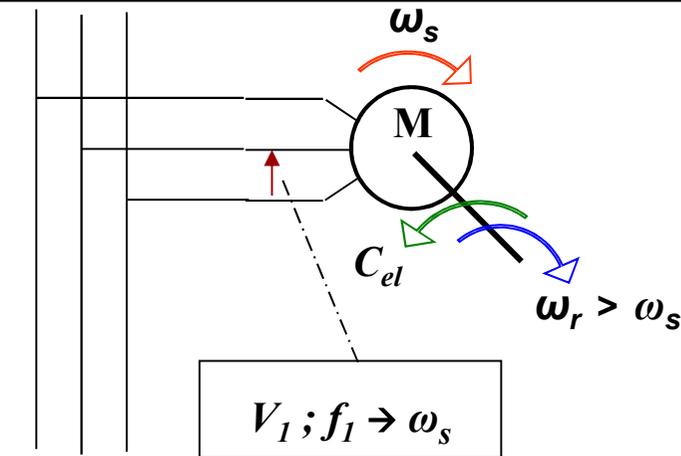


MÁQUINA ASSÍNCRONA OPERANDO NO MODO GERADOR

CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO COMO GERADOR



**REDE TRIFÁSICA
PREVIAMENTE ENERGIZADA**

**NECESSIDADE DE CAMPO GIRANTE PARA OPERAÇÃO DA
MÁQUINA ASSÍNCRONA → REDE ENERGIZADA**

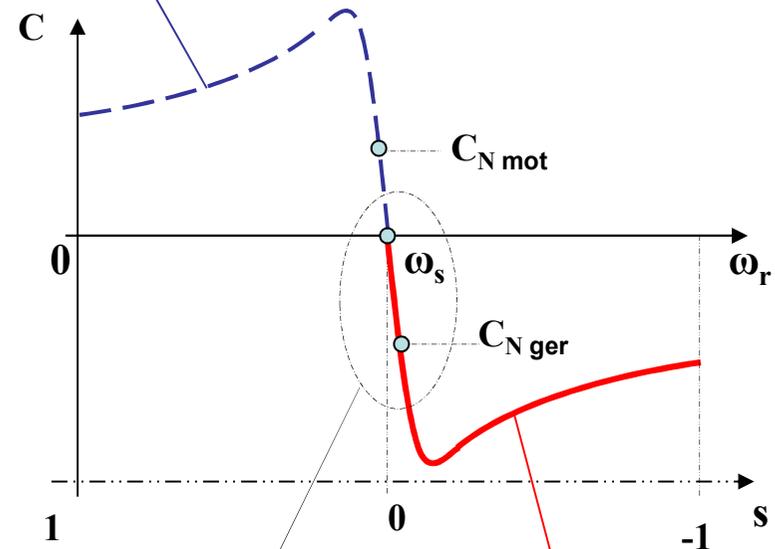
**POTÊNCIA REATIVA DE MAGNETIZAÇÃO PARA FORMAÇÃO DO
CAMPO GIRANTE SEMPRE ABSORVIDA DA REDE**

**MÁQUINA ASSÍNCRONA SÓ INJETA POTÊNCIA ATIVA NA REDE
ENERGIZADA**

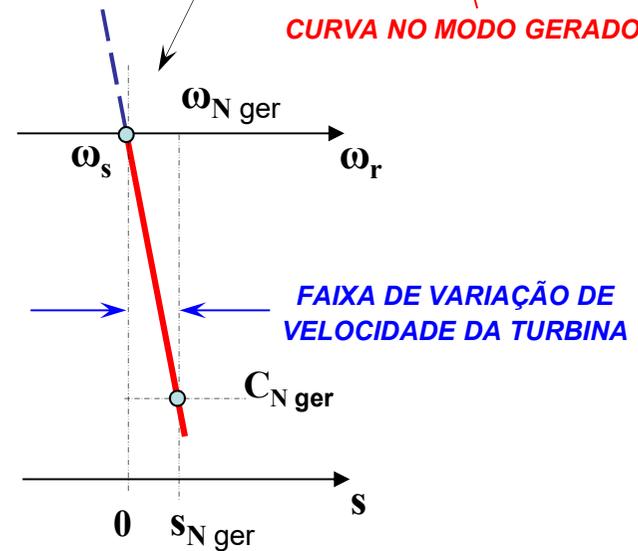
FAIXA DE ESCORREGAMENTO INERENTE É PEQUENA

“DISPENSA” O USO DE REGULADOR DE VELOCIDADE E TENSÃO

CURVA NO MODO MOTOR



CURVA NO MODO GERADOR



ASPECTOS PARTICULARES DO USO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA NO MODO GERADOR

OPERAÇÃO NO MODO GERADOR PODE SER OBTIDA INDISTINTAMENTE COM A MÁQUINA DE ROTOR EM GAIOLA OU COM A MÁQUINA COM ROTOR DE ANÉIS

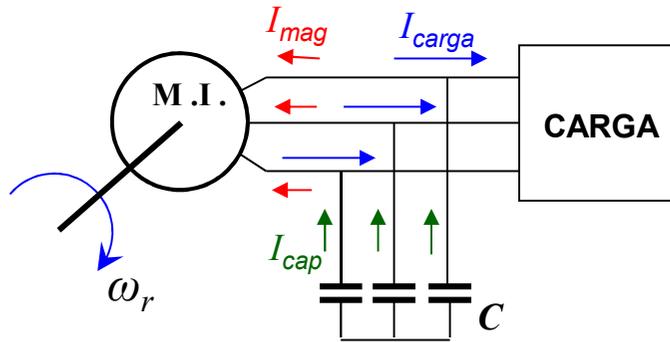
ESCORREGAMENTO NOMINAL É EM GERAL PEQUENO (1 A 5 %), TORNANDO LIMITADA A EXCURSÃO DE VELOCIDADE DA TURBINA

EM POTÊNCIAS MÉDIAS E GRANDES, PARA MELHOR APROVEITAMENTO DA POTÊNCIA MECÂNICA DA TURBINA (ESPECIALMENTE A EÓLICA), É NECESSÁRIO AMPLIAR A FAIXA DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADES

AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE ROTAÇÃO É POSSÍVEL COM O GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR DE ANÉIS, ASSOCIADO A CONVERSOR ESTÁTICO DE FREQUÊNCIA NO CIRCUITO DO ROTOR PARA RECUPERAÇÃO DA POTÊNCIA DE ESCORREGAMENTO → POSSIBILIDADE DE OPERAÇÃO SUB-SÍNCRONA E SUPER-SÍNCRONA → POSSIBILIDADE AINDA DE FORNECIMENTO DE REATIVOS PELO GERADOR ATRAVÉS DE CONTROLE ADEQUADO DO CONVERSOR ROTÓRICO

EM PEQUENAS POTÊNCIAS É POSSÍVEL O USO INDEPENDENTE DA REDE ENERGIZADA, MEDIANTE EXCITAÇÃO POR MEIO DE CAPACITORES, PARA O FORNECIMENTO DA POTÊNCIA REATIVA DE MAGNETIZAÇÃO REQUERIDA PARA FORMAR O CAMPO GIRANTE NO ENTREFERRO → EM GERAL USO DA MÁQUINA COM ROTOR DE GAIOLA

GERADOR DE INDUÇÃO INDEPENDENTE DA REDE ENERGIZADA → EM GERAL DE PEQUENA POTÊNCIA



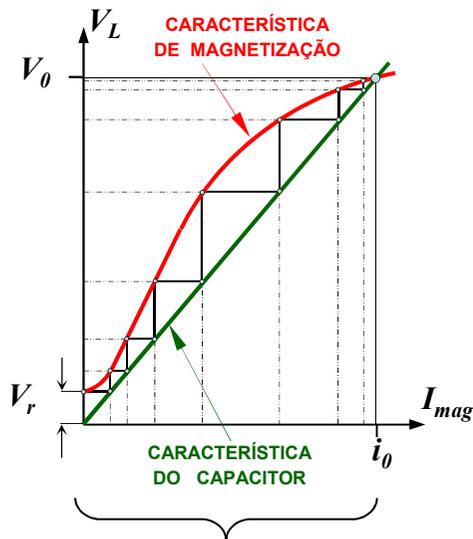
BANCO DE CAPACITORES PARA A MAGNETIZAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

→ $Q_{\text{REATIVA CAP}} = Q_{\text{REATIVA DE EXCITAÇÃO}}$ → **GARANTE TENSÃO NOMINAL EM VAZIO**

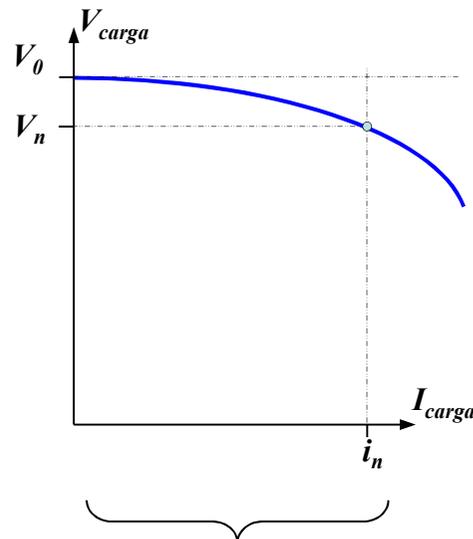
REMANENTE DE TENSÃO NA MÁQUINA PARA INICIAR O ESCORVAMENTO → REQUER ALIMENTAÇÃO PRÉVIA COMO MOTOR → PRODUZ MAGNETISMO RESIDUAL NO ROTOR

TENSÃO VARIA COM A CARGA, SEM POSSIBILIDADE DE AJUSTE → INCLUSÃO DE MAIS CAPACITORES CORRIGE PARCIALMENTE O NÍVEL DE TENSÃO EM CARGA

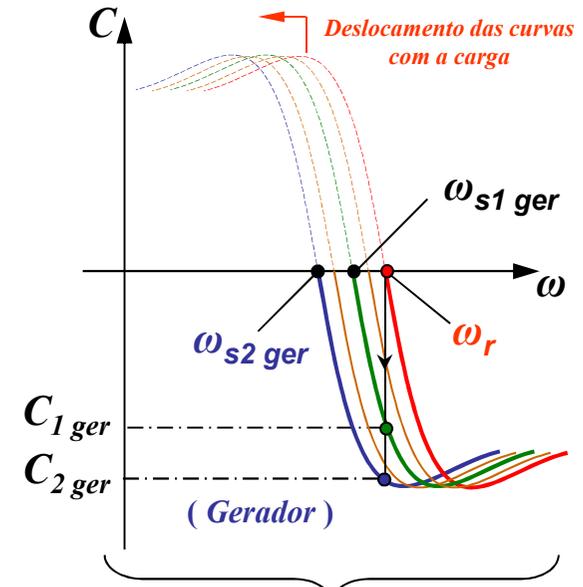
FREQÜÊNCIA VARIA COM A CARGA, PARA ROTAÇÃO DO EIXO CONSTANTE, SEM POSSIBILIDADE DE AJUSTE → DESLOCAMENTO DAS CURVAS IMPLICAM EM DIFERENTES ω_s



ESCORVAMENTO OU AUTO-EXCITAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO



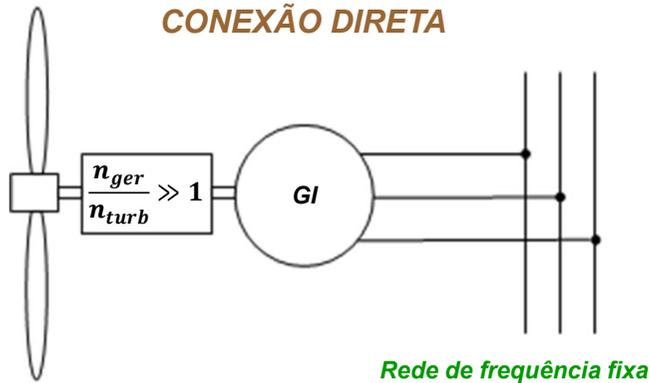
VARIAÇÃO DA TENSÃO COM A CARGA DO GERADOR DE INDUÇÃO



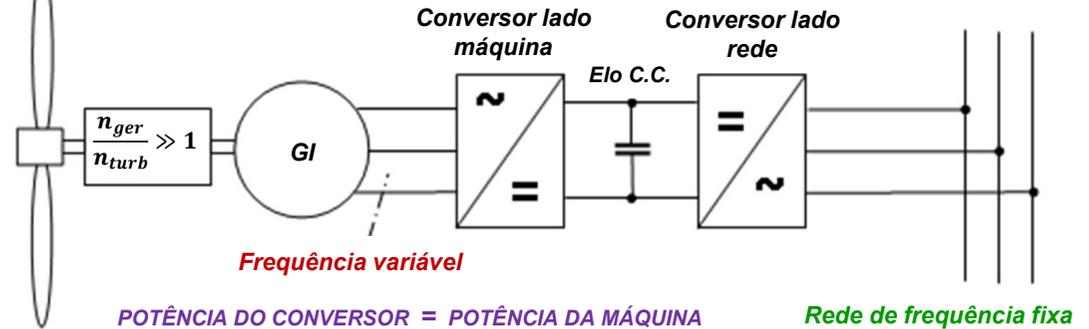
VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA COM A CARGA DO GERADOR DE INDUÇÃO

GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À REDE – APLICAÇÃO TÍPICA EM GERAÇÃO EÓLICA

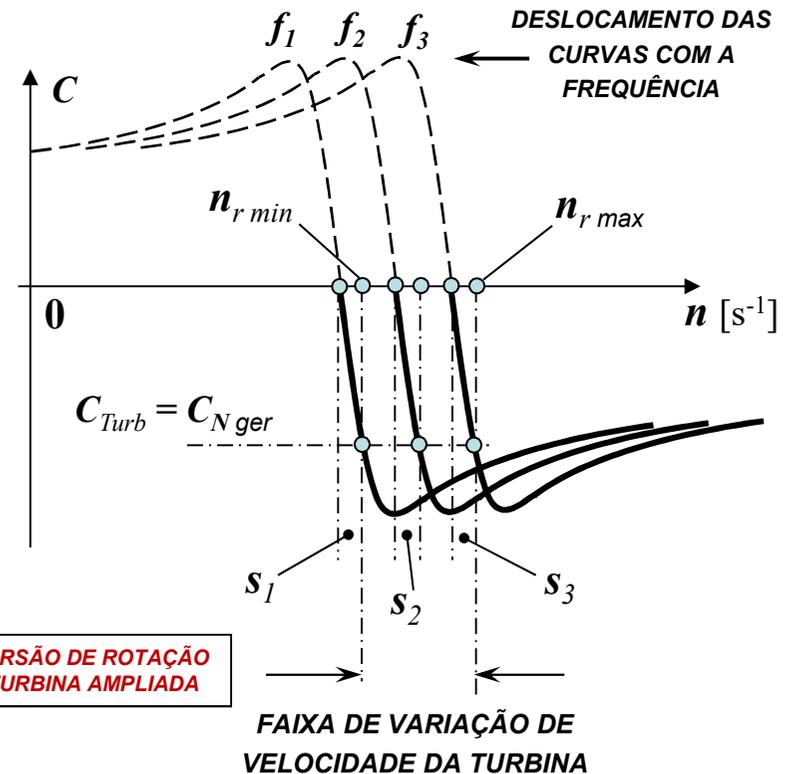
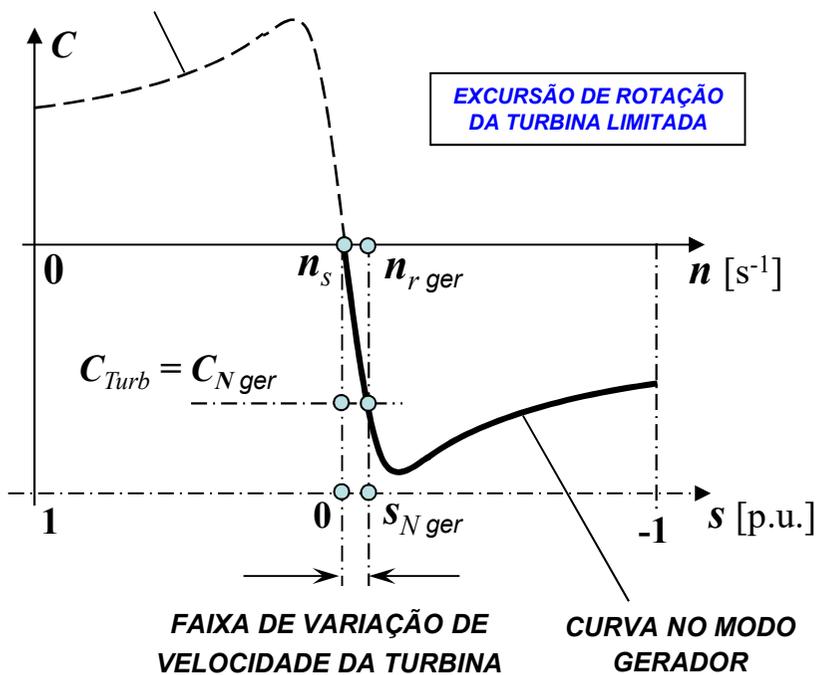
CONEXÃO DIRETA

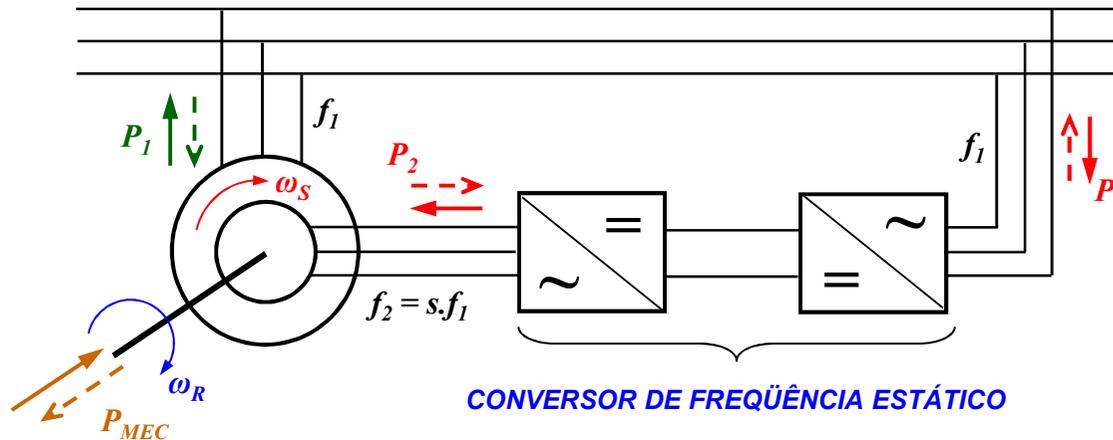


CONEXÃO ATRAVÉS DE CONVERSOR BIDIRECIONAL



CURVA NO MODO MOTOR



GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À REDE ENERGIZADA → RECUPERAÇÃO DA POTÊNCIA DE ESCORREGAMENTO

CONFIGURAÇÃO OBTIDA COM MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ANÉIS (ROTOR BOBINADO)

GERADOR COMPOSTO DE MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA (Usualmente referido como DFIG – “Doubly-Fed Induction Generator”)

CONVERSOR ESTÁTICO ALIMENTA CIRCUITO DO ROTOR COM FREQUÊNCIA AJUSTÁVEL, DIFERENTE DA FREQUÊNCIA DA REDE

POSSIBILITA OPERAÇÃO COM ELEVADOS NÍVEIS DE ESCORREGAMENTO, TÍPICAMENTE DE +30% A -30% (+0,3 > s > -0,3)

POTÊNCIA DO CONVERSOR = s . POTÊNCIA DA MÁQUINA

RELAÇÕES CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA:

ESTATOR ALIMENTADO A PARTIR DA REDE, COM FREQUÊNCIA f_1 → CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO COM VELOCIDADE ω_S (Em relação ao estator)

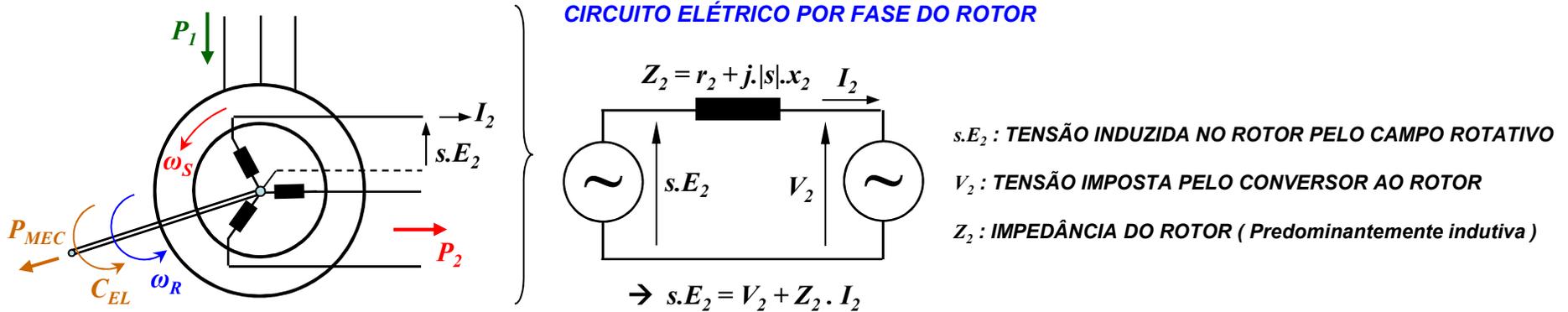
ROTOR ALIMENTADO A PARTIR DO CONVERSOR, COM FREQUÊNCIA IMPOSTA $f_2 = s \cdot f_1$ → CAMPO ROTATIVO DO ROTOR COM VELOCIDADE $s \cdot \omega_S$ (Em relação ao rotor)

INTERAÇÃO DOS CAMPOS É SÍNCRONA → ROTOR OPERA COM VELOCIDADE RIGOROSA, FIXADA EM $\omega_R = \omega_S - s \cdot \omega_S = (1 - s) \cdot \omega_S$

$$\rightarrow s = (\omega_S - \omega_R) / \omega_S \rightarrow P_2 = s \cdot P_1 \rightarrow P_{MEC} = (1 - s) \cdot P_1 \rightarrow P_1 = P_{MEC} + P_2$$

NESSA CONFIGURAÇÃO, A MÁQUINA A RIGOR OPERA DE FORMA SÍNCRONA, COM VELOCIDADE NO EIXO $\omega_R \neq \omega_S$

MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA → CARACTERIZAÇÃO DOS MODOS DE OPERAÇÃO

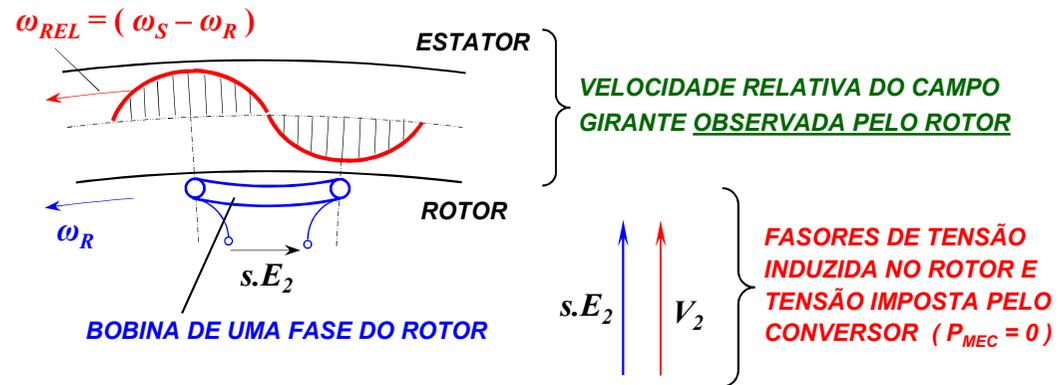
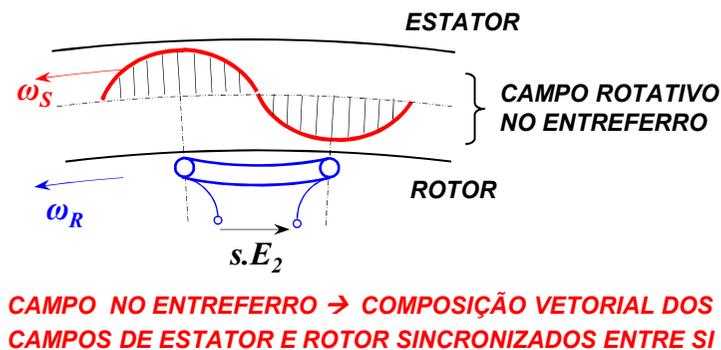


CONVENÇÕES PARA EFEITO DE ANÁLISE:

ROTOR: "FONTE" → $P_2 > 0$: POTÊNCIA ATIVA FORNECIDA PELO ROTOR - ($P_2 < 0$: potência absorvida pelo rotor)

ESTATOR: "RECEPTOR" → $P_1 > 0$: POTÊNCIA ATIVA ABSORVIDA PELO ESTATOR - ($P_1 < 0$: potência fornecida pelo estator)

EIXO: "MOTOR" → $P_{MEC} > 0$: POTÊNCIA MECÂNICA EXTRAÍDA DO EIXO – "CARGA" - ($P_{MEC} < 0$: potência injetada no eixo – "turbina")

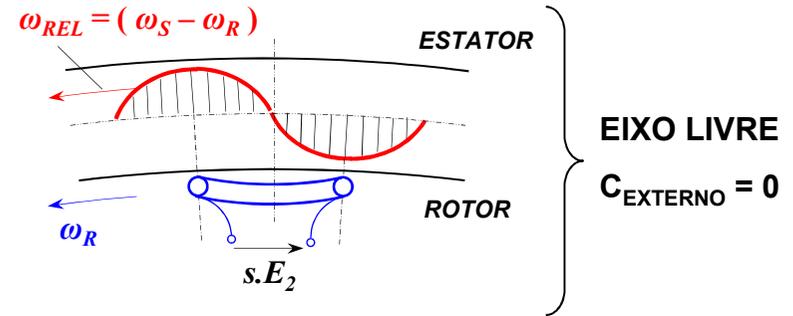


MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DUPLAMENTE ALIMENTADA

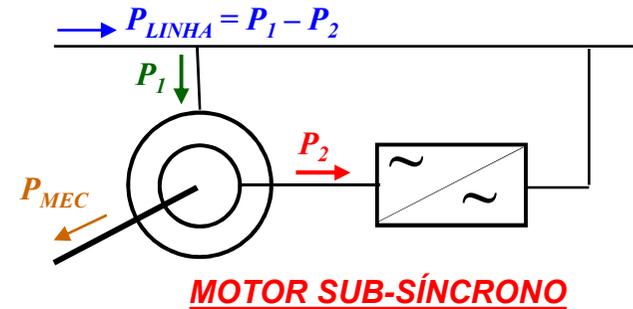
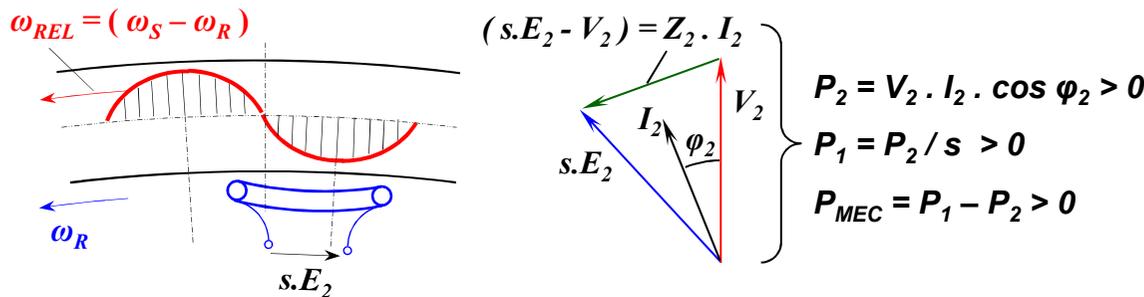
OPERAÇÃO SUB-SÍNCRONA: $\omega_R < \omega_S - s > 0$

→ ω_{REL} NA MESMA DIREÇÃO DE ω_R

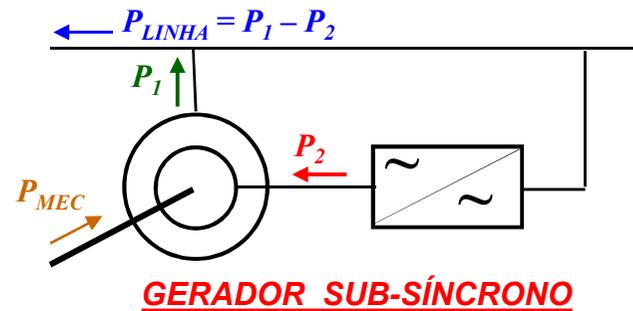
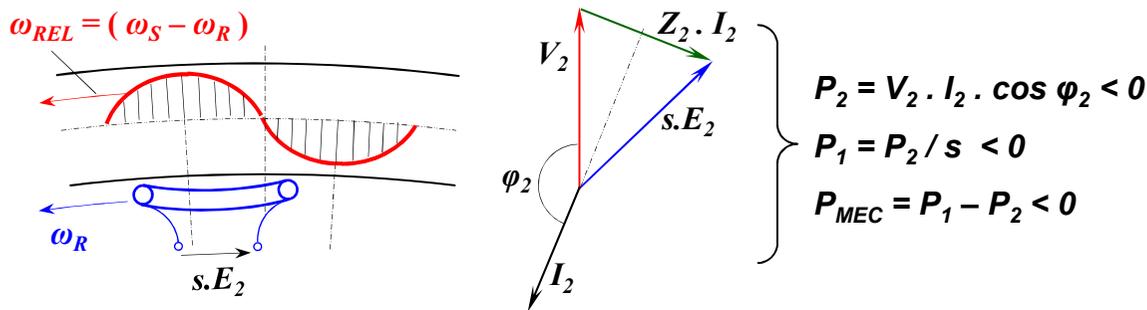
→ $P_2 = s.P_1 \rightarrow P_{MEC} = (1-s).P_1 \rightarrow P_{MEC} < P_1 \rightarrow P_{MEC} = (P_1 - P_2)$



ROTOR RETARDADO → CARGA APLICADA AO EIXO → $s.E_2$ AVANÇA EM RELAÇÃO A V_2



ROTOR AVANÇADO → TURBINA APLICADA AO EIXO → $s.E_2$ ATRASA EM RELAÇÃO A V_2

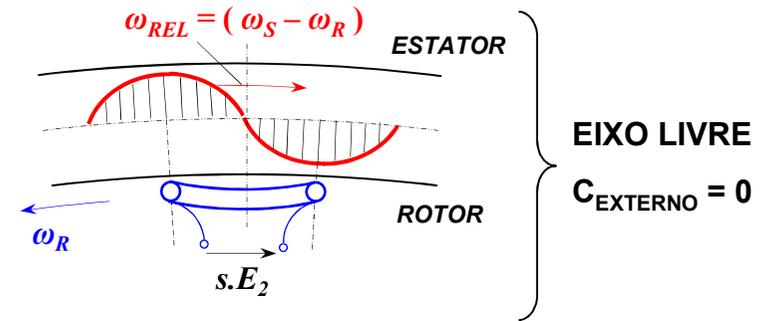


MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DUPLAMENTE ALIMENTADA

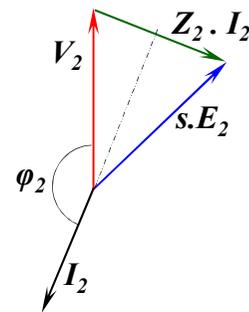
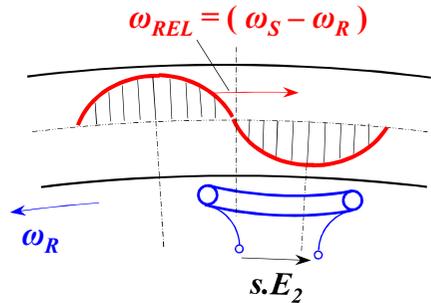
OPERAÇÃO SUPER-SÍNCRONA: $\omega_R > \omega_S - s < 0$

→ ω_{REL} NA DIREÇÃO OPOSTA DE ω_R

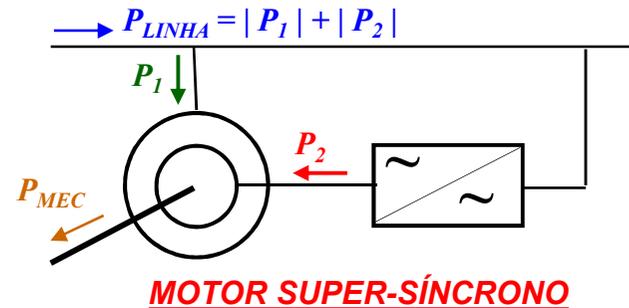
→ $P_2 = s \cdot P_1 \rightarrow P_{MEC} = (1-s) \cdot P_1 \rightarrow P_{MEC} > P_1 \rightarrow P_{MEC} = (P_1 - P_2)$



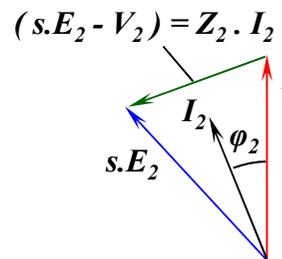
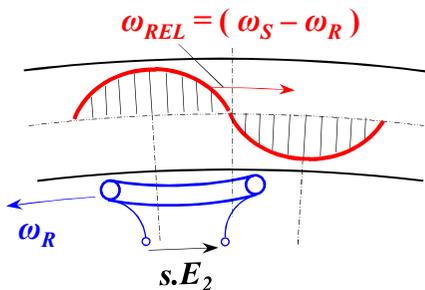
ROTOR RETARDADO → CARGA APLICADA AO EIXO → $s \cdot E_2$ ATRASADA EM RELAÇÃO A V_2



$$\left. \begin{aligned} P_2 &= V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 < 0 \\ P_1 &= P_2 / s > 0 \\ P_{MEC} &= P_1 - P_2 > 0 \end{aligned} \right\}$$



ROTOR AVANÇADO → TURBINA APLICADA AO EIXO → $s \cdot E_2$ AVANÇA EM RELAÇÃO A V_2



$$\left. \begin{aligned} P_2 &= V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 > 0 \\ P_1 &= P_2 / s < 0 \\ P_{MEC} &= P_1 - P_2 < 0 \end{aligned} \right\}$$

