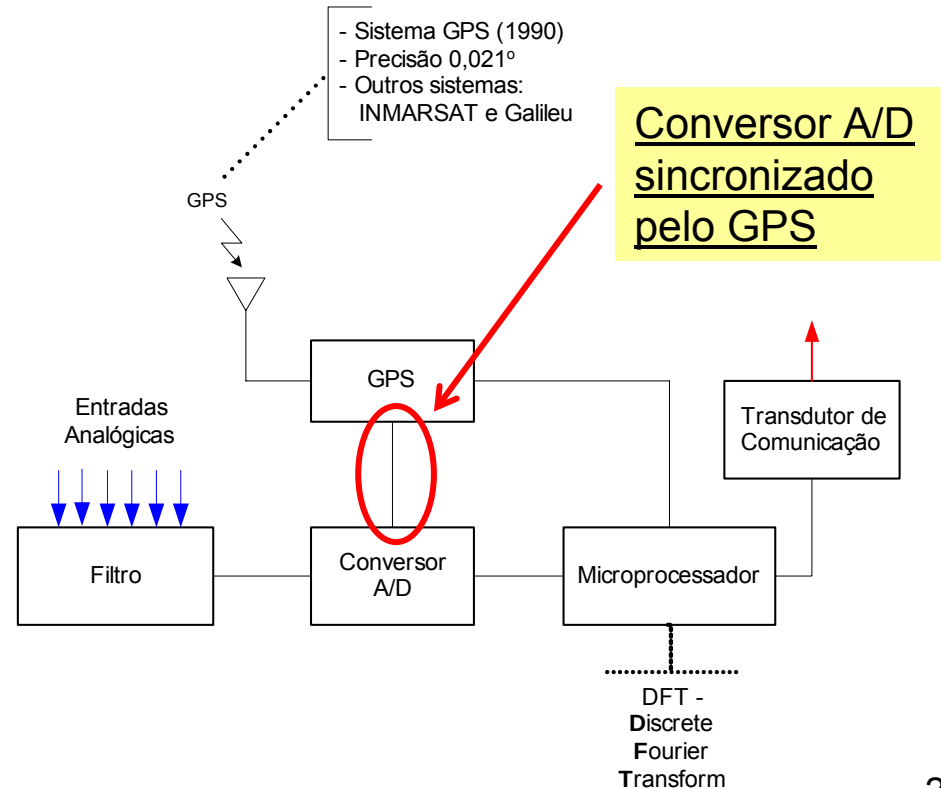
- ❑ A etiqueta de tempo do fator deve representar o tempo do fator teórico que o fator estimado representa
 - Corresponde ao tempo no centro da janela de amostragem
 - Os erros de magnitude e fase devem ser compensados



Unidade de Medição Fasorial Sincronizada

❑ PMU - *Phasor Measurement Unit*

- Composta por um receptor de sinal de GPS, sistema de aquisição (filtro + módulo de conversão A/D), e um microprocessador
- Realiza a aquisição das tensões e correntes das barras e linhas
- Processa os dados amostrados, obtendo assim os valores complexos de tensão e corrente
- Formata os dados obtidos segundo um padrão (IEEE 1344, IEEE C37.118)
- Envia as medidas fasoriais formatadas ao concentrador de dados



PMU – Requisitos de Desempenho

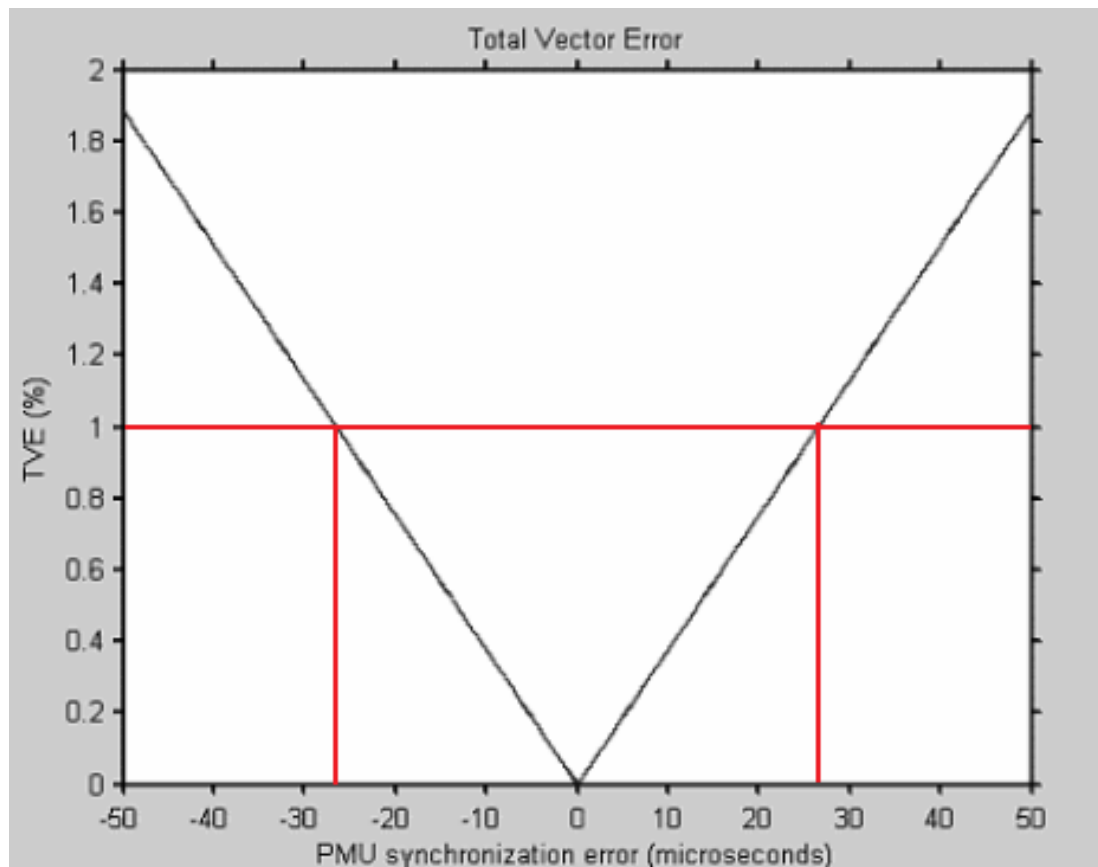
❑ Baseado no conceito de TVE (*Total Vector Error*)

Variável	Condição de Referência	Limites máximos de <i>TVE</i>			
		Nível 0		Nível 1	
		Faixa	<i>TVE</i> (%)	Faixa	<i>TVE</i> (%)
Frequência	60 Hz	± 0,5 Hz	1	± 5 Hz	1
Amplitude	100% do nominal	80 - 120% do nominal	1	10 - 120% do nominal	1
Ângulo	0 rad	± π rad	1	± π rad	1
Distorção Harmônica	< 0,2%	1% para qualquer harmônico até 50 th	1	10% para qualquer harmônico até 50 th	1
Interferência	< 0,2%	1%	1	10%	1

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r)^2 - (X_i(n) - X_i)^2}{X_r - X_i}}$$

Análise do TVE

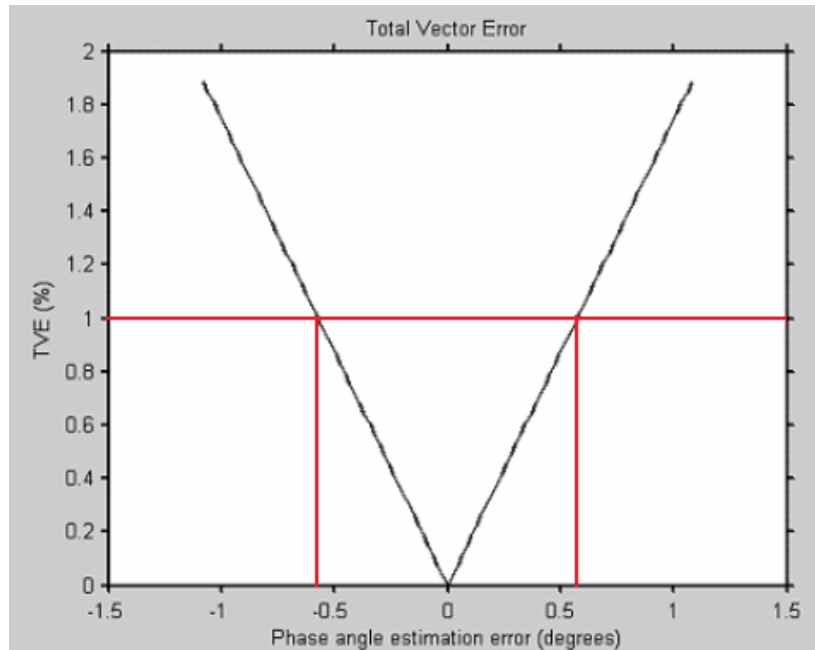
Erro devido ao tempo



TVE = 1% para erros de sincronização de $\pm 26\mu\text{s}$

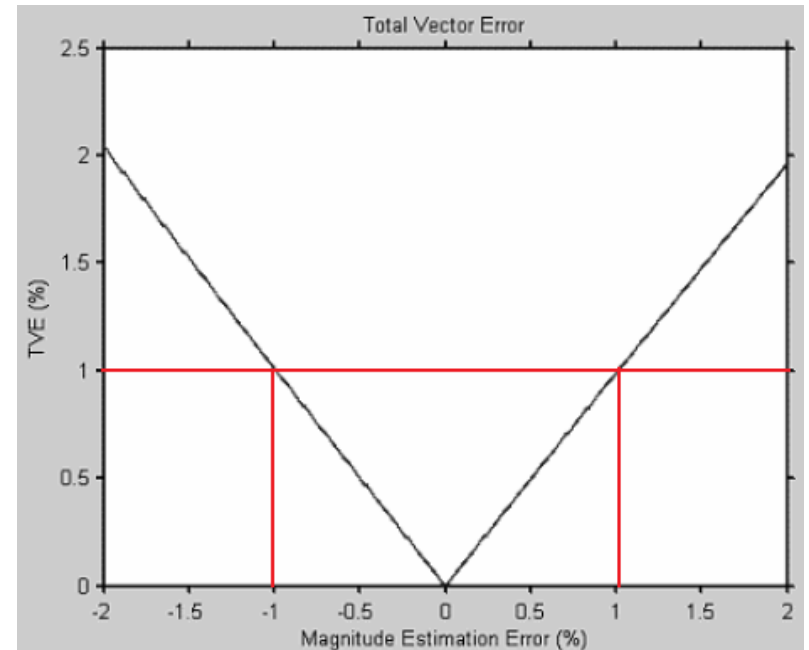
Análise do TVE

Erro devido ao ângulo de fase



TVE = 1% para erros de fase de $\pm 0,57^\circ$

Erro devido ao módulo



TVE = 1% para erros de módulo de $\pm 1\%$

Comentários

- ❑ A norma IEEE C37.118 especifica os requisitos de desempenho sem indicar os procedimentos de verificação de conformidade.
- ❑ Há um grupo de trabalho no âmbito do projeto EIPP/NASPI “Performance and Standards Task Team - PSTT” definindo recomendações.
- ❑ Projeto SMF/ONS:
 - Foram definidos procedimentos de ensaio de homologação das PMU;
 - Os ensaios deverão ser realizados por um único laboratório escolhido em processo de licitação internacional.

Obrigado!

◆ Ildemar C. Decker

- Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LabPlan
- Departamento de Engenharia Elétrica – EEL
- Centro Tecnológico – CTC
- Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
- E-mail: decker@labplan.ufsc.br