



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO E CONTROLE

RÔMULO LEMOS BULHÕES

**CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA EM UM GERADOR DE INDUÇÃO
DUPLAMENTE ALIMENTADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE CONTROLE
VETORIAL POR ORIENTAÇÃO DO FLUXO DE ESTATOR**

Salvador

2014

RÔMULO LEMOS BULHÕES

**CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA EM UM GERADOR DE INDUÇÃO
DUPLAMENTE ALIMENTADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE CONTROLE
VETORIAL POR ORIENTAÇÃO DO FLUXO DE ESTATOR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de especialização em Automação e Controle da Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec como requisito final para a obtenção do título de especialista nessa área.

Orientador: Prof. Dr. Eudemario de Souza Santana

Salvador

2014

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI - CIMATEC

B933c Bulhões, Rômulo Lemos

Controle de potência reativa em um gerador de indução duplamente alimentado utilizando a técnica de controle vetorial por orientação do fluxo de estator / Rômulo Lemos Bulhões – Salvador, 2014.

91 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Eudemario Souza de Santana.

Monografia (Especialização em Automação, Controle e Robótica) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia Senai - CIMATEC, Salvador, 2014.

Inclui referências bibliográficas.

1. Turbina eólica. 2. GIDA - Gerador de Indução Duplamente Alimentado. 3. Controle vetorial 4. Fator de potência. 5. Fluxo de estator. I. Faculdade de Tecnologia SENAI – CIMATEC. II. Santana, Eudemario Souza de. III. Título.

CDD: 621.31

RÔMULO LEMOS BULHÕES

CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA EM UM GERADOR DE INDUÇÃO
DUPLAMENTE ALIMENTADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE CONTROLE
VETORIAL POR ORIENTAÇÃO DO FLUXO DE ESTATOR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de especialização em Automação e Controle da Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec como requisito final para a obtenção do título de especialista nessa área.

Aprovada em de de 2014.

Banca Examinadora

Eudemario de Souza Santana – Orientador. _____

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

Taniel Silva Franklin. _____

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

Frederico Ramos Cesario. _____

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

AGRADECIMENTO

A Deus por ter me dado a oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos meus pais, pelo apoio indispensável e amor incondicional.

A Eudemario, pelos ensinamentos e conselhos prestados.

RESUMO

A geração de eletricidade através da energia eólica surge como uma das possíveis soluções para atender à crescente demanda por energia elétrica no país. Além da construção de novas usinas geradoras, deve-se melhorar a eficiência daquelas que já estão em operação, com vistas a mitigar as perdas energéticas e, conseqüentemente, as perdas econômicas. Nesse sentido, o presente trabalho propõe-se a analisar o controle de potência reativa do gerador de indução duplamente alimentado (GIDA), tipo de equipamento e topologia que são utilizados em turbinas eólicas. Inicialmente, é feita uma contextualização e fundamentação teórica sobre esse tema. Por último, são realizadas simulações de diferentes situações e apresentação dos resultados. Para a realização do controle do fator de potência, utilizou-se a estratégia de controle por orientação do fluxo de estator. Essa técnica possibilita o desacoplamento das potências ativa e reativa da máquina. O ambiente de simulação escolhido foi a ferramenta Simulink® do Matlab e o controlador utilizado para essa atividade foi um PI.

Palavras-chave: Turbina eólica, GIDA, Controle Vetorial, Fator de Potência, Fluxo de estator.

ABSTRACT

The generation of electricity through wind power emerges as one of the possible solutions to meet the growing demand for electricity in the country. Besides the construction of new power plants, it is necessary to improve the efficiency of those who are already in operation, with the aim of mitigating energy losses and hence economic losses. In this sense, this paper proposes to analyze the control of reactive power double-fed induction generator (DFIG), type of equipment and topology that are used in wind turbines. Initially, it is made a contextualization and the theoretical background is given. Finally, simulations of different situations and presentation of results are performed. For accomplishing the power factor control, it is used the control strategy of field oriented control of stator flux. This technique enables the decoupling of active and reactive power of the machine. The simulation environment chosen was the toolbox Simulink® of Matlab and the controller used for this activity was a PI.

Keywords: Wind turbine, DFIG, Field Oriented Control, Power Factor, Stator Flux.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE SÍMBOLOS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 APRESENTAÇÃO/ CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	18
1.3 PROPOSTA DO TCC.....	19
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2 COMPONENTES E TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS.....	23
2.3 MODELO SIMPLIFICADO DA TURBINA EÓLICA.....	27
2.4 O GIDA.....	33
2.5 FOC NO GIDA	35
2.5.1 Orientação do fluxo magnético de rotor	35
2.5.2 Orientação do fluxo magnético de entreferro	37
2.5.3 Orientação do fluxo magnético de estator	37
2.5.3.1 Controle das Potências Ativa e Reativa	38
2.6 GIDA NAS VELOCIDADES SUBSÍNCRONA, SÍNCRONA E SUPERSÍNCRONA	49
2.7 DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DO TCC	51
2.8 RESUMO DO CAPÍTULO	51
3 SIMULAÇÃO	53
3.1 INTRODUÇÃO	53
3.2 DIAGRAMA DE BLOCOS DETALHADO DA PROPOSTA.....	53
3.3 CENÁRIOS SIMULADOS	58
3.4 RESUMO DO CAPÍTULO	58
4 RESULTADOS	59
4.1 INTRODUÇÃO	59
4.2 CENÁRIO 1 - Potência de eixo constante com $FP=0.92$ indutivo e depois capacitivo.....	59
4.3 CENÁRIO 2 – Potência decrescente de eixo e depois constante	64
4.3.1 Fator de potência 0.92 capacitivo	65
4.3.2 Com fator de potência 0.92 indutivo	71
4.4 CENÁRIO 3 – Potência constante com rajada de vento, após certo instante, e fator de potência 0,92 indutivo.....	80
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	86
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	87
APÊNDICE A- Parâmetros do Gerador de Indução	88

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução da Capacidade instalada no mundo para produção de energia eólica.....	17
Figura 2: Componentes de uma turbina eólica.....	23
Figura 3: Turbina Eólica à velocidade fixa com gerador de indução.....	25
Figura 4: Turbina eólica à velocidade variável com gerador (síncrono ou de indução) multipolar com conversor estático de potência no estator.....	26
Figura 5: Coeficiente de potência em função da velocidade específica.....	29
Figura 6: Turbina Eólica - Ângulos de passo, ataque e plano de rotação.....	29
Figura 7: Coeficiente de conjugado em função da velocidade específica.....	30
Figura 8: Modelo de eixos rígidos para o sistema turbina-gerador.....	30
Figura 9: Malha de controle de potência do estator.....	34
Figura 10: Orientação do fluxo magnético de rotor.....	36
Figura 11: Circuito equivalente do eixo-d da máquina de indução.....	43
Figura 12: Circuito equivalente do eixo-q da máquina de indução.....	43
Figura 13 – Controlador de corrente i_{rq} e termo de compensação.....	45
Figura 14 – Controlador de corrente i_{rd} e termo de compensação.....	45
Figura 15: Malha de controle de corrente I_{rq}	46
Figura 16: Malha de controle de corrente I_{rd}	46
Figura 17: Malha de controle de velocidade.....	48
Figura 18: Modo de operação subsíncrono do GIDA.....	50
Figura 19: Modo de operação supersíncrono do GIDA.....	50
Figura 20: Esquema completo do controle de potência reativa do estator.....	57
Figura 21: Potência de eixo constante e velocidade de giro do rotor.....	59
Figura 22: Correntes rotóricas – Potência de eixo constante.....	60
Figura 23: Fator de potência x Fator de potência de referência – Potência de eixo constante.....	61
Figura 24: Potência Reativa do estator x Potência reativa desejada – Potência de eixo constante.....	62
Figura 25: Potência de eixo constante - Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} – Fator de Potência Indutivo (a) Início; (b) Final.....	62
Figura 26: Potência de eixo constante - Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} – Fator de potência capacitivo (a) Início (b) Final.....	62
Figura 27: Potência Reativa x Corrente de eixo direto I_{rd} - Potência de eixo constante.....	63
Figura 28: Potência Ativa x Corrente de eixo direto I_{rq} – Potência de eixo constante.....	63
Figura 29: Correntes de eixo direto I_{rd} x I_{rdref}	64
Figura 30: Potência decrescente de eixo e velocidade de giro do rotor.....	65
Figura 31: Correntes rotóricas entre 5 e 20 segundos.....	66
Figura 32: Correntes rotóricas entre 20 e 30 segundos.....	66

Figura 33: Potência decrescente de eixo – Fator de Potência mensurado x Fator de Potência de referência.....	67
Figura 34: Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} : (a) Início; (b) Final – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 capacitivo	68
Figura 35: Potência Reativa do Estator x Potência Reativa de Referência do Estator (0,92 Capacitivo) – Potência de eixo decrescente e depois constante.....	68
Figura 36: Potência reativa do estator	69
Figura 37: Potência ativa do estator x Corrente de eixo em quadratura do rotor – FP 0,92 capacitivo	69
Figura 38: Correntes de eixo direto mensurada do rotor x Corrente de eixo de direto de referência do rotor – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 capacitivo.....	70
Figura 39: Potência decrescente de eixo e depois constante x velocidade de giro do rotor – FP 0,92 Indutivo	71
Figura 40: Correntes rotóricas – Potência decrescente – FP 0,92 Indutivo	72
Figura 41: Correntes rotóricas – Potência de eixo constante - FP 0,92 Indutivo	72
Figura 42: Fator de Potência mensurado x Fator de Potência de Referência – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo	73
Figura 43: Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} : (a) Início; (b) Final – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 indutivo	74
Figura 44: Potência reativa mensurada x Potência reativa de referência - Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo.....	74
Figura 45: Potência Reativa x Corrente de eixo direto do rotor – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo.....	75
Figura 46: Potência Ativa x Corrente de eixo em quadratura do rotor – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo.....	75
Figura 47: Corrente de eixo direto do rotor mensurada x Corrente de eixo direto do rotor de referência – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo ..	76
Figura 48: Potência decrescente de eixo e depois constante x velocidade de giro do rotor – FP unitário.....	76
Figura 49: Correntes rotóricas – Potência decrescente – FP unitário	77
Figura 50: Correntes rotóricas – Potência constante – FP unitário	77
Figura 51: Fator de potência mensurado x Fator de Potência de referência – Potência variável de eixo e depois constante - FP unitário	78
Figura 52: Potência Reativa mensurada x Potência Reativa de referência – Potência reativa e depois constante – FP unitário.....	78
Figura 53: Potência reativa do estator x Corrente de eixo direto do rotor – Potência decrescente e depois constante – FP unitário	79
Figura 54: Potência ativa do estator x Corrente de eixo em quadratura do rotor – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP unitário.....	79
Figura 55: Corrente mensurada de eixo direto do rotor x Corrente de referência de eixo direto do rotor – Potência decrescente e depois constante – FP unitário	80

Figura 56: Potência externa x Velocidade angular do rotor – Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante - FP 0,92 Indutivo.....	81
Figura 57: Fator de potência do estator x Fator de Potência de Referência – Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo.....	82
Figura 58: Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} : (a) Início; (b) Final – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 indutivo.....	82
Figura 59: Potência reativa do estator x Potência Reativa de Referência – Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo.....	83
Figura 60: Potência Reativa do Estator x Corrente de eixo direto do rotor - Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo.....	83
Figura 61: Potência ativa do estator x Corrente de eixo em quadratura do rotor - Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo.....	84
Figura 62: Correntes de eixo direto do rotor de referência e medida - Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

P_w = Potência disponível no vento

ρ = Densidade do vento

A = Área varrida pelo rotor da turbina

v_w = Velocidade do vento incidente, perpendicular ao plano de rotação

$P_{t_{max}}$ = Potência máxima extraída do vento pela turbina eólica

C_p = Coeficiente de potência ou rendimento aerodinâmico da turbina

C_q = Coeficiente de conjugado ou torque da turbina

λ = Velocidade específica da turbina

R = Raio do rotor da turbina medido na ponta da pá

V_{tg} = Velocidade tangencial da turbina na ponta da pá

w_n = Velocidade angular nominal do eixo do rotor

w_t = Velocidade angular do eixo da turbina

w_m = Velocidade angular do eixo do rotor

w_s = Velocidade angular na frequência da rede elétrica

w_r = Velocidade angular do fluxo magnético de rotor

w_{slip} = Velocidade angular elétrica de escorregamento do rotor do gerador

K_{tr} = Relação de transmissão de velocidades da caixa de engrenagem da turbina

K_p = Ganho proporcional do controlador

FP_n = Fator de potência nominal do gerador

P_r = Potência de perdas rotacionais

P_m = Potência mecânica do rotor

P_{em} = Potência eletromecânica do rotor

P_{eixo} = Potência no eixo do rotor

P_{rot} = Perdas Rotóricas

L_m = Indutância mútua do gerador

L_r = Indutância do rotor referida ao lado do estator

l_r = Indutância própria do rotor

L_s = Indutância própria do estator

L_{ls} = Indutância de dispersão do estator

L_{lr} = Indutância de dispersão do rotor referido ao estator

I_{sd} = Corrente do estator no eixo direto síncrono em regime permanente

I_{sq} = Corrente do estator no eixo em quadratura síncrono em regime permanente

I_{rd} = Corrente do rotor no eixo direto síncrono em regime permanente

I_{rq} = Corrente do rotor no eixo em quadratura síncrono em regime permanente

I_{ms} = Corrente de magnetização da máquina de indução

J = Constante de inércia do gerador

K_{tr} = Multiplicador de velocidade

p = Número de polos do gerador

s = Escorregamento da máquina de indução

T_t = Torque no eixo na turbina eólica

T_L = Torque transmitido ao eixo do gerador pela turbina eólica

T_n = Torque mecânico nominal do gerador de indução

T_r = Torque de perdas rotacionais

T_m = Torque mecânico do gerador de indução

σ = Coeficiente ou fator de dispersão do fluxo magnético total da máquina de indução

ψ_s = Módulo do fluxo magnético de estator

ψ_r = Módulo do fluxo magnético de rotor

ψ_g = Módulo do fluxo magnético de entreferro

$\psi_{s\alpha}; \psi_{s\beta}$ = Módulo do fluxo magnético de estator nos eixos α e β estacionários, respectivamente

$\psi_{sd}; \psi_{sq}$ = Módulo do fluxo magnético de estator nos eixos direto e em quadratura, respectivamente, do sistema síncrono de referência

$\psi_{rd}; \psi_{rq}$ = Módulo do fluxo magnético de rotor nos eixos direto e em quadratura, respectivamente, do sistema síncrono de referência

$\overline{\psi}_{s,\alpha\beta}$ = Vetor fluxo magnético de estator no sistema de eixos estacionários $\alpha\beta$

$\overline{\psi}_{r,\alpha\beta}$ = Vetor fluxo magnético de rotor no sistema de eixos estacionários $\alpha\beta$

$\overline{\psi}_{s,dq}$ = Vetor fluxo magnético de estator no sistema de eixos d-q síncrono

$\overline{\psi}_{r,dq}$ = Vetor fluxo magnético de rotor no sistema de eixos d-q síncrono

$\overline{\psi}_{g,dq}$ = Vetor fluxo magnético de entreferro no sistema de eixos d-q síncrono

V_s = Módulo da tensão no estator

$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$ = Componentes instantâneos de tensão em relação aos eixos estacionários $\alpha\beta$

δ_s = Posição espacial instantânea do fluxo magnético de estator em relação ao eixo α do sistema de coordenadas estacionário.

δ_r = Posição espacial instantânea do fluxo magnético de rotor em relação ao eixo α do sistema de coordenadas estacionário.

i_{sq} = Valor instantâneo da corrente de estator no eixo em quadratura do sistema síncrono

p_s, q_s = Valores instantâneos das potências ativa e reativa, respectivamente

P_s = Potência ativa em regime permanente nos terminais de estator do gerador de indução

P_r = Potência ativa em regime permanente nos terminais de rotor do gerador de indução

Q_s = Potência reativa nos terminais de estator do gerador de indução

Q_{sref} = Potência reativa de referência nos terminais de estator do gerador

Q_r = Potência reativa nos terminais de rotor do gerador de indução

r_s = Resistência do estator

r_r = Resistência do rotor

V_n = Tensão nominal de estator

V_{sd} = Tensão em regime permanente do estator no eixo direto síncrono

V_{sq} = Tensão em regime permanente do estator no eixo em quadratura síncrono

V_{rd} = Tensão em regime permanente do rotor no eixo direto síncrono

V_{rq} = Tensão em regime permanente do rotor no eixo em quadratura síncrono

I_{sd} = Corrente em regime permanente do estator no eixo direto síncrono

I_{sq} = Corrente em regime permanente do estator no eixo em quadratura síncrono

I_{rd} = Corrente em regime permanente do rotor no eixo direto síncrono

I_{rq} = Corrente em regime permanente do rotor no eixo em quadratura síncrono

i_{rdref} = Corrente de referência do rotor de eixo direto do sistema síncrono

$i_{sd}; i_{sq}$ = Valores instantâneos das correntes de estator nos eixos direto e em quadratura do sistema síncrono, respectivamente

$i_{s\alpha}; i_{s\beta}$ = Valores instantâneos das correntes de estator nos eixos α e β estacionários, respectivamente

$i_{ra}; i_{rb}; i_{rc}$ = Valores instantâneos das correntes **a**, **b** e **c**, do rotor, respectivamente

$i_{sa}; i_{sb}; i_{sc}$ = Valores instantâneos das correntes de linha **a**, **b** e **c**, do estator, respectivamente

$i_{r\alpha}; i_{r\beta}$ = Valores instantâneos das correntes de rotor referidos ao estator nos eixos α e β estacionários, respectivamente

$i'_{rd}; i'_{rq}$ = Valores instantâneos das correntes de rotor referidos ao estator nos eixos direto e em quadratura do sistema síncrono, respectivamente

$\bar{i}_{s,dq}$ = Vetor corrente de estator nos eixos d-q do sistema síncrono

$\bar{i}_{r,dq}$ = Vetor corrente de rotor nos eixos d-q do sistema síncrono

$\bar{i}'_{r,dq}$ = Vetor corrente de rotor nos eixos d-q do sistema síncrono referidos ao estator

$v_{s,ab}; v_{s,bc}$ = Valores instantâneos da tensão entre linhas a-b e b-c da rede, respectivamente

$v_{s\alpha}; v_{s\beta}$ = Valores instantâneos da tensão dos eixos α e β estacionários, respectivamente

$v_{sd}; v_{sq}$ = Valores instantâneos das tensões de eixo direto e em quadratura do estator, respectivamente

$v'_{rd}; v'_{rq}$ = Valores instantâneos das tensões de eixo direto e em quadratura do rotor, respectivamente, referidos ao estator

$e_{rd}; e_{rq}$ = Força eletromotriz no rotor de eixo direto e em quadratura, respectivamente

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CLM – Conversor ao lado da rede

CDP – Controle direto de potência

CLR – Conversor ao lado da máquina

CDT – Controle direto de torque

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

F.E.M – Força eletromotriz

FOC – *Field Oriented Control* – Controle por orientação do fluxo

FP – Fator de Potência

GIDA – Gerador de indução duplamente alimentado

GSIP – Gerador Síncrono a ímãs permanente

TDH – Taxa de distorção harmônica

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO/ CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia que se encontra em suas diversas formas na natureza é chamada de energia primária. Dentre essas, podem-se citar a energia eólica, solar, hidráulica, das marés, dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural), geotérmica e nuclear. Essa energia pode ser classificada como renovável ou não renovável, sendo a primeira aquela cuja velocidade de reposição natural é¹ ser superior à sua utilização e a segunda aquela na qual a velocidade de reposição natural é inferior à sua utilização (velocidade de reposição inferior à sua utilização). A partir do momento em que o homem passa a intervir nessa forma de energia, transformando-a em outra, essa última é chamada de energia secundária, a exemplo da energia elétrica. (SILVA, K. F. 2006).

Pode-se dizer que a matriz de energia elétrica mundial tem passado por um processo de mudança, devido ao crescimento da demanda, como o aumento populacional e o surgimento de novas indústrias. Paralelamente, o crescimento da consciência ambiental das pessoas tem aumentado, e por isso tem-se procurado produzir energia elétrica de forma limpa, com o objetivo de ter pouca ou nenhuma produção de gases ou resíduos, e eficiente, visando o baixo custo de produção e um melhor aproveitamento energético. Por conta dos resíduos e dos gases que algumas fontes energéticas emitem, e principalmente por conta da escassez de alguns recursos em momentos de crises (é o caso da crise do petróleo, na década de 70), os países têm adotado medidas para suprirem as suas necessidades energéticas, através de fontes alternativas de energias elétricas (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

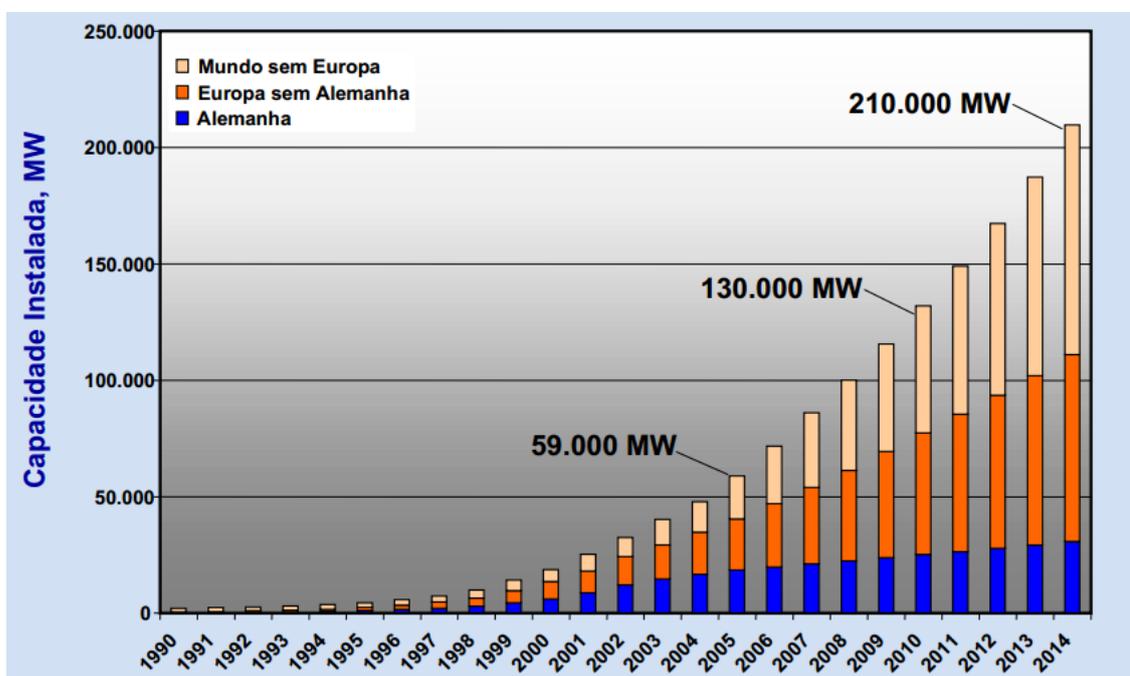
O aumento da demanda energética no país está relacionado com o crescimento econômico deste. Sabe-se, portanto, que a matriz energética é uma das bases que sustentam o desenvolvimento da economia, sendo esse um dos motivos pelo qual o governo brasileiro faz, através do Balanço Energético Nacional (BEN), uma análise anual do cenário energético no país, através do Balanço Energético

¹ A referência na qual o autor deste trabalho se baseia afirma que a velocidade de reposição é superior à sua utilização, porém isso é relativo. A produção de etanol oriunda da cana-de-açúcar, por exemplo, pode ter uma taxa de reposição inferior, caso o consumo seja maior.

Nacional (BEN). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE - 2012), o crescimento médio anual da demanda por energia elétrica no país, no período de 2012 a 2021, vai ser em torno de 4,5%, e a taxa de crescimento estimada do PIB brasileiro é de 4,7%, mostrando uma relação direta que dois parâmetros têm.

A energia eólica vem aumentando a sua participação no contexto atual, tanto no Brasil quanto no mundo. Os dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2013 mostram que a produção de eletricidade brasileira a partir da fonte eólica aumentou 86,7% em relação ao ano anterior, além de ter havido um aumento de 32,6% da potência instalada. Outro exemplo de país que busca ampliar a utilização da energia eólica é a Dinamarca, cuja representatividade dessa fonte primária é de 18% e cuja meta é ter uma participação de 50% da energia total (BEN, 2013). Segundo a Worldwatch Institute (2014), o consumo mundial de energia elétrica a partir da geração eólica aumentou 18% em 2012. A figura 1 ilustra a evolução da energia eólica no mundo, a partir de 1990 até 2014.

Figura 1: Evolução da Capacidade instalada no mundo para produção de energia eólica.



Fonte: "Perspectivas da Energia Eólica no Mundo e no Brasil" - Molly, 2006

Um dos motivos das fontes energéticas renováveis estarem aumentando as suas representatividades vem dos incentivos que os governos nacionais estão oferecendo. A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que é uma agência

normativa do governo brasileiro, aprovou em 2012 a resolução 482 que regulamenta as microgeração (menor ou igual a 100 kW) e minigeração (maior do que 100 kW e menor ou igual a 1MW) distribuídas. Com isso o consumidor pode “emprestar” energia às concessionárias, sendo abatida posteriormente nas contas de luz.

O Brasil vive riscos de “apagões” (FARIELLO, 2014) e algumas possíveis soluções para esse problema são o racionamento de energia e a expansão das usinas geradoras de energia elétrica no país. A primeira situação soluciona a questão do “apagão” no curto prazo, mas do ponto de vista econômico, não é a solução mais adequada, pois mina o potencial de crescimento do país, visto que, como já foi citado, o aumento da demanda energética está atrelado com a expansão da economia. Para o caso da expansão das fontes produtoras de energia, deve-se haver um planejamento para decidir em qual tipo de geração investir, visando um baixo custo operacional e de instalação, além de se buscar a produção limpa (que produz pouco ou nenhum gás ou resíduo) e renovável de energia elétrica.

Como forma de melhorar a eficiência das usinas geradoras no país, pode-se controlar o excedente reativo produtivo por estas, pois o excesso de energia reativa inviabiliza a plena utilização da capacidade instalada, compromete os níveis de tensão da rede elétrica e ocasionam perdas por efeito Joule (BULHÕES, 2011).

Analisando o cenário atual a nível mundial e nacional, consegue-se perceber que a energia eólica é uma das mais promissoras fontes de energia elétrica nos próximos anos. Além de se buscar o aumento dessas usinas no país e no mundo, devem-se tomar ações/medidas que consigam diminuir as perdas elétricas em toda a cadeia energética: geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica. Baseado na necessidade de se expandir as fontes geradoras de energia elétrica e de melhorar a eficiência energética destas, é necessário conhecer melhor as técnicas e as tecnologias existentes para a geração de energia eólica e descobrir quais são as mais adequadas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A organização desse trabalho consiste nos seguintes capítulos: Introdução, fundamentação teórica, simulação, resultados, considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

No capítulo introdutório, é feita uma breve contextualização do panorama da energia elétrica no cenário brasileiro e mundial, principalmente no que tange a área da energia eólica. Em seguida, descreve-se como os capítulos e os tópicos estão organizados e estruturados dentro do texto. Baseado nesta apresentação inicial, é mostrada a proposta desse trabalho de forma mais ampla. Por último, faz-se uma revisão bibliográfica sobre o tema.

O segundo capítulo consiste na fundamentação teórica do tema escolhido. Inicialmente, é feita uma introdução e em seguida é tratada a técnica de controle vetorial por orientação do fluxo de rotor, entreferro e estator (FOC – *Field Oriented Control*) aplicado ao gerador de indução duplamente alimentado (GIDA). Ainda neste capítulo, é feita a abordagem do GIDA nos regimes de operação subsíncrono, síncrono e supersíncrono. Após a fundamentação teórica, é descrita a proposta da monografia, apresentando as suas especificidades. Por último, o resumo do capítulo é exposto.

A terceira parte do trabalho, cujo tema é a simulação, consiste em: uma breve introdução da ferramenta utilizada, além de serem mostrados todo o passo a passo e esquemático utilizado para a realização das etapas. Além disso, serão descritos todos os cenários que foram utilizados para essa fase do trabalho, todas as condições impostas, bem como as suas simplificações. No final é feito um resumo do capítulo.

O capítulo 4 consiste nos resultados obtidos com a simulação. Inicialmente, é feita uma breve introdução e, em seguida, é apresentado o que foi obtido em cada cenário ou situação proposta. Por último, é feito um resumo dessa fase do trabalho, mostrando os principais pontos envolvidos.

No quinto capítulo, são feitas as considerações finais e apresentadas as sugestões para o trabalho futuros.

1.3 PROPOSTA DO TCC

A proposta desse trabalho é analisar o controle de potência reativa em um dos dispositivos de conversão de energia mecânica em elétrica mais utilizados em aerogeradores: o gerador de indução duplamente alimentado. Mais especificamente, tem-se como objetivo dessa monografia o estudo de uma técnica de controle de potência reativa empregando o princípio de orientação do fluxo de estator.

Além do que já foi exposto, vão ser analisados os comportamentos dos geradores de indução quando sujeitos a mudanças inesperadas na velocidade de giro ou no torque do eixo do rotor, necessários para entender a dinâmica do gerador quando este está acoplado a uma turbina eólica, situações em que ocorrem alterações abruptas ou suaves no regime de vento.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os GIDA são geradores com velocidade rotórica variável capazes de fornecer potência à rede elétrica com tensão e frequência constantes. Esta família de equipamentos (gerador à velocidade variável) possui como vantagem um melhor aproveitamento energético em relação aos geradores à velocidade fixa (YAO et al., 2009), além de outras como redução do estresse mecânico, dos ruídos produzidos (MÜLLER et al., 2002; YAO et al., 2009), diminuição das pulsações elétricas (*flicker*) e de torque e aumento da qualidade de energia fornecida à rede (MÜLLER et al., 2002).

Uma forma de utilizar um gerador à velocidade variável é conectando o conversor através dos terminais de estator. Esta forma de conexão possui algumas desvantagens em relação ao GIDA quanto ao uso de conversores eletrônicos de potência, pois neste último caso a potência do inversor e do seu filtro é da ordem de 1 p.u., o que torna o sistema mais caro e, no caso dos filtros, mais difícil de ser projetado. Além disso, a eficiência total torna-se comprometida, pois há perdas adicionais nos conversores eletrônicos (MÜLLER et al., 2002; SILVA, K. F. 2006).

Os GIDA são amplamente utilizados em turbinas eólicas de grande porte (BURTON et al., 2011) e, além das vantagens de custos reduzidos com os inversores e filtros e de uma melhor eficiência energética, o controle do fator de potência² pode ser feito de uma forma relativamente barata, operando de forma similar a um gerador síncrono (MÜLLER et al., 2002; PEREIRA, 2004).

O controle das turbinas eólicas é tradicionalmente baseado no controle vetorial por orientação de fluxo do estator. Este esquema desacopla a corrente do

² O fator de potência é dado por $FP = \cos \phi_s / \sqrt{1 + TDH^2}$, em que TDH é a Taxa de Distorção Harmônica. Para tensões e correntes perfeitamente senoidais, o fator de potência é dado por $FP = \cos \phi_s = P_s / \sqrt{P_s^2 + Q_s^2}$, em que P_s e Q_s são os módulos das potências ativa e reativa.

rotor em componentes de potência ativa e reativa e seu controle é obtido com um controlador de corrente no rotor. A principal desvantagem desse sistema é que seu desempenho depende, com certa precisão, de parâmetros da máquina, como resistências rotórica e estatórica (ZHI; XU, 2007). Além disso, os controladores de corrente do rotor precisam ser cuidadosamente sintonizados para garantir estabilidade do sistema e resposta adequada dentro de todo range de operação. (XU; CARTWRIGHT, 2006).

Outro método de controle denomina-se como controle direto do torque (CDT), desenvolvido em meados dos anos 80 do século XX como uma alternativa para o controle vetorial. Esta técnica minimiza o uso dos parâmetros da máquina de indução e reduz a complexidade do algoritmo de controle. No entanto, um problema desse esquema é que desempenho torna-se prejudicado durante a partida e em baixas velocidades de rotação. Com isso, métodos têm sido propostos e desenvolvidos para melhorar o desempenho nessas situações, como a inserção de ruídos (*dither signal*) e o uso de técnicas preditivas. Outra desvantagem da estratégia CDT está relacionada à variação da frequência de chaveamento, o que complica significativamente o projeto do sistema de potência (ZHI; XU, 2007).

Baseado nos princípios da estratégia CDT, surge o controle direto de potência (CDP), desenvolvidos para retificadores trifásicos PWM (*Pulse Width Modulation*). Mais recentemente, CDP foi proposto para GIDA aplicados a turbinas eólicas e o controle foi feito baseando-se na estimação do fluxo do rotor. Entretanto, como a frequência de alimentação do rotor, que é igual à frequência de escorregamento do GIDA, pode se tornar muito baixa, a estimação de fluxo do rotor fica bem prejudicada devido à variação dos parâmetros da máquina. Com isso, outra estratégia CDP é feita através da estimação do fluxo do estator. Uma vantagem dessa técnica é que os erros de estimação dos parâmetros da máquina de indução interferem pouco no desempenho e na estabilidade do sistema (XU; CARTWRIGHT, 2006; ZHI; XU, 2007).

A estratégia de CDP foi proposta por Noguchi et al. (1998), em que a ideia era controlar os conversores estáticos através do uso de uma tabela com as posições instantâneas das chaves do conversor, sem ter que utilizar sensores de tensão da rede. Para isso, essa técnica necessita da obtenção dos erros das potências ativa e reativa e da posição (no plano de tensões) do vetor tensão de saída do conversor (LIU, 2011).

Um estudo comparativo entre as três técnicas de controle mais difundidas e bem sucedidas para o GIDA - FOC, CDT e CDP - foi realizado por Tremblay, Atayde e Chandra (2011). O objetivo dos autores foi simular e experimentar tais estratégias em suas formas mais simples e os resultados obtidos com a simulação e os testes práticos mostraram que as técnicas CDP e FOC superaram a CDT. Enquanto que o método CDP é até quatro vezes mais rápido com relação à resposta transitória do que FOC, essa última estratégia impôs menores restrições quanto à instrumentação e produziu menores distorções harmônicas à rede.

Para maior aprofundamento do conhecimento da máquina de indução duplamente alimentada, Segnini (2006) estudou o modelo desta no sistema de referência síncrono, analisando as orientações de fluxo de estator, de entreferro e de rotor em diferentes situações: com a máquina operando como compensador de reativos, gerador e motor, com fator de potência (FP) indutivo, capacitivo e unitário, nas faixas de velocidade subsíncrona, síncrona e supersíncrona. Por último, este autor realizou simulações de controle de FP (capacitivo, indutivo e unitário) da máquina operando no modo gerador, para diferentes potências aplicadas sob o eixo do GIDA.

Baseado nas pesquisas feitas, as principais referências usadas para esse trabalho são: Segnini (2006), K. F. da Silva (2006) e o livro de Bim (2012).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Nesta etapa do trabalho, é abordado o conteúdo que serve como base para os capítulos posteriores que tratam da simulação e dos resultados obtidos. Inicialmente, será apresentado um pouco mais sobre as turbinas eólicas: os seus diversos componentes, os tipos de turbinas mais utilizados e suas topologias e o modelo simplificado desta, que vai servir de apoio para etapa da simulação. Em seguida, há um tópico para o GIDA, em que vai ser possível fornecer informações mais detalhadas sobre essa topologia. Na etapa seguinte, a abordagem vai ser sobre o controle vetorial por orientação do fluxo de rotor, entreferro e estator. Para a realização do controle por orientação de fluxo (FOC – *Field Oriented Control*), é necessário transformar de antemão as variáveis rotóricas trifásicas (eixos abc

estacionários) em bifásicas equivalentes (eixos $\alpha\beta$ estacionários). Este processo é chamado de transformada de Clark. Para a realização da técnica de controle por orientação de fluxo (FOC), é necessária a utilização da transformada de Park, que realiza a transformação de um sistema bifásico fixo ($\alpha\beta$) para um sistema referencial bifásico girante (dq).

Também nesse capítulo será tratado sobre o GIDA em suas três regiões de operação: nas velocidades subsíncronas, síncronas e supersíncronas. Finalmente, a proposta dessa monografia e um breve resumo conclusivo do que foi apresentado vão ser mostrados neste capítulo.

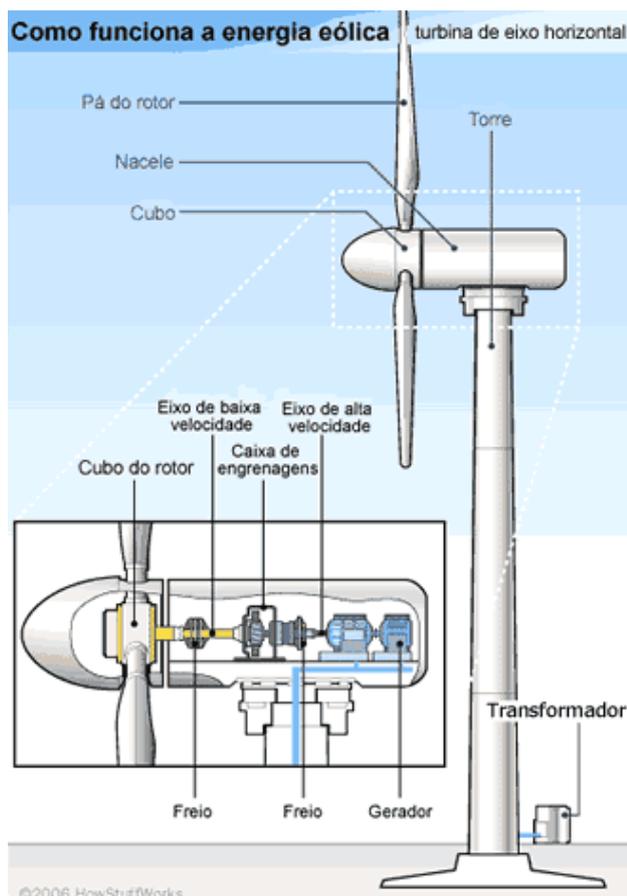
2.2 COMPONENTES E TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas são compostas por diversas partes ou componentes, dentre eles podem-se citar:

- **Pás do rotor:** Responsáveis por capturar a energia do vento e transformá-la em energia rotacional dos ventos;
- **Eixo:** Transfere energia rotacional para o gerador;
- **Nacele:** Carcaça que abriga alguns componentes do aerogerador, como:
 - **Caixa de Engrenagens:** Aumenta a velocidade de giro entre o cubo do rotor e o gerador;
 - **Gerador:** Converte energia mecânica em energia elétrica;
 - **Freio:** Utilizado em caso de falha de sobrecarga energética ou falha no sistema;
- **Torre:** Sustenta o rotor e a nacele, além de permitir que as pás possam girar em local seguro e distante do solo.

Vale exprimir que as turbinas eólicas podem ser classificadas como de eixo horizontal ou vertical, a depender da disposição do eixo do rotor, sendo as primeiras mais comumente utilizadas (ANTÔNIO VILLAR ALÉ et al.). A figura 2 mostra tais componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.

Figura 2: Componentes de uma turbina eólica



Fonte: “A moderna tecnologia de geração eólica” – LAYTON, J.(n.d.).

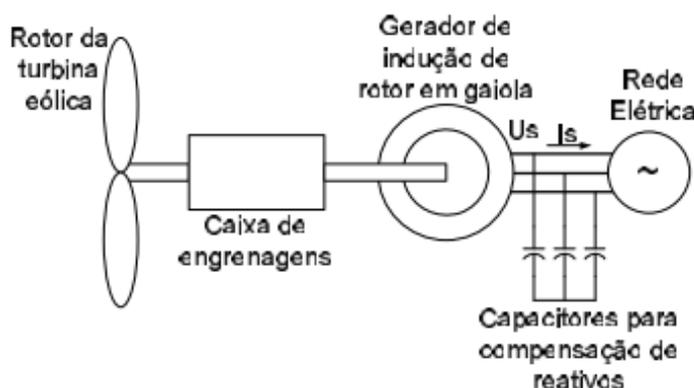
É importante salientar também que existem componentes da turbina eólica que não foram citados, como os equipamentos elétricos (transformador, inversor de frequência) e de controle (de ângulo das pás, de desligamento, em caso de segurança), por exemplo.

Segundo K. F. da Silva (2006), as principais tecnologias empregadas às turbinas eólicas são:

1. Turbina eólica à velocidade fixa com gerador de indução;
2. Turbina eólica à velocidade variável com gerador de indução ou síncrono, equipados com conversor estático de potência no estator;
3. Turbinas eólicas à velocidade variável com gerador síncrono multipolar (muitos pólos) ou gerador síncrono multipolar a ímãs permanentes (GSIP), e conversor estático de potência no estator.
4. Turbina eólica à velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado no estator e no rotor (GIDA).

Na primeira tecnologia, o gerador é acoplado à turbina através de uma caixa de engrenagens e a velocidade é fixada pela relação de transmissão (da caixa de engrenagens) e pelo número de polos do gerador. O controle pode ser feito de duas formas: através do estolamento aerodinâmico das pás (controle por *stall*) ou pelo ajuste do ângulo de passo das pás (controle por *pitch*) (SILVA, K. F. 2006). Essa configuração também é conhecida como “conceito dinamarquês”, que utiliza um gerador de indução do tipo gaiola de esquilo conectado diretamente à rede através de um transformador. Como esse gerador sempre absorve potência reativa da rede, esta topologia utiliza um banco de capacitores para compensação de potência reativa (SILVA. K. F.; AZEREDO, 2010). A figura 3 ilustra essa topologia.

Figura 3: Turbina Eólica à velocidade fixa com gerador de indução



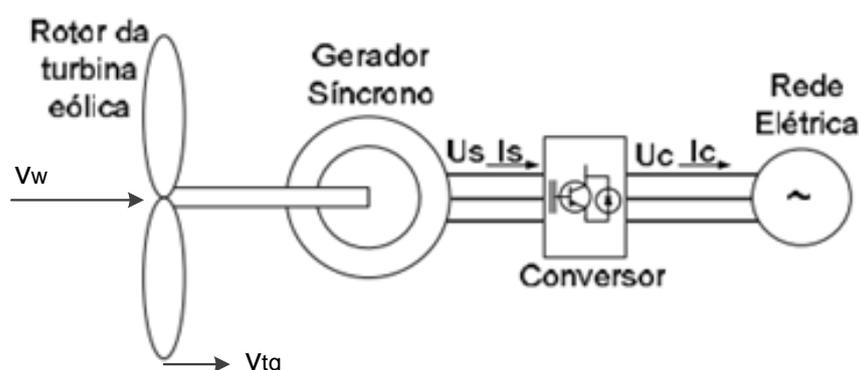
Fonte: “Um estudo do Aero gerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante” - (PEREIRA, 2004)

O segundo tipo de turbina citado é o gerador de indução ou síncrono à velocidade variável. Este possui a vantagem, em relação ao primeiro, da velocidade do gerador estar desacoplada da frequência da rede elétrica, através de um conversor estático de potência pleno, podendo o rotor girar livremente, dentro dos limites de velocidades de partida (“*cut-in*”) e nominal, sendo que, a partir dessa última, a potência/ velocidade da turbina é mantida constante através do estolamento dinâmico ou pelo controle do ângulo de passo. Este tipo de turbina possui como vantagem um maior aproveitamento energético em relação ao primeiro. A principal desvantagem dessa topologia é devido ao fato de toda potência gerada passar pelo conversor, devendo este ter uma potência nominal de 100% da potência nominal do gerador, aumentando o custo, a complexidade do projeto e os ruídos

injetados à rede elétrica. Além disso, esse equipamento gera distorções harmônicas à rede (SILVA, K. F. 2006).

A terceira topologia difere das anteriores principalmente pelo fato de não precisar utilizar a caixa de engrenagens multiplicadora de velocidade, diminuindo a necessidade de manutenção das turbinas eólicas. A figura 4 ilustra esse tipo de turbina.

Figura 4: Turbina eólica à velocidade variável com gerador (síncrono ou de indução) multipolar com conversor estático de potência no estator.



Fonte: Adaptado de “Um estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante” - (PEREIRA, 2004)

Por último, tem-se a turbina eólica à velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) no rotor e no estator. Nessa topologia, tanto o estator e o rotor são interligados à rede elétrica, direta e indiretamente, respectivamente, o que permite o controle/aceso das variáveis elétricas de ambos os componentes (rotor e estator). O rotor bobinado é conectado através de escovas e anéis coletores por uma tensão produzida pelo conversor estático. Essa turbina possui vantagens como a operação em regiões subsíncronas, síncronas e supersíncronas do gerador e a utilização de inversor e filtro mais baratos do que nos casos anteriores, o que aumenta a eficiência total do sistema eólica e diminui a injeção de harmônicos à rede elétrica. Como esse conversor é interligado aos terminais do rotor e o fluxo de potência através desse é menor do que no estator, então esse equipamento (o conversor) é menor e mais barato do que os dois últimos casos.

2.3 MODELO SIMPLIFICADO DA TURBINA EÓLICA

O modelo da turbina eólica que será apresentado foi baseado no trabalho de K. F. da Silva (2006).

A potência eólica disponível num tubo de vento definido por uma área “A” é dada por:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \quad (1)$$

Em que ρ é a densidade do vento e v_w velocidade do vento incidente perpendicular ao plano de rotação das pás.

A potência máxima que pode ser extraída pela turbina eólica é 59,3% da potência disponível do vento e é obtida quando a velocidade de vento da esteira (zona de saída) do rotor eólico é 1/3 da velocidade do vento incidente (zona de entrada). (SILVA, K. F., 2006) Este valor foi descoberto pelo físico alemão Albert Betz e pode ser representado por:

$$P_{t\max} = \frac{16}{27} \cdot P_w = \frac{16}{27} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \right) \quad (2)$$

Vale ressaltar que estas relações de velocidades ocorrem em condições normais de operação, sob condições suaves (ou sem turbulências) do fluxo de ar, até a capacidade nominal de operação de saída do rotor eólico (SILVA, K. F., 2006).

Para efeitos de comparação de aproveitamento energético, existe um índice chamado Coeficiente de Potência (C_p), que demonstra a relação entre a potência extraída do vento pela turbina (P_t) a potência disponível pela massa de ar em movimento (P_w). Matematicamente, o Coeficiente de Potência é dado por:

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} \quad (3)$$

Contudo, a potência extraída pela turbina eólica depende da velocidade do vento e da velocidade mecânica de rotação do eixo. Assim, é comum utilizar outra variável, que mede a relação entre a velocidade tangencial na ponta da pá (m/s) (V_{ig})

a velocidade do vento incidente (perpendicular ao plano de rotação – em m/s) (v_w), chamada de velocidade específica (λ), dada por:

$$\lambda = \frac{V_{tg}}{v_w} = \frac{w_t \cdot R}{v_w} \quad (4)$$

Em que w_t é a velocidade angular do eixo da turbina eólica e R o raio do rotor da turbina medido na ponta da pá.

Através da relação entre os dois índices anteriores - coeficiente de potência e velocidades específica - pode-se definir o coeficiente de conjugado (ou torque), dado por:

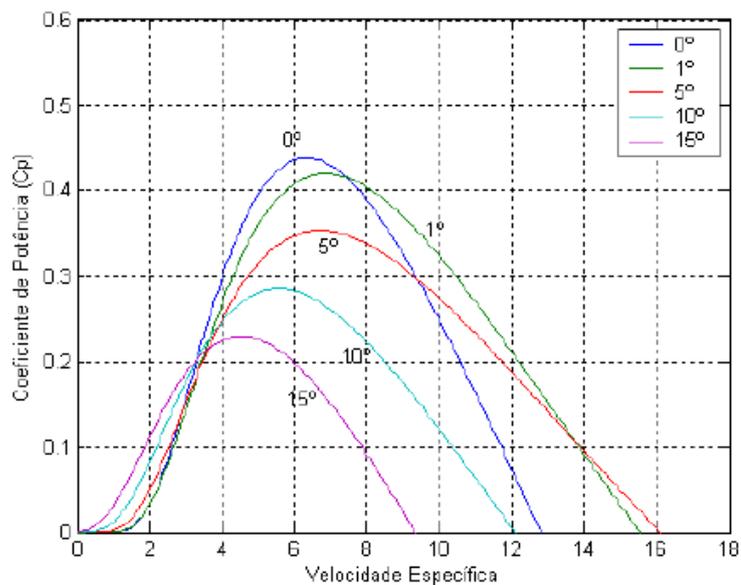
$$C_q = \frac{C_p}{\lambda} \quad (5)$$

E, após algumas manipulações algébricas, obtém-se o torque em função do seu coeficiente de conjugado:

$$T = \frac{P_t}{w_t} = \frac{C_p \cdot P_w}{w_t} = C_q \cdot \lambda \cdot \frac{P_w}{w_t} = C_q \cdot \frac{w_t \cdot R}{v_w \cdot w_t} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \right) = C_q \cdot \left(R \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^2 \right) \quad (6)$$

Sabendo-se que o torque é função da potência extraída pela turbina e da velocidade com que giram as pás, pode-se traçar uma família de curvas $C_p(\lambda)$, mostrando que, a depender da velocidade específica, obtém-se um maior coeficiente de potência e, com isso, adquire-se uma maior eficiência da turbina. Essas famílias de curvas são bastante conhecidas na literatura (SILVA, K. F. 2006) e são traçadas em função do ângulo de passo das pás eólicas, como mostrado na figura 5.

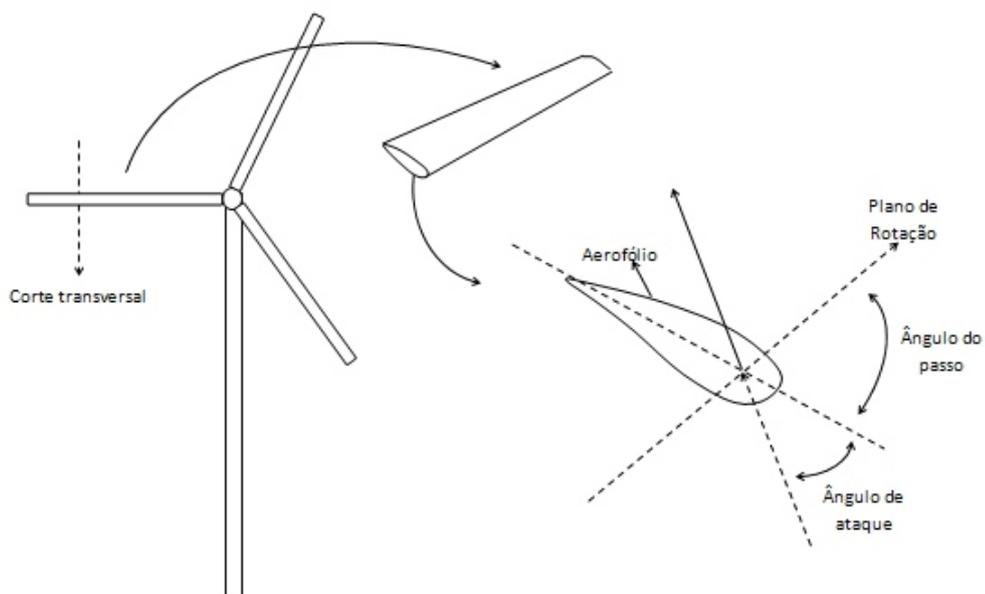
Figura 5: Coeficiente de potência em função da velocidade específica



Fonte: “Controle e Integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados”. (SILVA, K. F. 2006)

O ângulo de passo pode ser visualizado na figura 6.

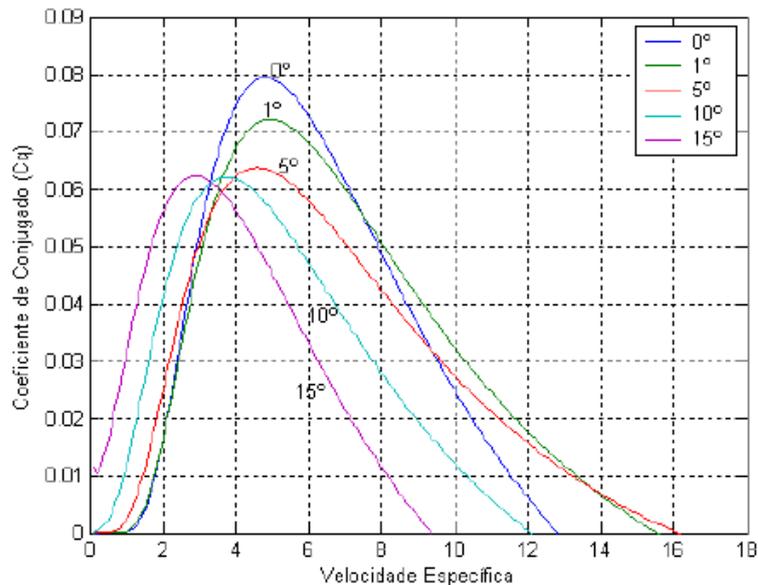
Figura 6: Turbina Eólica - Ângulos de passo, ataque e plano de rotação



Fonte: “Controladores (Energia Eólica)” – (FARIA. C., n.d.).

De maneira análoga, obtém-se as curvas $C_q(\lambda)$ em função do ângulo de passo, como mostrado na figura 7.

Figura 7: Coeficiente de conjugado em função da velocidade específica



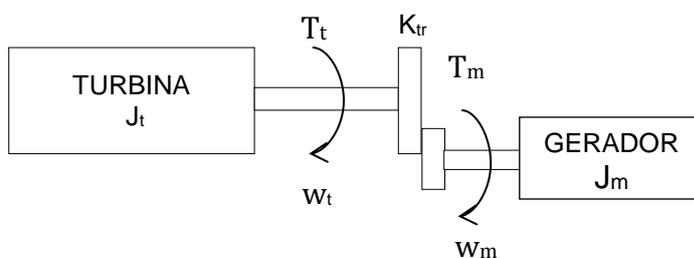
Fonte: “Controle e Integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados”. (SILVA, K. F. 2006)

As velocidades do eixo do gerador (w_m) e da turbina (w_t) são relacionadas pela relação de transmissão (K_{tr}) de velocidades para o caso de um sistema eólico com caixa de engrenagem, em que a velocidade do eixo da turbina (que está ligada diretamente com as pás) normalmente é bem menor do que a do eixo do gerador.

$$w_m = K_{tr} \cdot w_t \quad (7)$$

O modelo escolhido para o sistema de eixos da turbina é mostrado na figura 8.

Figura 8: Modelo de eixos rígidos para o sistema turbina-gerador



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado de K. F. da Silva (2006).

A equação do movimento do eixo do gerador pode ser representada por:

$$J_m \cdot \frac{d}{dt} \omega_m = \frac{T_{eixo}}{K_{tr}} + T_{em} \quad (8)$$

Sendo:

T_{em} = Torque eletromecânico do gerador.

T_{eixo} = Torque aplicado sobre o eixo da turbina eólica.

J_m = Momento de inércia do gerador.

A relação direta entre o torque mecânico e eletromecânico, em regime permanente, é dada por:

$$T_m = -T_{em} \quad (9)$$

E, como $T_m = T_{eixo}/K_{tr} = P_m/\omega_m$ e $T_{em} = P_{em}/\omega_m$, tem-se que:

$$P_m = -P_{em} \quad (10)$$

Em que P_m e P_{em} são as potências mecânica e eletromecânica, respectivamente.

Além disso, é sabido que:

$$P_m = P_{eixo} - P_{rot} \quad (11)$$

Em que P_{rot} são as perdas rotacionais.

De acordo com a convenção de receptor, as perdas rotacionais são sempre positivas e, geralmente, $|P_{rot}| \ll |P_{eixo}|$, podendo, em muitos casos, ser até desprezadas (BIM, 2012). Seguindo essa convenção, $P_m < 0$ e $P_{eixo} < 0$, para a máquina funcionando no modo rotor e $P_m > 0$ e $P_{eixo} > 0$, para o modo gerador.

Segundo Bim (2012), a potência eletromecânica referida aos eixos coordenados d – q (o sistema de referência d – q pode ser visualizado na seção 2.5), é dado por:

$$P_{em} = \frac{3p}{2} \omega_m L_m (I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq}) \quad (12)$$

Sendo:

p = Número de pólos do gerador.

L_m = Indutância mútua do gerador

I_{sd} = Corrente do estator no eixo direto síncrono em regime permanente

I_{sq} = Corrente do estator no eixo em quadratura síncrono em regime permanente

I_{rd} = Corrente do rotor no eixo direto síncrono em regime permanente

I_{rq} = Corrente do rotor no eixo em quadratura síncrono em regime permanente

E como

$$\omega_m = (1-s) \frac{\omega_s}{p/2} \quad (13)$$

pode-se escrever ainda, de forma alternativa, a potência eletromecânica como segue:

$$P_{em} = (1-s) \cdot 3 \cdot \omega_s \cdot L_m (I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq}) \quad (14)$$

Sendo:

s = Escorregamento do gerador de indução;

ω_1 = Velocidade angular na frequência da rede elétrica.

Utilizando-se do artifício matemático de conversão do fluxo magnético de estator para o eixo direto do sistema de coordenadas síncrono, considerando-se também a resistência estatórica nula e sabendo-se novamente que $T_{em} = P_{em} / \omega_m$,

obtem-se a equação de torque eletromecânico (segundo orientação do fluxo de estator):

$$T_{em} = -3 \frac{p}{4} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{V_s}{\omega_s} \cdot I_{rq} \quad (15)$$

Sendo:

V_s = Módulo da tensão no estator;

L_s = Indutância própria do estator.

Ou ainda,

$$T_{em} = \frac{3p}{4} \cdot \psi_s \cdot I_{sq} \quad (16)$$

Em que ψ_s = módulo do fluxo magnético de estator

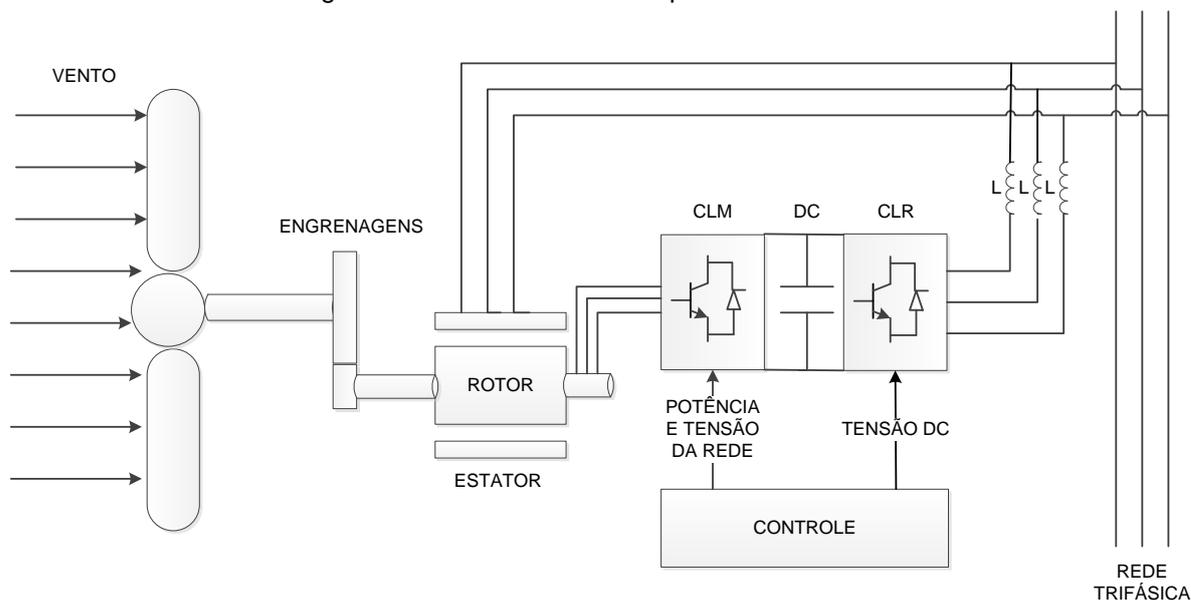
As equações do torque eletromagnético do GIDA são úteis para a etapa dos resultados de simulação (seção 4), pois a corrente do eixo em quadratura (do rotor ou do estator) está intrinsecamente ligada à potência ativa do estator.

2.4 O GIDA

Nas máquinas de indução com rotor bobinado é possível ter acesso às variáveis rotóricas de corrente e tensão e, como consequência, realizar o controle de velocidade e das potências ativas e reativas, através da conexão de um conversor de potência bidirecional, permitindo o controle de operação do motor/ gerador em uma ampla faixa de operação (se comparado com a máquina de indução com rotor em gaiola) podendo este funcionar nas velocidades subsíncrona, síncrona e supersíncrona. (BIM, 2012). Esta máquina de indução que foi aqui descrita, quando funcionando no modo gerador é denominada de GIDA.

Normalmente, o sistema de controle de um GIDA pode ser dividido em duas partes: a primeira consiste no controle da potência de saída do gerador e da tensão nos terminais do estator, feitos através do conversor ao lado da máquina (CLM); a segunda refere-se ao controle da tensão no barramento DC do capacitor, sendo esse controle feito através do conversor do lado da rede (CLR). (YAO et al., 2009). O esquema geral do que foi explicitado é mostrado na figura 9.

Figura 9: Malha de controle de potência do estator.



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado de “SimPowerSystems For Use with Simulink” (2003).

Os indutores na saída do CLR servem como filtros para atenuação dos “ripples” de corrente alternada, reduzindo-se com isso as distorções harmônicas provocadas na rede elétrica. Como outra solução para mitigação desse problema, poder-se-ia utilizar, como exemplo, um filtro LCL (SILVA, K. F., 2006).

Uma característica do gerador/ motor de indução duplamente alimentado (GIDA/ MIDA) é que este pode atuar isolado ou interligado ao barramento infinito. No primeiro caso, tanto as variáveis elétricas rotóricas de corrente e tensão quanto as estatóricas são utilizadas para se fazer o controle de torque ou de velocidade do equipamento, enquanto que, na segunda situação, apenas as variáveis elétricas do rotor são utilizadas para se realizar o controle, pois o módulo e a frequência dos vetores do estator são determinados pela rede elétrica. (BIM, 2012).

No caso da máquina de indução duplamente alimentada, as correntes de eixo direto e em quadratura do sistema referência girante (esses conceitos são apresentados na seção 2.5) são variáveis de controle das potências ativa e reativa e, para o caso de um GIDA/ MIDA aplicado a um barramento infinito, é desejável que os controles da potência ativa não interfiram na potência reativa, ou seja, as variações de um não modifiquem o valor do outro. Para que isso aconteça, é necessário entender o conceito de controle vetorial por orientação de fluxo

magnético (FOC – *Field Oriented Control*), explicado na seção 2.5, que consiste em fixar no eixo direto do sistema de coordenadas síncrono um dos fluxos magnéticos da máquina de indução: o fluxo de estator, de rotor ou de entreferro.

A orientação segundo fluxo magnético de estator torna o desempenho do GIDA similar a um gerador síncrono, enquanto que o FOC de rotor torna a máquina parecida a um motor de corrente contínua com excitação separada.

2.5 FOC NO GIDA

O controle vetorial (FOC – *Field Oriented Control*) consiste no controle instantâneo das magnitudes, da frequência, do fluxo magnético e da posição angular das grandezas elétricas ou magnéticas (BIM, 2012). Matematicamente, o controle vetorial converte as grandezas trifásicas em componentes de eixo direto e em quadratura do sistema síncrono de referência, permitindo o controle independente entre o fluxo magnético e o torque da máquina.

2.5.1 Orientação do fluxo magnético de rotor

O vetor fluxo magnético do rotor pode ser representado pelas coordenadas $\alpha\beta$ estacionárias, conforme mostra equação (17).

$$\overline{\psi}_{r,\alpha\beta} = \psi_r \cdot e^{j\delta_r} \quad (17)$$

Em que ψ_r é a magnitude do fluxo magnético do rotor e δ_r a posição espacial instantânea desse fluxo em relação ao eixo α do sistema estacionário, conforme observado na figura 10. Com isso, a velocidade com que esse ângulo varia é dada por:

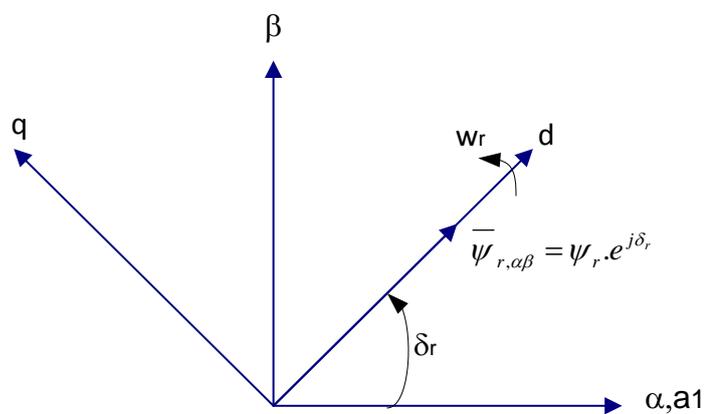
$$w_r = \frac{d\delta_r}{dt} \quad (18)$$

Para transformar o fluxo magnético dos eixos $\alpha\beta$ para o sistema de coordenadas d-q síncrono, deve-se multiplicar o fluxo magnético do rotor por $e^{-j\delta_r}$.

$$\overline{\psi}_{r,dq} = \psi_r \cdot e^{j\delta_r} \cdot e^{-j\delta_r} = \psi_r \quad (19)$$

Nessas condições, diz-se que o GIDA opera sob orientação do fluxo magnético de rotor. Nesse novo sistema de referência escolhido (sistema síncrono), o eixo direto coincide com o vetor fluxo magnético do rotor a todo instante. Tem-se, portanto, que a componente do fluxo magnético no eixo q síncrono é nula. A figura 10 ilustra a transformação que foi feita.

Figura 10: Orientação do fluxo magnético de rotor



Fonte: O próprio autor. Baseado de “Máquinas Elétricas e Acionamento” (Bim, 2012).

A equação do torque eletromagnético desenvolvido, quando se tem a orientação segundo o fluxo magnético de rotor, é dada por:

$$T_{em} = \frac{3p}{4} \cdot \frac{L_m}{\sigma \cdot L_r} \psi_r \cdot i_{sq} \quad (20)$$

Em que σ é o fator de dispersão da indutância total da máquina.

Percebe-se que o torque, para esse caso, é diretamente proporcional à componente de corrente em quadratura i_{sq} .

2.5.2 Orientação do fluxo magnético de entreferro

Nessa estratégia de orientação, o eixo direto do sistema de coordenadas síncrono é fixado no vetor fluxo magnético do entreferro. A expressão a seguir mostra como anular o efeito da componente em quadratura, utilizando-se o artifício da transformação dos eixos referenciais:

$$\overline{\psi}_{g,dq} = \psi_g \cdot e^{j\delta_g} \cdot e^{-j\delta_g} = \psi_g \quad (21)$$

Sendo ψ_g o módulo do fluxo magnético do entreferro.

Com isso, o torque eletromagnético desenvolvido é representado por:

$$T_{em} = \frac{3p}{4} \cdot \psi_g \cdot i_{sq} \quad (22)$$

Sendo diretamente proporcional à corrente de eixo em quadratura, assim como no caso anterior. O fluxo magnético (de rotor ou entreferro) e a corrente de eixo em quadratura são equivalentes ao fluxo magnético do campo principal e à corrente de armadura, respectivamente, no caso da máquina de corrente contínua.

2.5.3 Orientação do fluxo magnético de estator

O vetor fluxo magnético de estator descrito nas coordenadas estacionárias é definido por:

$$\overline{\psi}_{s,\alpha\beta} = \psi_s \cdot e^{j\delta_s} \quad (23)$$

Em que ψ_s é o módulo do fluxo de estator e δ_s a posição angular do fluxo magnético de estator em relação ao eixo estacionário α (análogo à figura 10).

A velocidade espacial do fluxo magnético de estator é dada por:

$$w_s = \frac{d\delta_s}{dt} \quad (24)$$

Na orientação do fluxo magnético de estator, o eixo direto do sistema de coordenadas síncronas é fixado no vetor fluxo magnético de estator, o que significa que

$$\psi_{sq} = 0 \quad (25)$$

Então, o fluxo magnético de estator fica definido como:

$$\bar{\psi}_{s,dq} = \psi_{sd} = \psi_s \quad (26)$$

Ou seja, o fluxo magnético de eixo direto é o próprio fluxo magnético de estator. Matematicamente, este processo consiste em multiplicar o vetor fluxo magnético de estator nas coordenadas estacionárias pelo operador matemático $e^{-j\delta_s}$.

$$\bar{\psi}_{s,dq} = \psi_s e^{j\delta_s} \cdot e^{-j\delta_s} = \psi_s \quad (27)$$

2.5.3.1 Controle das Potências Ativa e Reativa

As equações a seguir foram retiradas de Bim (2012). As expressões da potência ativa total nos terminais externos de estator e de rotor em função das tensões e das correntes são, respectivamente:

$$P_s = 3\text{Re}\left[\bar{V}_s \bar{I}_s^*\right] = 3(V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \quad (28)$$

$$P_r = 3\text{Re}\left[\bar{V}_r \bar{I}_r^*\right] = 3(V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq}) \quad (29)$$

Sendo:

V_{sd} = Tensão de eixo direto do estator;

V_{sq} = Tensão de eixo em quadratura do estator.

E as de potência reativa no terminal de estator e no de rotor em função das correntes e tensões são:

$$Q_s = 3 \operatorname{Im} \left[\bar{V}_s \bar{I}_s^* \right] = 3(V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq}) \quad (30)$$

$$Q_r = 3 \operatorname{Im} \left[\bar{V}_r \bar{I}_r^* \right] = 3(V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq}) \quad (31)$$

Vale lembrar que as tensões e correntes da equação anterior estão em valores eficazes.

Os vetores fluxo magnético de estator e rotor no sistema síncrono são dados respectivamente por:

$$\bar{\psi}_{s,dq} = L_s \bar{i}_{s,dq} + L_m \bar{i}_{r,dq} \quad (32)$$

$$\bar{\psi}_{r,dq} = L_m \bar{i}_{s,dq} + L_r \bar{i}_{r,dq} \quad (33)$$

Sendo:

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (34)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (35)$$

L_s é a indutância própria do estator, L_r é a indutância própria do rotor referida ao lado do estator e L_m a indutância mútua.

As equações das tensões direta e em quadratura do estator e do rotor, respectivamente, no sistema síncrono, são dadas por:

$$v_{sd} = r_s i'_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \quad (36)$$

$$v_{sq} = r_s i'_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \quad (37)$$

$$v'_{rd} = r_r i'_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} - s \omega_s \psi_{rq} \quad (38)$$

$$v'_{rq} = r_r i'_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} + s w_s \psi_{rd} \quad (39)$$

Sendo:

v_{sd} = Valor instantâneo da tensão de eixo direto do estator;

v_{sq} = Valor instantâneo da tensão de eixo em quadratura do estator;

v'_{rd} = Valor instantâneo da tensão de eixo direto do rotor referido ao estator;

v'_{rq} = Valor instantâneo da tensão de eixo em quadratura do rotor referido ao estator;

r_s = Resistência do estator;

r_r = Resistência do rotor referida ao estator.

Considerando a orientação do fluxo de estator no eixo direto do sistema síncrono de coordenadas (ver equações (25) e (26)) e a partir da equação (32) e das expressões de v_{sd} e v_{sq} , obtêm-se:

$$i_{sd} = \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \quad (40)$$

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \quad (41)$$

$$v_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_s \quad (42)$$

$$v_{sq} = r_s i_{sq} + w_s \psi_s \quad (43)$$

Assim, as últimas quatro equações aliadas às de potência ativa e reativa do estator, dadas por (28) e (30), fornecem as expressões de P_s e Q_s sob a orientação do fluxo magnético de estator do GIDA/ MIDA:

$$P_s = 3 \left(r_s [(i_{sq})^2 + (i_{sd})^2] - w_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s i_{rq} + i_{sd} \frac{d}{dt} \psi_s \right) \quad (44)$$

$$Q_s = 3 \left(w_s \frac{(\psi_s)^2}{L_s} - w_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \frac{d}{dt} \psi_s \right) \quad (45)$$

Considerando os terminais do estator a um barramento com tensões equilibradas e assumindo que $r_s = 0$ (o que normalmente é comum para máquinas

de indução com centenas de kW), tem-se um fluxo magnético é constante. Portanto, em regime permanente, as equações (42) e (43) tornam-se, respectivamente:

$$V_{sd} = 0 \quad (46)$$

$$V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \psi_s \quad (47)$$

Que quando substituídas às equações (44) e (45) de P_s e Q_s , respectivamente, obtêm-se:

$$P_s = -3 \frac{L_m}{L_s} V_s I_{rq} \quad (48)$$

$$Q_s = 3 \frac{L_m}{L_s} V_s \left(\frac{V_s}{\omega_s L_m} - I_{rd} \right) \quad (49)$$

Percebe-se, portanto que, quando o fluxo magnético do estator é constante, as potências ativa e reativa dependem apenas de I_{rq} e I_{rd} , respectivamente.

Com isso, o cálculo da corrente de referência I_{rdref} é feito utilizando-se a expressão (49), a partir da potência reativa de referência Q_{sref} desejada:

$$i_{rdref} = - \frac{Q_{sref} - 3 \omega_s \frac{\psi_s^2}{L_s}}{3 \omega_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s} \quad (50)$$

Analogamente, podem-se obter as expressões de potência ativa e reativa do rotor, mostradas a seguir:

$$P_r = 3 \left[r_r \left[(I_{rd})^2 + (I_{rq})^2 \right] + s \frac{L_m}{L_s} V_s I_{rq} \right] \quad (51)$$

$$Q_r = 3 \cdot s \cdot \omega_s \left[\frac{L_m}{L_s} I_{rd} \frac{V_s}{\omega_s} + \sigma \cdot L_r \left[(I_{rd})^2 + (I_{rq})^2 \right] \right] \quad (52)$$

Sendo σ o coeficiente de dispersão dado por:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r \cdot L_s} \quad (53)$$

Adotando-se a convenção de receptor, os fluxos de potências são positivos quando forem absorvidos pela máquina e negativos se estiverem sendo fornecidos por esta.

Outra forma de escrever as equações (40) e (41):

$$I_{rd} = \frac{\psi_s - L_s I_{sd}}{L_m} \quad (54)$$

$$I_{rq} = -\frac{L_s}{L_m} I_{sq} \quad (55)$$

Que, quando substituídas pelas expressões P_r e Q_r , obtém-se:

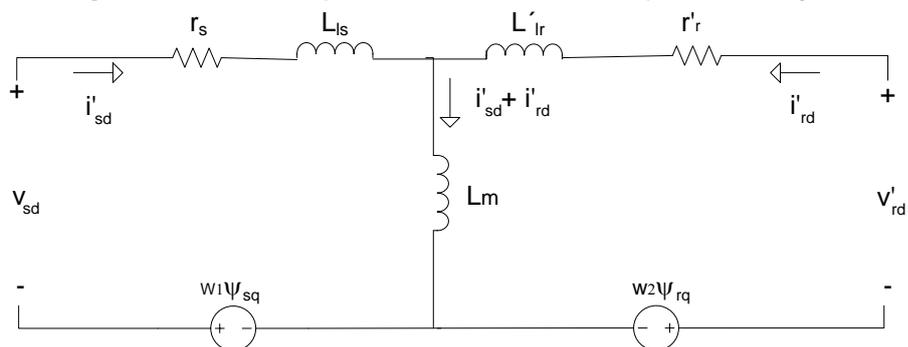
$$P_r = 3 \left[\frac{r_r}{L_m^2} \left[\psi_s^2 + L_s^2 (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) - 2 \psi_s \cdot L_s \cdot I_{sd} \right] - s I_{sq} \right] \quad (56)$$

$$Q_r = 3 \cdot s \cdot \omega_s \left\{ \frac{V_s}{L_s \cdot \omega_s} \cdot (\psi_s - L_s I_{sd}) + \sigma \cdot \frac{L_r}{L_m^2} \left[\psi_s^2 + L_s^2 (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) - 2 \psi_s \cdot L_s \cdot I_{sd} \right] - s I_{sq} \right\} \quad (57)$$

Percebe-se que, para o controle de potência ativa e reativa do rotor, existe um acoplamento entre as componentes de corrente de eixo direto e em quadratura. No entanto, para máquinas de grande porte, o coeficiente de dispersão é desprezível e por isso, o controle de potência reativa do rotor torna-se dependente apenas da corrente de quadratura do rotor (ou do estator), em regime permanente e considerando a máquina de indução conectada ao barramento infinito (SEGNINI, 2006).

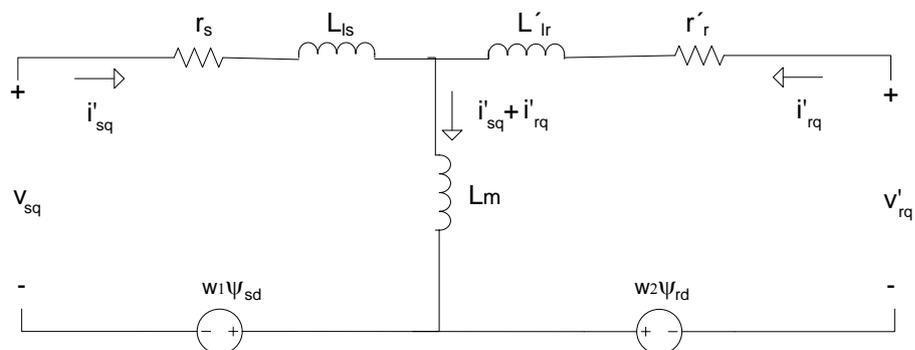
Os circuitos equivalentes da máquina de indução duplamente alimentada para os eixos coordenados $d - q$ são mostrados nas figuras 11 e 12.

Figura 11: Circuito equivalente do eixo-d da máquina de indução



Fonte: Elaborado pelo autor. Baseado de “Máquinas Elétricas e Acionamento” (Bim, 2012).

Figura 12: Circuito equivalente do eixo-q da máquina de indução



Fonte: Elaborado pelo autor. Baseado de “Máquinas Elétricas e Acionamento” (Bim, 2012).

As equações dinâmicas das correntes do rotor orientadas segundo fluxo magnético de estator são representados por (SILVA, K. F., 2006):

$$\sigma L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rd} + r_r \cdot i_{rd} = v_{rd} + \sigma L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rq} - e_{rd} \quad (58)$$

$$\sigma L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rq} + r_r \cdot i_{rq} = v_{rq} - \sigma L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rd} - e_{rq} \quad (59)$$

Sendo e_{rd} e e_{rq} as componentes d – q da força f.e.m induzida no rotor devido ao escorregamento da máquina. Percebe-se, no entanto, que existe um acoplamento entre as duas malhas de corrente, ou seja, grandezas do eixo-d interferem nas

grandezas do eixo-q, e a recíproca também é verdadeira. Para controle do fluxo magnético do estator, a variação da corrente i_{sq} , por exemplo, gera alteração do fluxo, mesmo que i_{sd} seja constante. Isso significa que não é possível controlar o torque de forma independente do fluxo magnético do estator, além da dinâmica de controle do sistema tornar-se prejudicada, pois os transitórios de fluxo magnético tornam-se mais lentos (BIM, 2012).

Os termos e_{rd} e e_{rq} são, respectivamente, dados por:

$$e_{rd} = (1 - \sigma) \cdot L_r \cdot \frac{d}{dt} I_{ms} \quad (60)$$

$$e_{rq} = (1 - \sigma) \cdot L_r \cdot w_{slip} \cdot I_{ms} \quad (61)$$

Sendo I_{ms} a corrente de magnetização da máquina de indução, L_r a indutância própria do rotor e w_{slip} é a velocidade angular elétrica de escorregamento do rotor.

É percebida também a influência dos termos e_{rq} e e_{rd} devido ao escorregamento da máquina de indução, sendo que, a magnitude destes, depende da corrente de magnetização I_{ms} e da sua derivada, respectivamente. Como estes componentes são significativos principalmente em operações que utilizam elevados escorregamentos, eles são compensados por sinais diretos v_{rdcomp} e v_{rqcomp} nas saídas dos controladores das correntes do rotor (SILVA, K. F., 2006). Com isso, as equações (58) e (59) podem ser reescritas:

$$\sigma \cdot L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rd} + r_r \cdot i_{rd} = v_{rd} - v_{rdcomp} = v'_{rd} \quad (62)$$

$$\sigma \cdot L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rq} + r_r \cdot i_{rq} = v_{rq} + v_{rqcomp} = v'_{rq} \quad (63)$$

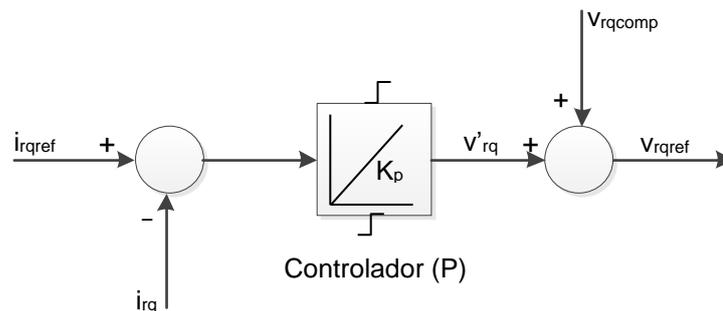
Sendo os termos de compensação dados por:

$$v_{rdcomp} = \sigma \cdot L_r \cdot w_r \cdot i_{rq} - e_{rd} \quad (64)$$

$$v_{rqcomp} = \sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{rd} + e_{rq} \quad (65)$$

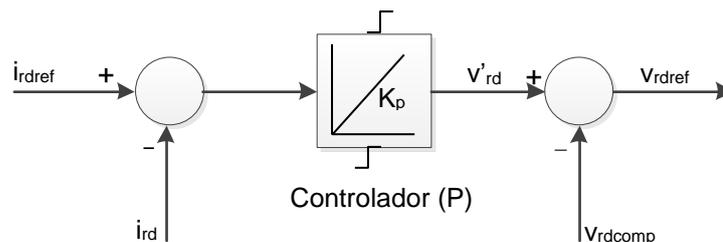
Tem-se, com isso, um melhor desacoplamento entre as correntes i_{rd} e i_{rq} , resultando num acionamento de elevado desempenho e redução nos ruídos nas formas de onda das correntes (SILVA, K. F., 2006). Os diagramas das figuras 13 e 14 mostram como os termos de compensação direta são inseridos.

Figura 13 – Controlador de corrente i_{rq} e termo de compensação



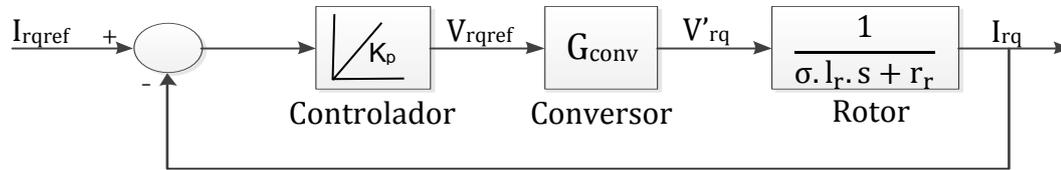
Fonte: O próprio autor. Baseado de “Controle e Integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados” (SILVA, K. F. 2006).

Figura 14 – Controlador de corrente i_{rd} e termo de compensação

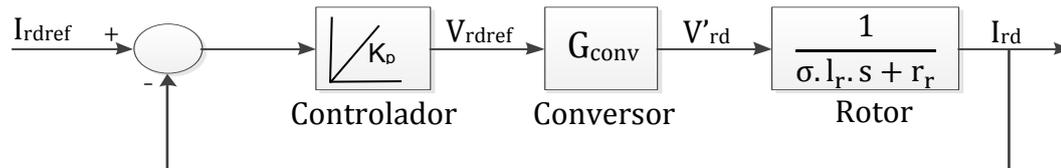


“Controle e Integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados” (SILVA, K. F. 2006).

Para esse exemplo utilizou-se um controlador do tipo P e, como a equação dinâmica da corrente i_{rd} é idêntica à da corrente i_{rq} após a inserção dos termos de compensação, o ganho do controlador (K_P) é o mesmo. Finalmente, após o fechamento das malhas de correntes rotóricas e utilizando-se um conversor PWM ideal, obtêm-se os diagramas de blocos representados pelas figuras 15 e 16.

Figura 15: Malha de controle de corrente I_{rq} 

Fonte: O próprio autor. Baseado de “Controle e Integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados” (SILVA, K. F. 2006).

Figura 16: Malha de controle de corrente I_{rd} 

Fonte: O próprio autor. Baseado de “Controle e Integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados” (SILVA, K. F. 2006).

Utilizando-se a Transformada de Laplace, obtêm-se as relações de entrada e saída do circuito do rotor:

$$I_{rq}(s) = G_{mo}(s) \cdot V'_{rq}(s) \quad (66)$$

$$I_{rd}(s) = G_{mo}(s) \cdot V'_{rd}(s) \quad (67)$$

Sendo

$$G_{mo}(s) = \frac{1}{s \cdot \sigma \cdot l_r + r_r} \quad (68)$$

A função de transferência que representa o circuito equivalente do rotor.

Além disso, a função de transferência em malha fechada é definida por:

$$G(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} \quad (69)$$

Sendo

$$G_o(s) = K_p \cdot G_{ms}(s) \quad (70)$$

Desenvolvendo $G(s)$ resulta em:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau \cdot s} \quad (71)$$

Sendo

$$K = \frac{K_p}{r_r + K_p} \quad (72)$$

$$\tau = \frac{\sigma \cdot l_r}{r_r + K_p} \quad (73)$$

É importante salientar que o desacoplamento das componentes diretas e em quadratura circuito do rotor não foi feito nas simulações, pois o objetivo do trabalho é controlar o fator de potência do estator.

A modelagem do conversor não foi realizada também por possuir uma dinâmica muito mais rápida do que o rotor, não interferindo de forma significativa no tempo de resposta do sistema como um todo. Sabe-se entretanto que a saída do conversor busca “seguir” a sua entrada.

2.5.3.2 Controle de Velocidade da Turbina

Pode-se encontrar a velocidade ω_m no domínio da frequência, a partir da equação (8):

$$w_m(s) = \frac{1}{J \cdot s} (T_{em}(s) - T_L(s)) \quad (74)$$

Sendo

$$T_L = \frac{T_t}{K_{tr}} \quad (75)$$

O diagrama de blocos ilustrado na figura 17 mostra a malha de controle de velocidade de giro do rotor do GIDA.

Figura 17: Malha de controle de velocidade.



Fonte: Elaborado pelo autor. Baseado de “Controle e Integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados” (SILVA, K. F. 2006).

Com

$$G1 = -3 \frac{p}{4} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{V_s}{w_s} \quad (76)$$

Obtido pela equação (15).

O controlador utilizado para essa malha é um controlador PI, dado por:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (77)$$

A função de transferência em malha aberta é dada por:

$$T_{ma}(s) = C(s).G_1.\frac{1}{J.s} = G_1.\frac{(s.K_p + K_i)}{s^2.J} \quad (78)$$

Sendo assim, a função de transferência de malha fechada é dada por:

$$T(s) = \frac{\frac{K_p}{K_i} s + 1}{\frac{J}{G_1.K_i} .s^2 + \frac{K_p}{K_i} .s + 1} \quad (79)$$

Os ganhos para o controlador de velocidade vão ser mostrados na seção 3.3.

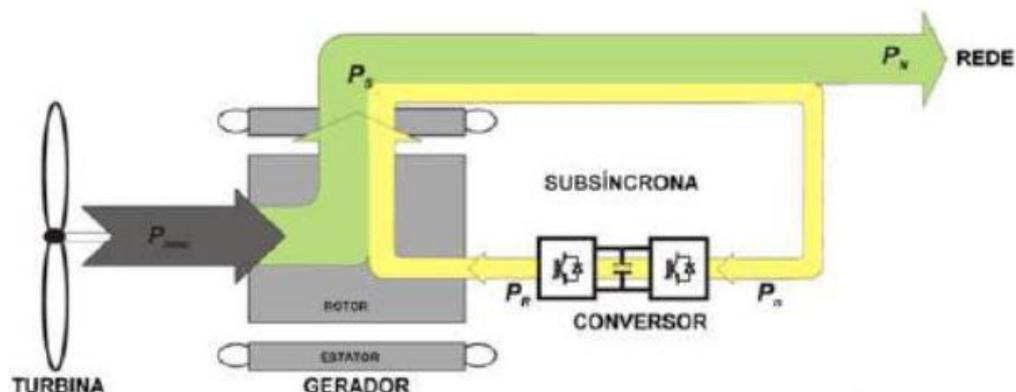
2.6 GIDA NAS VELOCIDADES SUBSÍNCRONA, SÍNCRONA E SUPERSÍNCRONA

Como foi citado anteriormente, o GIDA pode operar nas velocidades subsíncrona, síncrona e supersíncrona. O que difere o modo de operação do GIDA é a faixa de escorregamento (ou a faixa de velocidade de giro do rotor), o que faz com que os sentidos dos fluxos de potência do rotor e do estator possam ser diferentes, a depender da situação.

Seguindo a convenção de sinal do receptor, a potência ativa nos terminais do estator é negativa ($P_s < 0$), enquanto que o fluxo de potência reativo nesse terminal pode variar, a depender se o fator de potência for indutivo ou capacitivo. Já para análise dos fluxos de potência ativa e reativa do rotor, deve-se avaliar o sinal do escorregamento (ou regime de operação) e das correntes de eixo direto e em quadratura do sistema de referência síncrono. (SEGNINI, 2006).

Na região subsíncrona do gerador, a velocidade de giro do rotor é menor do que a velocidade síncrona, mas no mesmo sentido (escorregamento entre 0 e 1). Nessa região de operação, o fluxo de potência ativa do rotor é positivo (segundo a convenção do sinal de receptor) e este consome ou fornece potência reativa da rede, a depender do valor de I_{rd} , conforme equação (52). Vale lembrar que as potências ativa e reativa do rotor são menores do que as do estator. A figura 18 ilustra essa situação.

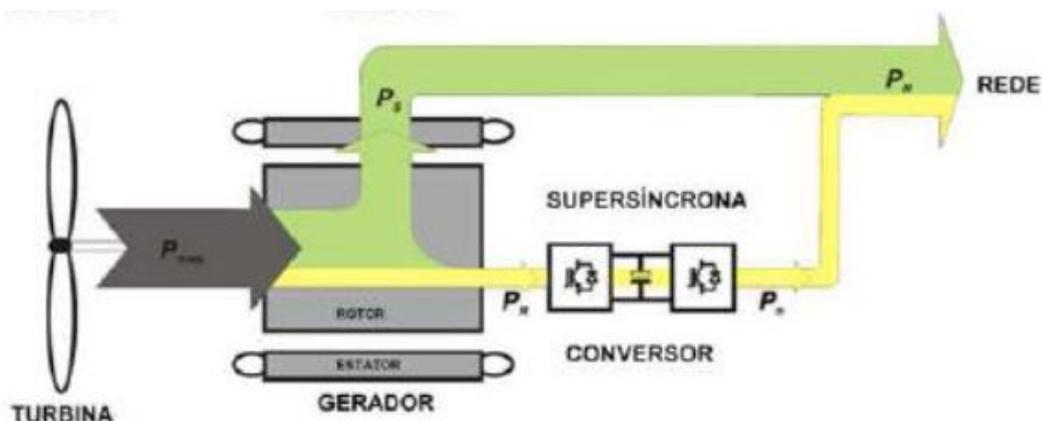
Figura 18: Modo de operação subsíncrono do GIDA



Fonte: "Controle Direto de Potência em Gerador de Indução Duplamente Alimentado" – Liu, (2011, *apud* Rabelo, 2009).

O modo de operação supersíncrono do gerador de indução duplamente alimentado ocorre quando a velocidade de giro do rotor é maior do que a síncrona (escorregamento negativo). Nessa situação, os fluxos de potência ativa e reativa do rotor podem ser positivos ou negativos, conforme mostram equações (51) e (52), respectivamente. A figura 19 ilustra uma situação específica do regime supersíncrono.

Figura 19: Modo de operação supersíncrono do GIDA.



Fonte: "Controle Direto de Potência em Gerador de Indução Duplamente Alimentado" – Liu, (2011, *apud* Rabelo, 2009).

No modo de operação síncrono, como o próprio nome sugere, o gerador funciona com a velocidade síncrona. Quando opera nesse regime, tem-se $Q_r=0$ e $P_r>0$, o que significa, nessa última situação, dissipação de potência na resistência r_r ,

conforme equação (51). Vale ressaltar que o fluxo de potência reativa do estator pode ser indutiva ($Q_s > 0$) ou capacitiva ($Q_s < 0$).

2.7 DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DO TCC

Um dos objetivos desse trabalho é a realização de um estudo de um dos principais componentes de uma turbina eólica: o gerador. Para essa monografia, foi escolhido como objeto de investigação o gerador de indução duplamente alimentado (GIDA), que é uma topologia bastante utilizada em turbinas eólicas (MARQUES, 2004; FERREIRA, 2009; LIU, 2011). Uma das principais vantagens dessa configuração é permitir o acesso das variáveis elétricas do rotor (tensões e corrente) e, através destas, fazer o controle de velocidade e das potências ativas e reativas. Além disso, o GIDA pode operar em diferentes faixas de velocidade: na região subsíncrona, síncrona e supersíncrona, dispensando a obrigatoriedade do uso de banco de capacitores (BIM, 2012).

Para esse trabalho também vão ser feitas simulações de controle de potência reativa, utilizando a técnica de controle vetorial por orientação do fluxo de estator.. Segundo Bim (2012) e J. L. da Silva (2009), essa técnica possui a vantagem de permitir o desacoplamento entre o fluxo magnético (excitação) e o torque da máquina ou, em outras palavras, entre as potências reativa e ativa. Espera-se, com isso, analisar o comportamento do GIDA em situações de mudanças abruptas e suaves na velocidade de giro do eixo do rotor.

2.8 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foram estudadas as turbinas eólicas, seus componentes principais, os tipos de turbinas utilizados e as suas topologias, além de ter sido feita a modelagem desta junto com o gerador de indução duplamente alimentado, necessários para se fazer o projeto de controle de velocidade e de potência reativa. Em seguida foi feito um estudo sobre as técnicas de controle vetorial orientados pelos fluxos de rotor, entreferro e estator, respectivamente. A estratégia de controle escolhida foi o FOC (*Field Oriented Control*) do estator. Foram tratados também os regimes de operação de um gerador de indução duplamente alimentado e os fluxos

de potência, a depender da velocidade em que este opera. Depois de feita a fundamentação teórica, foi descrita a proposta desta monografia.

3 SIMULAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Esta etapa do trabalho consiste em mostrar com detalhes como é feita a simulação. Serão descritos aqui as etapas envolvidas e o passo a passo para a realização desta, além das condições que serão testadas e analisadas. O ambiente de simulação escolhido foi o Matlab, com a utilização do *toolbox* Simulink®. Este programa através desta ferramenta oferece condições suficientes para modelagem e simulação do sistema que está sendo proposto.

3.2 DIAGRAMA DE BLOCOS DETALHADO DA PROPOSTA

Para a realização da simulação, é necessário seguir algumas etapas, mostradas a seguir:

Etapa 1 – Medição e transformação abc para α - β

A partir das tensões de linha $v_{s,ab}$ e $v_{s,bc}$ e das correntes de fase i_{sa} , i_{sb} , i_{ra} do estator, obtém-se as variáveis bifásicas no sistema estacionário do sistema α - β :

$$v_{s\alpha} = \frac{1}{3} [2v_{s,ab}(t) + v_{s,bc}(t)] \quad (80)$$

$$v_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} v_{s,bc}(t) \quad (81)$$

$$i_{s\alpha} = i_{sa}(t) \quad (82)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} [i_{sa}(t) + 2i_{sb}(t)] \quad (83)$$

$$i_{r\alpha} = i_{ra}(t) \quad (84)$$

$$i_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} [i_{ra}(t) + 2i_{rb}(t)] \quad (85)$$

Etapa 2 – Determinação dos valores instantâneos das componentes $\psi_{s\alpha}$ e $\psi_{s\beta}$ e das potências ativa e reativa do estator:

$$\psi_{s\alpha} = \int (v_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha}) dt \quad (86)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (v_{s\beta} - r_s i_{s\beta}) dt \quad (87)$$

$$p_s = \frac{3}{2} (v_{s\alpha} i_{s\alpha} + v_{s\beta} i_{s\beta}) \quad (88)$$

$$q_s = \frac{3}{2} (v_{s\beta} i_{s\alpha} - v_{s\alpha} i_{s\beta}) \quad (89)$$

Etapa 3 – Determinação da posição angular instantânea δ_s do fluxo do estator e do seu módulo ψ_s instantâneo:

$$\delta_s = \arctan\left(\frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}}\right) \quad (90)$$

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \quad (91)$$

Etapa 4 – Transformação das tensões $v_{s\alpha}$ e $v_{s\beta}$ do sistema de coordenadas $\alpha - \beta$ para V_{sq} do sistema d – q:

Depois de obtido o ângulo do fluxo magnético do estator, faz-se a seguinte transformação:

$$v_{sq} = -v_{s\alpha} \text{sen } \delta_s + v_{s\beta} \text{cos } \delta_s \quad (92)$$

Vale lembrar que v_{sd} é nulo em regime permanente e considerando a resistência do enrolamento do estator desprezível.

Etapa 5 – Obtenção das correntes instantâneas i_{rd} e i_{rq}

$$i_{rq} = -\frac{2L_s}{3L_m} \cdot \frac{p_s}{v_{sq}} \quad (93)$$

$$i_{rd} = \frac{1}{L_m \cdot v_{sq}} \left(\frac{v_{sq}^2}{\omega_s} - \frac{2 \cdot L_s \cdot q_s}{3} \right) \quad (94)$$

Essas equações originam-se das equações (49) e (59). As variáveis que estão em minúsculos representam valores instantâneos.

A corrente do rotor i_{rd} no sistema de coordenadas d-q é então comparada com o valor de referência i_{rdref} , para o controle do fator de potência desejado. O controlador gera uma tensão de referência v_{rdref} . Já a tensão de referência v_{rqref} é calculada algebricamente, como mostra a etapa a seguinte.

Etapa 6 – Conversão de i_{rqref} para v_{rqref}

$$v_{rqref} = r_r \cdot i_{rq} + s \cdot \omega_s \cdot L_2 \cdot i_{rd} + s \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot i_{sd} \quad (95)$$

Como, segundo orientação do fluxo de estator, $i_{sd} = \frac{\psi_s - L_m \cdot i_{rd}}{L_s}$, tem-se:

$$v_{rqref} = r_r \cdot i_{rq} + s \cdot \omega_s \cdot i_{rd} \left(L_2 - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + s \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot \frac{\psi_s}{L_s} \quad (96)$$

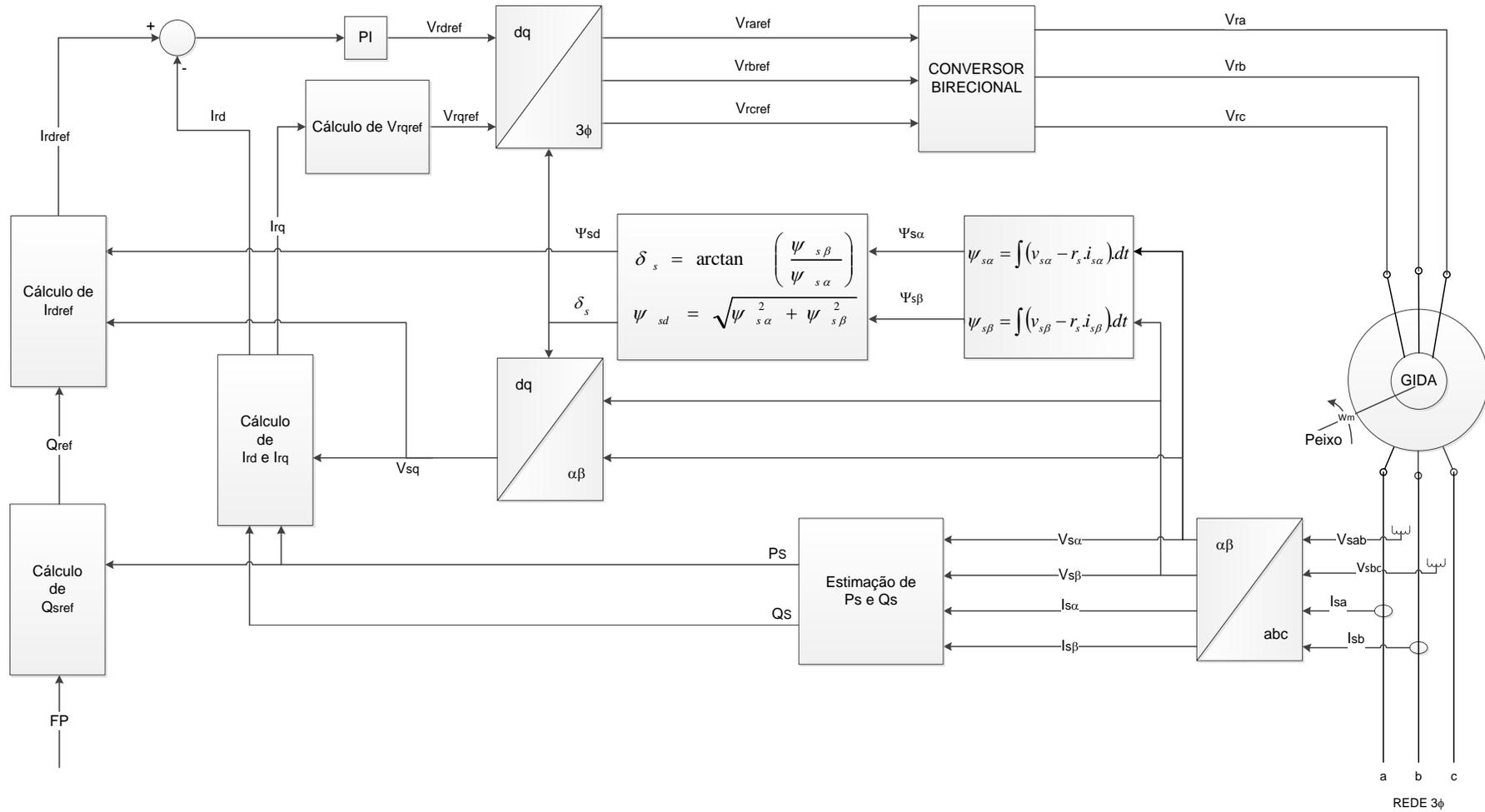
Etapa 7 – Transformação do sistema de coordenadas $d - q$ para o sistema abc.

Este processo é necessário para que os valores de tensão possam ser utilizados de fato para se controlar a potência reativa do estator.

$$\begin{bmatrix} v_{a-ref} \\ v_{b-ref} \\ v_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\operatorname{sen} \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\operatorname{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\operatorname{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (97)$$

Sabe-se que, para sistema trifásico balanceado, $v_0=0$, podendo, portanto, desprezar a terceira coluna da matriz 3x3. As tensões de referência $v_{ra_{ref}}$, $v_{rb_{ref}}$ e $v_{rc_{ref}}$ são as entradas do gerador de sinal PWM do conversor. A figura 20 mostra o diagrama completo utilizado como base para a realização da simulação:

Figura 20: Esquema completo do controle de potência reativa do estator.



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado de Segnini (2006).

3.3 CENÁRIOS SIMULADOS

Para esse trabalho foram escolhidos alguns cenários para a simulação, os quais buscam representar possíveis situações reais de ocorrer com o GIDA, quando utilizado em uma turbina eólica. Tais condições são apresentadas a seguir:

1. Potência de eixo constante com $FP=0,92$ indutivo. Após certo tempo, o fator de potência é alterado para $0,92$ capacitivo.
2. Potência decrescente de eixo seguida de potência constante:
 - a. Com fator de potência $0,92$ capacitivo
 - b. Com fator de potência $0,92$ indutivo
 - c. Com fator de potência unitário
3. Mudança abrupta de potência, representando rajada de vento³, com fator de potência $0,92$ indutivo.

O controlador utilizado para o controle de potência reativa foi um PI, conforme mostrado na equação (77), cujos ganhos escolhidos foram $K_p = 0.4$ e $K_i = 0.5$.

É válido ressaltar também que, para todos os casos, o sistema trifásico encontra-se balanceado e que o controle do fator de potência está restrito ao fluxo de potência do estator.

3.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentado o ambiente de simulação utilizado, bem como os passos necessários para a realização do controle do fator de potência do estator, além do esquemático que exprime os blocos que representam as etapas explicadas previamente. Por último, foram mostrados os cenários escolhidos.

³ Segundo a Infraero (n.d.), rajada de vento é uma mudança brusca na velocidade do vento em um pequeno intervalo de tempo. De acordo com K. F. da Silva (2006, *apud* WMO, 2006), o tempo de duração de uma rajada não deve ser superior a 20% do tempo levado em consideração para o cálculo da média da velocidade.

4 RESULTADOS

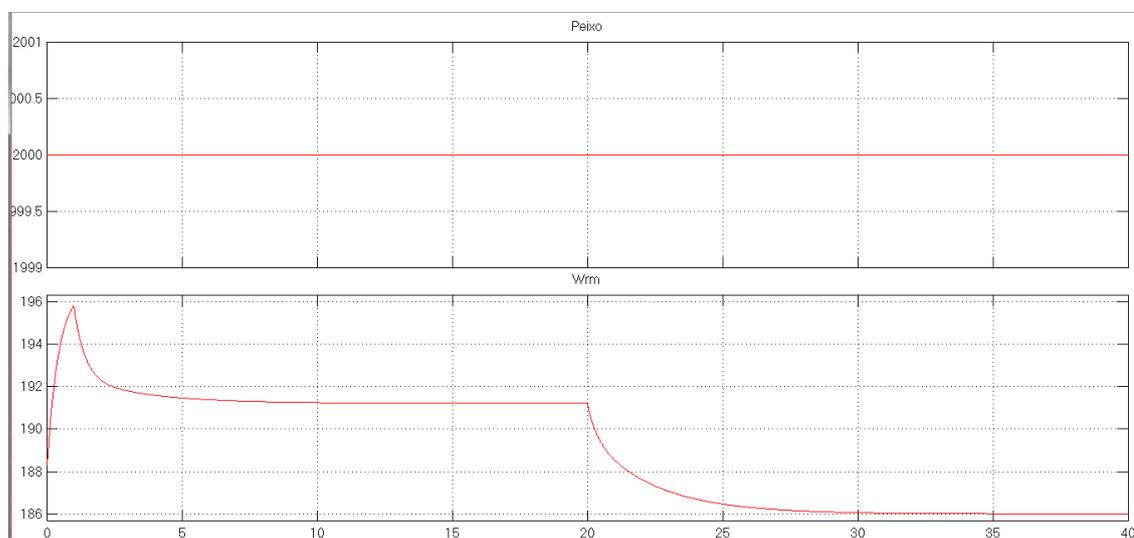
4.1 INTRODUÇÃO

Nesta etapa do trabalho são mostrados os resultados obtidos em cada cenário escolhido, além das condições estabelecidas. Vão ser apresentadas as entradas utilizadas para cada situação, como por exemplo, a potência de eixo aplicada ao GIDA e o fator de potência escolhido.

4.2 CENÁRIO 1 - Potência de eixo constante com FP=0,92 indutivo e depois capacitivo.

A potência utilizada foi $P_{eixo} = 2000$ kW e, inicialmente, deseja-se um fator de potência de 0,92 indutivo. Após 20 segundos, o FP passa a ser capacitivo. Os gráficos da potência de eixo e da velocidade do gerador são mostrados na figura 21.

Figura 21: Potência de eixo constante e velocidade de giro do rotor



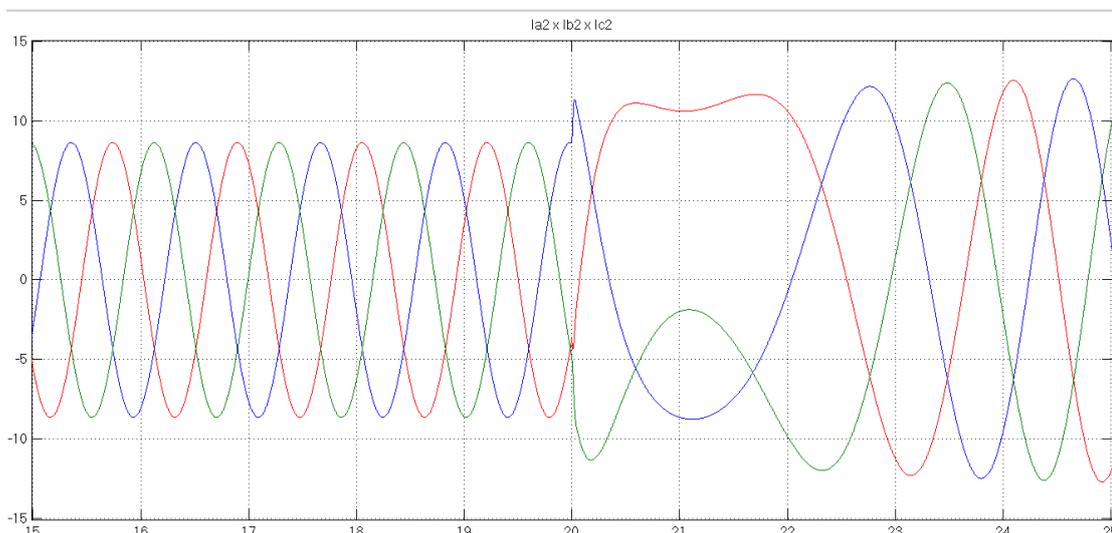
Inicialmente, o rotor do GIDA está girando na velocidade síncrona (188,5 rad/s – condição inicial escolhida no ambiente de simulação). A velocidade de giro começa a aumentar e, após 1 segundo, aproximadamente, começa a decrescer, até atingir uma velocidade em torno de 191 rad/s. Esse momento inicial de 1 segundo pode ser desconsiderado, pois é quando as correntes e tensões do gerador estão

buscando seus valores de regime, que não correspondem com os valores “setados” no programa.

Após 20 segundos, o fator de potência é chaveado de 0,92 indutivo para 0,92 capacitivo, mostrando uma diminuição da quantidade de giros em relação ao tempo. A potência reativa que, em um primeiro momento, era positiva (considerando a convenção do receptor), passa a ser negativa, ou seja, o estator passa a injetar potência reativa à rede elétrica. De acordo com a equação (53), se Q_r muda de sinal (positivo para negativo), então I_{rd} tem que ser positivo e maior do que $V_s / (\omega_s L_m)$.

As correntes rotóricas são mostradas na figura 22.

Figura 22: Correntes rotóricas – Potência de eixo constante



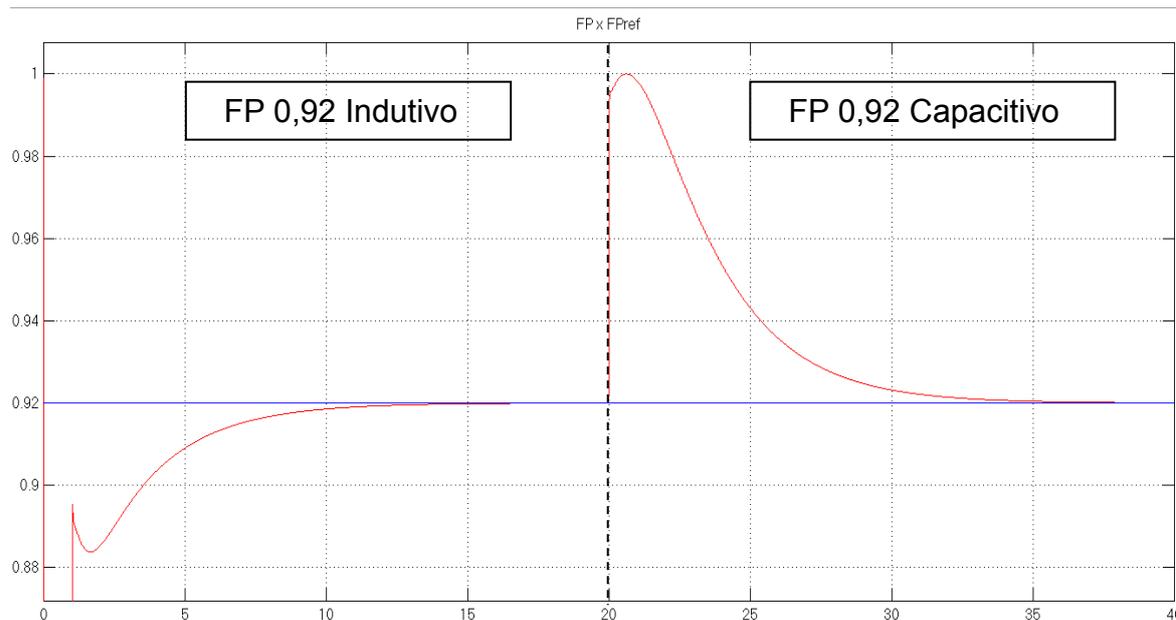
Na figura 22 são mostradas as correntes rotóricas um pouco antes da mudança de fator de potência indutivo para capacitivo, e um pouco depois. Percebe-se uma leve diminuição na frequência dessas correntes (a partir da alteração do FP indutivo para capacitivo), pois o módulo do escorregamento tornou-se um pouco menor, conforme pode ser inferido através da figura 21. A diminuição na velocidade de giro do rotor é justificada através da equação (8). Como a potência de eixo é constante e a velocidade angular do rotor diminuiu, essa redução é justificada com a diminuição do torque eletromagnético (seu módulo aumenta) – representado pela equação (16) - que por sua vez é justificada pelo aumento da corrente I_{rq} .

Outra mudança percebida através da figura 22 é um aumento na amplitude das correntes rotóricas, após a alteração do FP indutivo para capacitivo. Como o

sinal da potência reativa antes era positiva e passou a ser negativa (de acordo com a convenção utilizada), então a ampliação dessas correntes rotóricas é justificado com o crescimento das correntes I_{rd} e I_{rq} como pode ser observado mais adiante, nas figuras 27 e 28, respectivamente. A equação mostra que, para que Q_s seja negativo (fator de potência capacitivo), I_{rd} deve ser (49) positivo e maior do que $V_s/(w_s L_m)$. Matematicamente, para Q_s positivo (fator de potência indutivo), I_{rd} pode ser negativo, ou positivo e menor do que $V_s/(w_s L_m)$. As ilustrações a seguir irão mostrar outros resultados importantes obtidos com a simulação, incluindo o fator de potência.

A figura 23 mostra o fator de potência do estator (em vermelho) ao longo do tempo em relação ao valor de referência 0,92⁴ (em azul).

Figura 23: Fator de potência x Fator de potência de referência – Potência de eixo constante

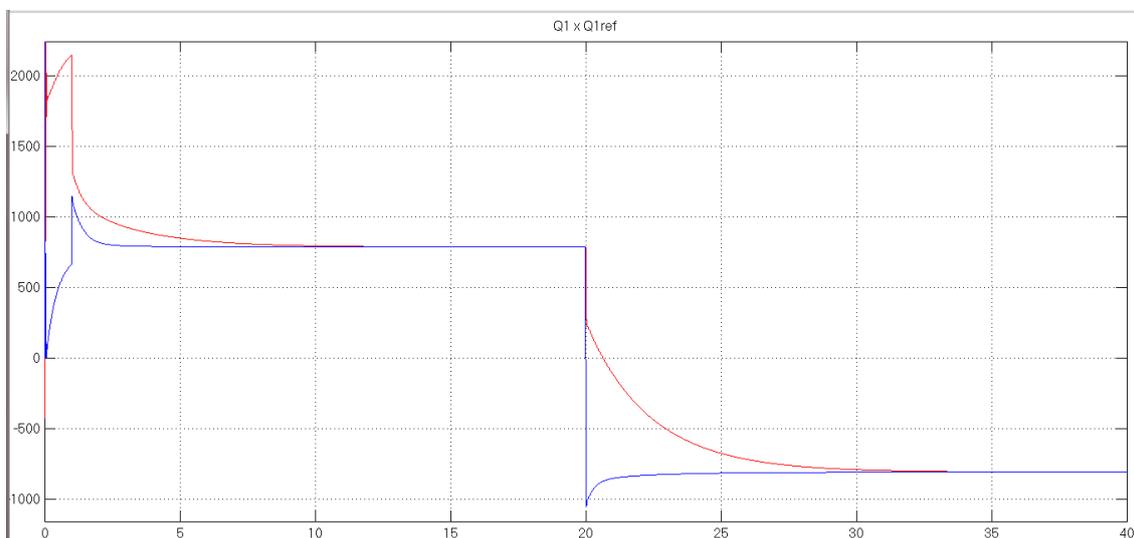


Nota-se que, antes dos 20 segundos, o FP se aproxima do valor indutivo de referência. Após esse instante, o FP passa a ser capacitivo e, mais uma vez, este valor se aproxima do valor desejado.

⁴ O fator de potência considerado nesse trabalho é sempre positivo, independente de ser indutivo ou capacitivo.

A figura 24 mostra a potência reativa, em vermelho, seguindo o valor de referência, em azul.

Figura 24: Potência Reativa do estator x Potência reativa desejada – Potência de eixo constante



Sabe-se que o FP de referência do estator gera uma potência reativa de referência, sendo esta dependente também da potência ativa da máquina de indução. Percebe-se, pela figura 24, que a potência reativa é positiva, quando o FP é indutivo, e negativa, quando capacitivo (após os 20 segundos). Como se pode observar, elas buscam o valor de referência.

Outra forma de visualizar se está havendo o controle adequado do fator de potência é através da defasagem entre a tensão e a corrente no estator, conforme mostram as figuras 25(a), 25(b), 26(a) e 26(b).

Figura 25: Potência de eixo constante - Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} – Fator de Potência Indutivo (a) Início; (b) Final

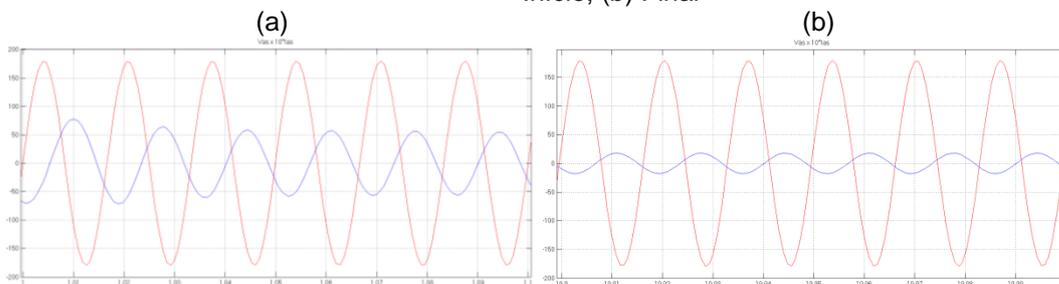
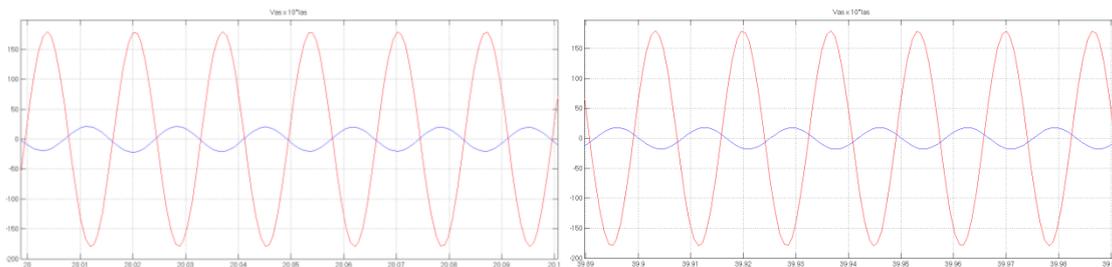


Figura 26: Potência de eixo constante - Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} – Fator de potência capacitivo (a) Início (b) Final

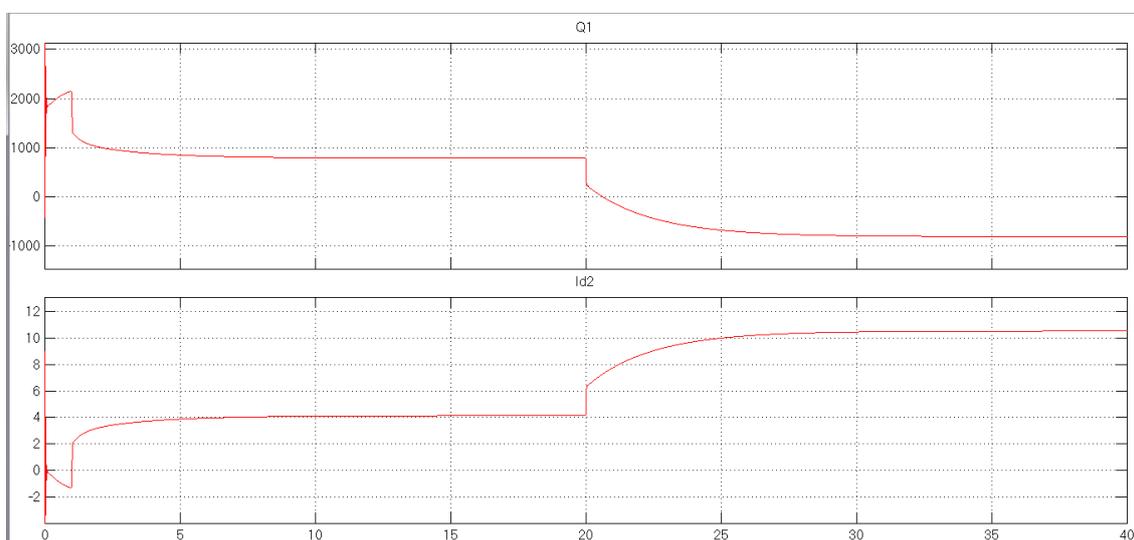
(a)

(b)



A figura 27 mostra a potência reativa do estator e a corrente de eixo direto I_{rd} do rotor.

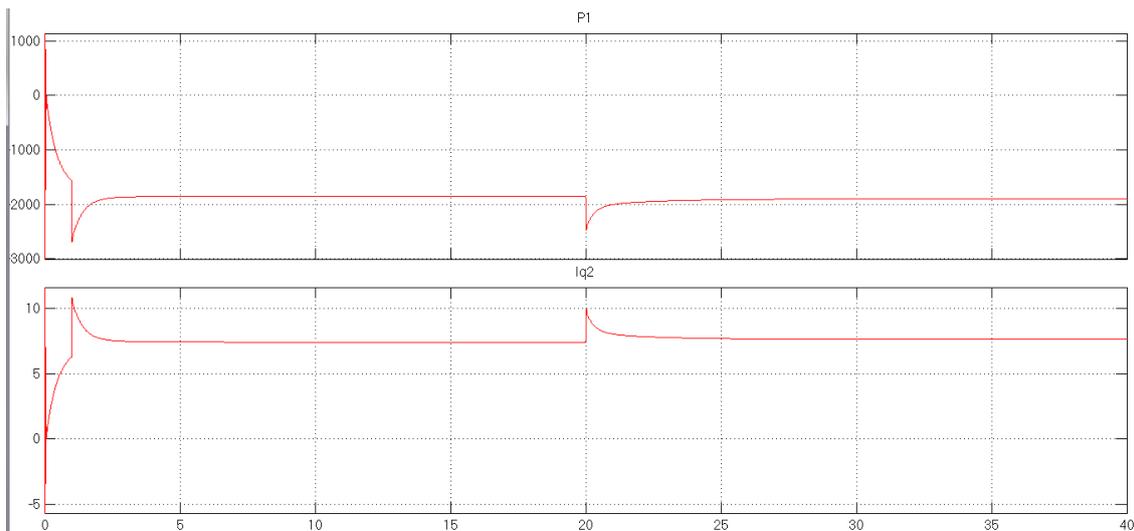
Figura 27: Potência Reativa x Corrente de eixo direto I_{rd} - Potência de eixo constante



Percebe-se que os gráficos de Q_s e I_{rd} são antissimétricos (desconsiderando as escalas, que são diferentes) em relação ao eixo das abscissas, o que corrobora a equação (49), que mostra que existe uma relação entre essas duas grandezas.

A figura 28 mostra os gráficos de P_1 e I_{rq} , respectivamente.

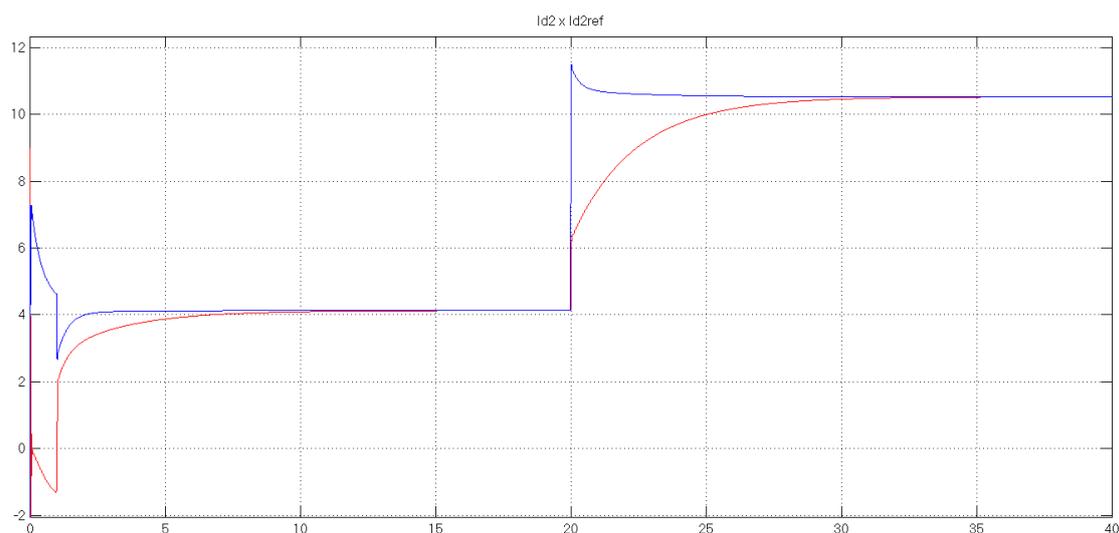
Figura 28: Potência Ativa x Corrente de eixo direto I_{rq} – Potência de eixo constante



Analogamente ao caso anterior, os gráficos de P_1 e I_{rq} são antissimétricos, mudando-se apenas a escala, o que mostra que existe uma relação entre essas duas grandezas, conforme equação (48).

Além das figuras 23 e 24 que mostram um controle adequado de potência reativa do estator, tem-se ainda a figura 29, que apresenta a corrente I_{rd} seguindo a referência I_{rdref} .

Figura 29: Correntes de eixo direto $I_{rd} \times I_{rdref}$



Percebe-se que o erro em regime é aproximadamente nulo.

4.3 CENÁRIO 2 – Potência decrescente de eixo e depois constante

A potência utilizada para este cenário foi a função a seguir:

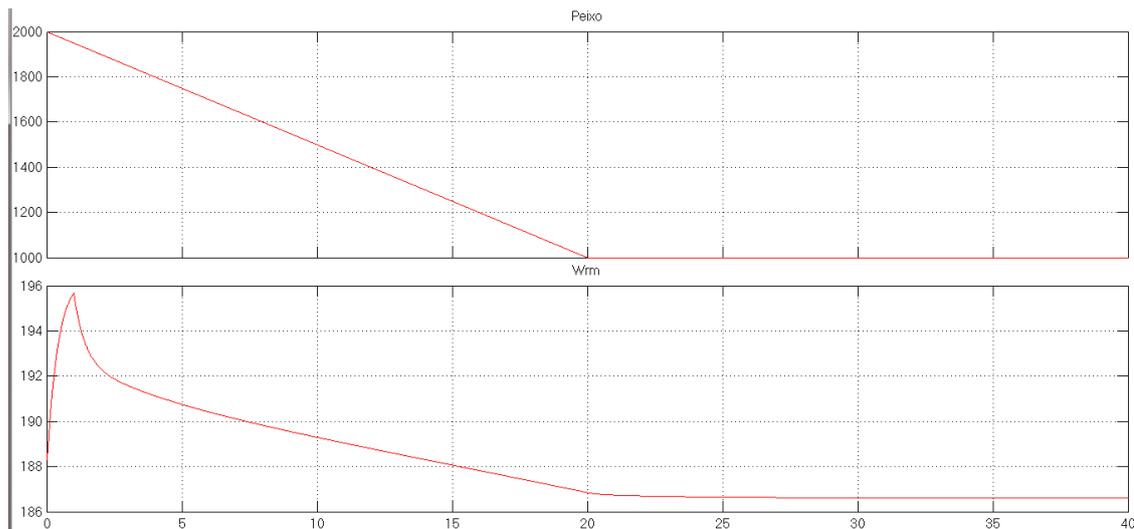
$$\begin{cases} P_{eixo}(t) = 2000 - 50 \cdot t; & 0 < t < 20 \\ P_{eixo}(t) = 1000; & 20 \leq t < 40 \end{cases} \text{ kW,}$$

Sendo t o tempo dado em segundos.

4.3.1 Fator de potência 0,92 capacitivo

A figura 30 mostra o gráfico da potência de eixo aplicada e da velocidade de giro do rotor.

Figura 30: Potência decrescente de eixo e velocidade de giro do rotor

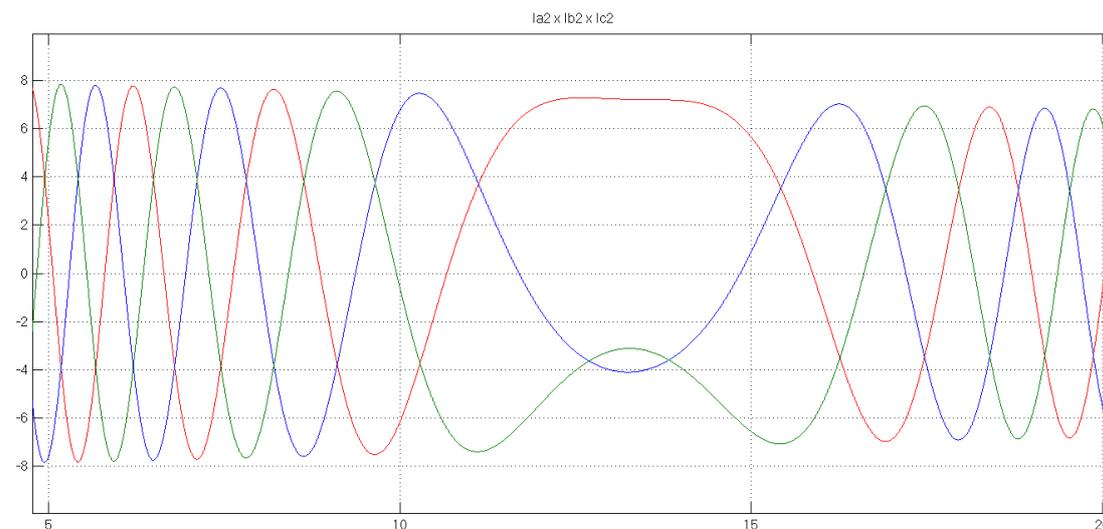


Vale ressaltar que o GIDA está “setado” no programa para girar, inicialmente, à velocidade síncrona (188,5 rad/s). Nota-se que, a velocidade angular do rotor aumenta até, aproximadamente, 1 segundo, e depois começa a decair. Na maioria das vezes esse tempo inicial vai ser desconsiderado, pois o GIDA não está operando ainda com os valores em regime.

A figura 31 mostra as correntes rotóricas nos instantes entre 5 e 15 segundos. Quando a velocidade de giro do rotor está acima da velocidade síncrona, percebe-se uma diminuição da frequência à medida que a potência de eixo diminui. Já quando o GIDA opera no regime subsíncrono, ocorre o contrário: a frequência rotórica

aumenta à medida que a potência de eixo diminui. Inicialmente, a máquina de indução opera no regime supersíncrono (escorregamento negativo). Portanto, quando a velocidade angular do rotor diminui, o módulo do escorregamento fica menor e a frequência rotórica também. Enquanto que, se o gerador funciona no modo subsíncrono (escorregamento entre 0 e 1), quando o GIDA diminui a sua velocidade, o escorregamento aumenta e a sua frequência rotórica também.

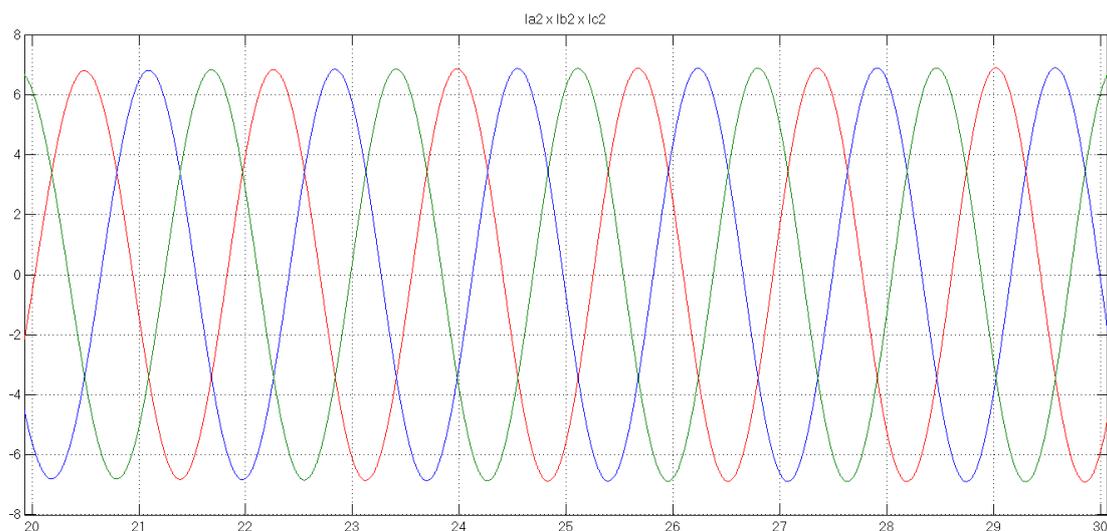
Figura 31: Correntes rotóricas entre 5 e 20 segundos



Outro ponto observado é que a amplitude das correntes diminui quando a potência de eixo decresce. É válido ressaltar também que não foi mostrado o gráfico por completo, em todo o período simulado (40 segundos), pois os gráficos das correntes do rotor não seriam tão bem visualizados.

As correntes rotóricas a partir do momento em que a potência de eixo torna-se constante são mostradas na figura 32.

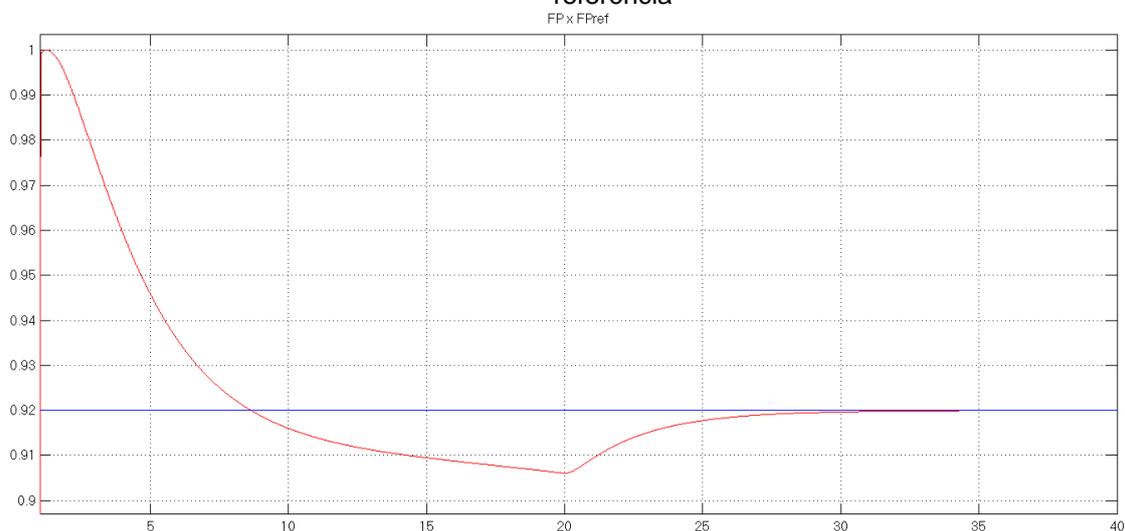
Figura 32: Correntes rotóricas entre 20 e 30 segundos



Percebe-se que, nesse caso, a amplitude e a frequência das correntes rotóricas são constantes.

A figura 33 mostra os gráficos do fator de potência medido, em vermelho, e do valor de referência, em azul.

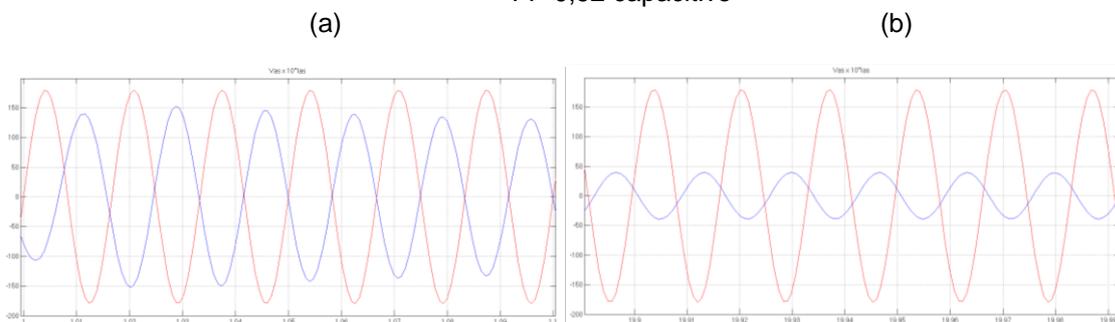
Figura 33: Potência decrescente de eixo – Fator de Potência medido x Fator de Potência de referência



Nota-se que, quando a potência de eixo é decrescente, o fator de potência medido também decresce. Porém, quando a potência de eixo torna-se constante, o fator de potência volta a crescer e a buscar o seu valor de referência.

Outra forma de se observar o fator de potência é através das correntes e tensões do estator, conforme mostram as figuras 34(a) e 34(b).

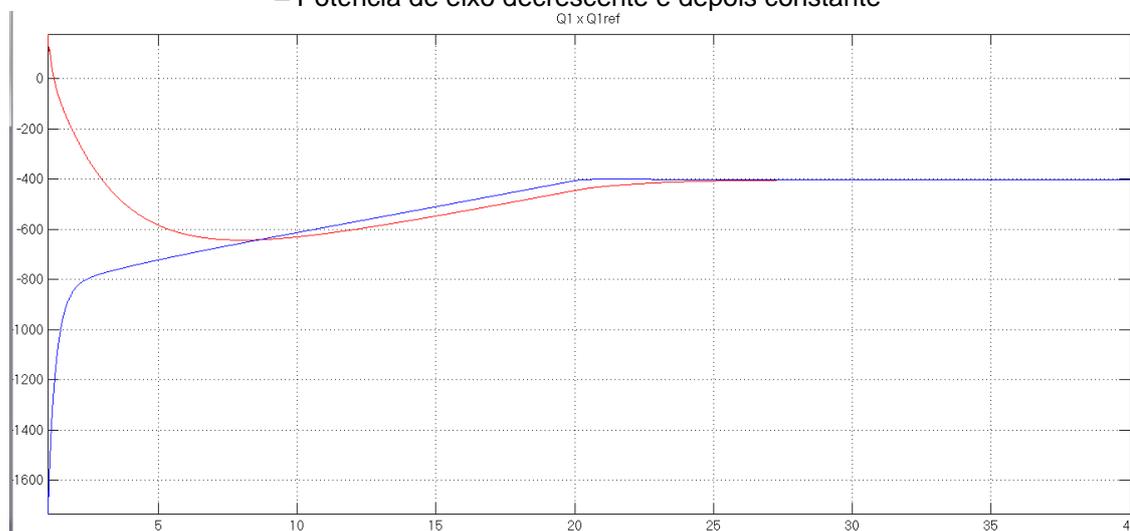
Figura 34: Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} : (a) Início; (b) Final – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 capacitivo



Como o sistema trifásico está balanceado, foram apresentadas apenas a corrente e a tensão da fase “a” do estator.

A figura 35 mostra o comportamento da potência reativa em relação ao seu valor de referência.

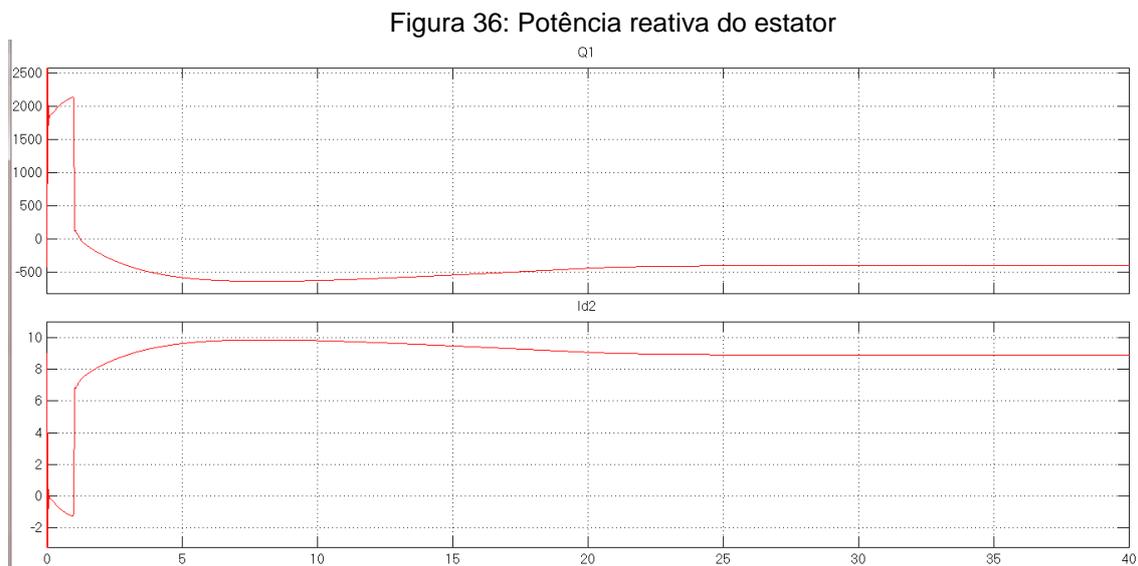
Figura 35: Potência Reativa do Estator x Potência Reativa de Referência do Estator (0,92 Capacitivo) – Potência de eixo decrescente e depois constante



Nota-se que a potência reativa tende a buscar o seu valor de referência. Quando a potência de eixo é decrescente, o módulo da potência reativa diminui, o que condiz com a realidade, pois, para um fator de potência constante e uma potência ativa decrescente, a potência reativa também se reduz, em módulo. Para uma potência ativa e um FP que não variam com o tempo, a potência reativa

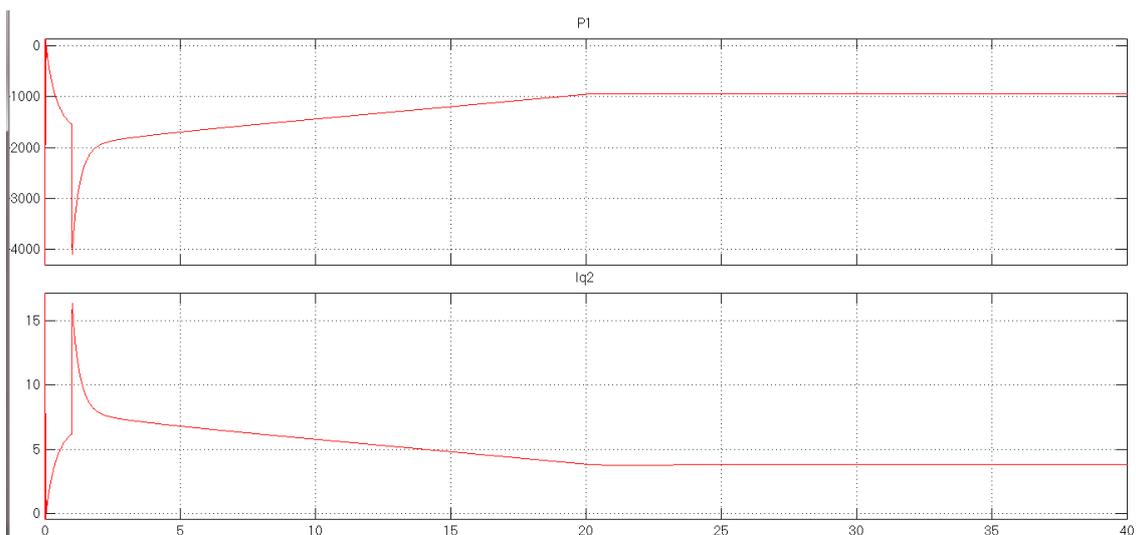
também deve ser constante. O sinal negativo da potência reativa, segundo a convenção utilizada, significa que o fator de potência é capacitivo.

A figura 36 mostra duas variáveis: a potência reativa do estator e a corrente de eixo direto do rotor.



Nota-se uma antissimetria entre os dois gráficos, desprezando-se as escalas dos eixos das coordenadas, o que corrobora a equação (49).

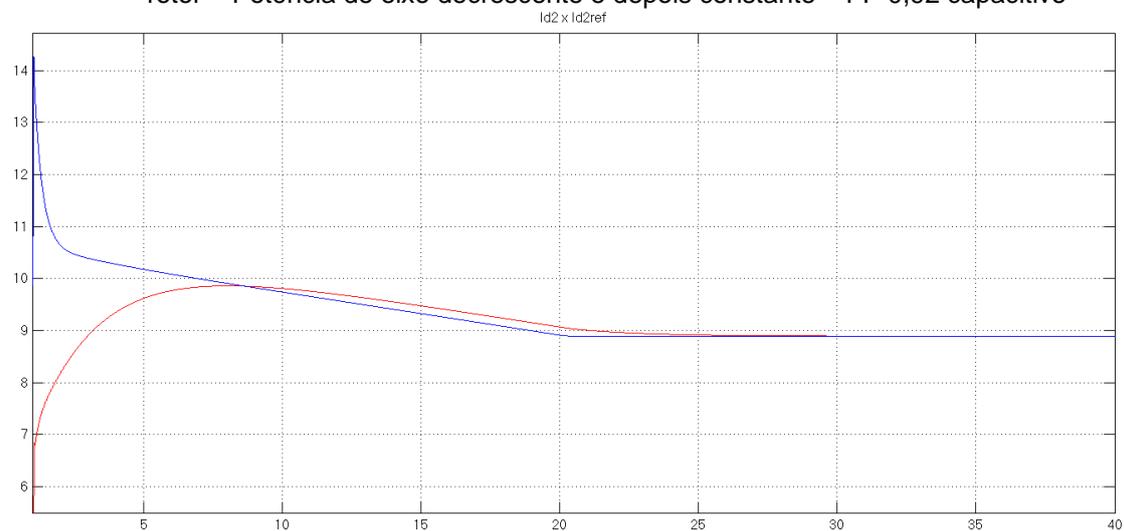
A figura 37 mostra o comportamento da potência ativa e da corrente de eixo em quadratura do rotor.



Assim como no cenário 1 simulado, percebe-se que existe uma antissimetria entre essas duas variáveis, o que condiz com a equação (48).

Por último, são apresentadas as correntes de eixo direto do rotor mensurada e de referência, conforme mostra a figura 38.

Figura 38: Correntes de eixo direto mensurada do rotor x Corrente de eixo de direto de referência do rotor – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 capacitivo

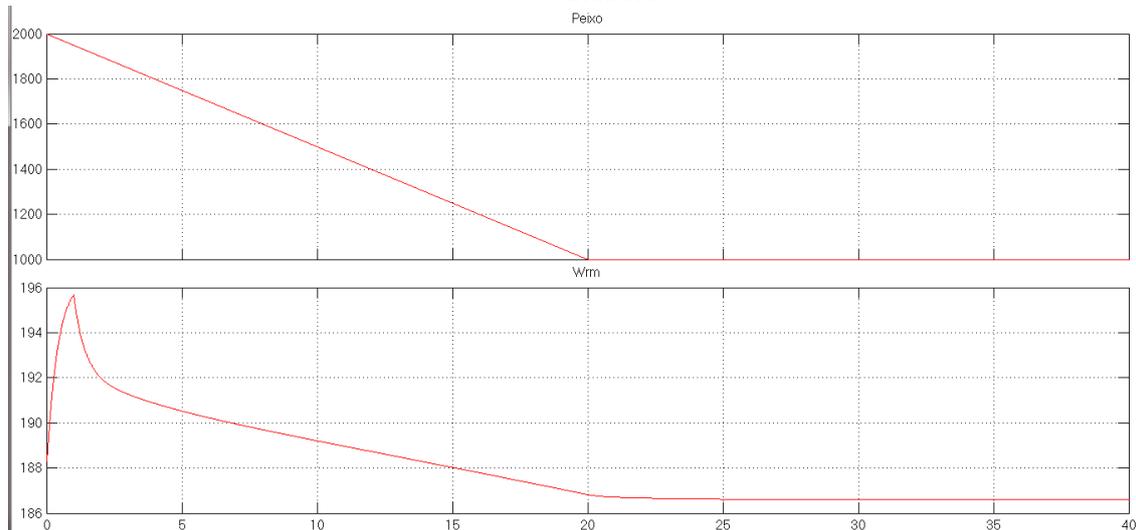


Percebe-se um erro de regime nulo.

4.3.2 Com fator de potência 0,92 indutivo

A figura 39 apresenta a potência de eixo e a velocidade de giro do rotor.

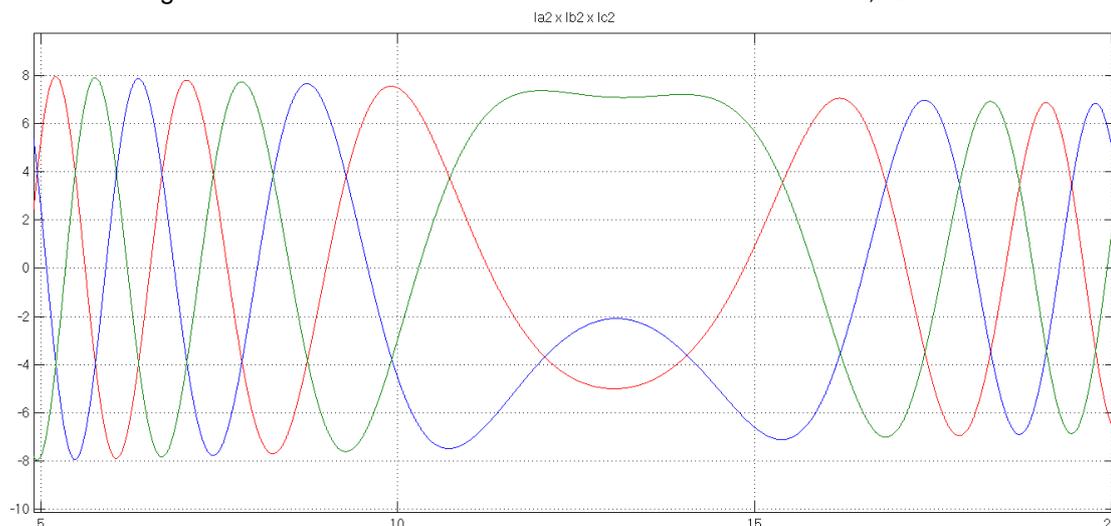
Figura 39: Potência decrescente de eixo e depois constante x velocidade de giro do rotor – FP 0,92 Indutivo



Mais uma vez, o tempo inicial em torno de 1 segundo, em que a velocidade angular do rotor aumenta, vai ser desconsiderado na maioria dos gráficos a seguir, para esse cenário, pois a máquina foi “setada” no programa com valores que não correspondem às grandezas elétricas produzidas pela máquina, em estado de regime.

A figura 40 mostra o comportamento das correntes rotóricas no momento em que a potência de eixo é decrescente.

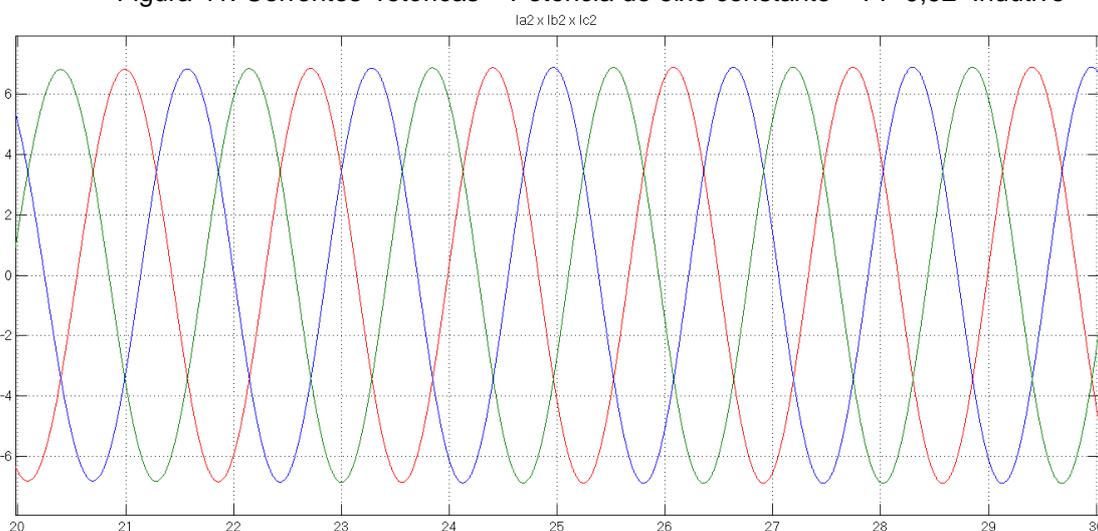
Figura 40: Correntes rotóricas – Potência decrescente – FP 0,92 Indutivo



Percebe-se, pela figura 40, que a frequência rotórica diminui na velocidade supersíncrona e aumenta em regime subsíncrono e que a amplitude vai decrescendo ao longo do tempo. A variação na frequência é justificada pelo escorregamento da máquina. Embora o escorregamento na velocidade supersíncrona seja negativo, o seu módulo reduz-se à medida que a potência de eixo decresce e, conseqüentemente, a frequência também diminui. Para o regime subsíncrono, o escorregamento é aumentado, logo, a frequência rotórica também.

A figura 41 mostra as correntes rotóricas quando a potência de eixo é constante.

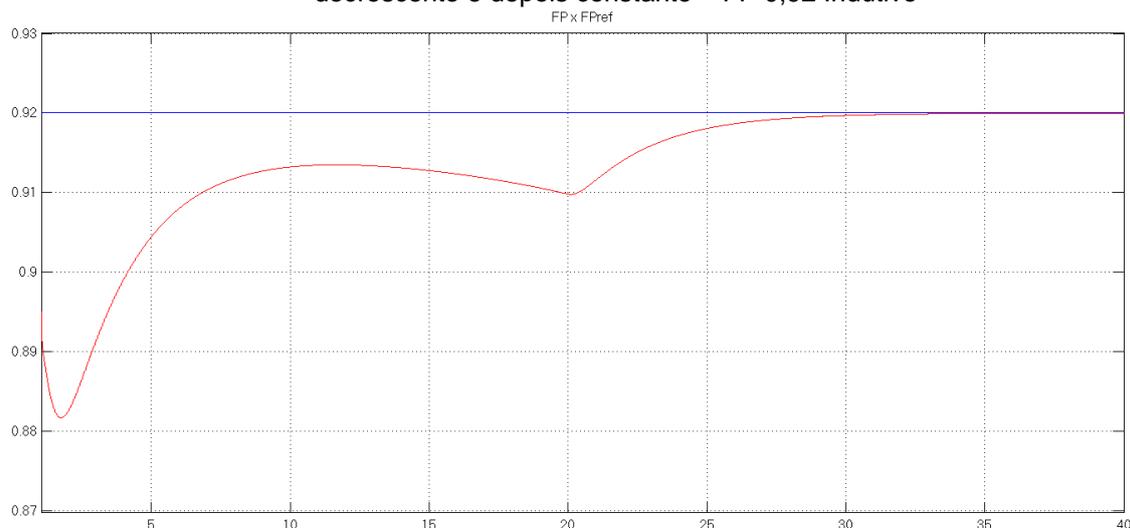
Figura 41: Correntes rotóricas – Potência de eixo constante - FP 0,92 Indutivo



Nota-se, nesse caso, que a amplitude e a frequência das correntes rotóricas mantêm-se constante.

A figura 42 mostra o comportamento do fator de potência do estator, em vermelho, e do seu valor de referência, em azul.

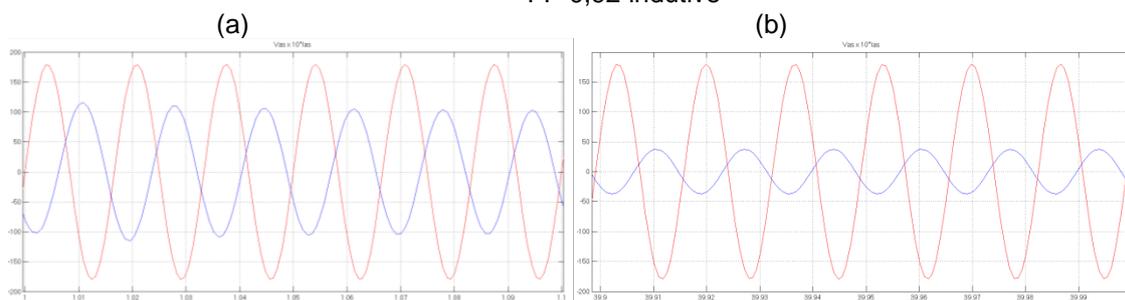
Figura 42: Fator de Potência mensurado x Fator de Potência de Referência – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo



Percebe-se que, inicialmente, o fator de potência busca o valor que é para ser atingido. Porém, a partir de certo momento, passa a não mais convergir, quando a potência de eixo é decrescente. A partir do instante que essa potência começa a ser constante, o FP medido volta a “perseguir” o seu valor de referência. Na prática, o PI deve ser utilizado para uma faixa de velocidade.

Outra forma de visualizar o fator de potência é através da tensão e da corrente de uma das fases do estator, como mostra a figura 43.

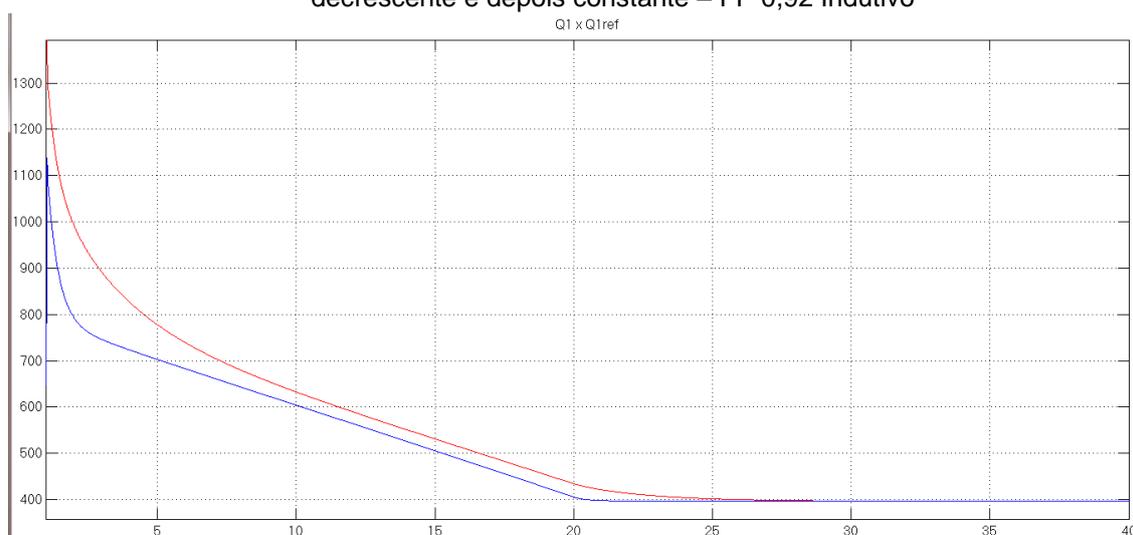
Figura 43: Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} : (a) Início; (b) Final – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 indutivo



Para esse caso, foi escolhida a fase “a” do estator.

A figura 44 mostra a potência reativa do estator, em vermelho, e o seu *set-point*, em azul.

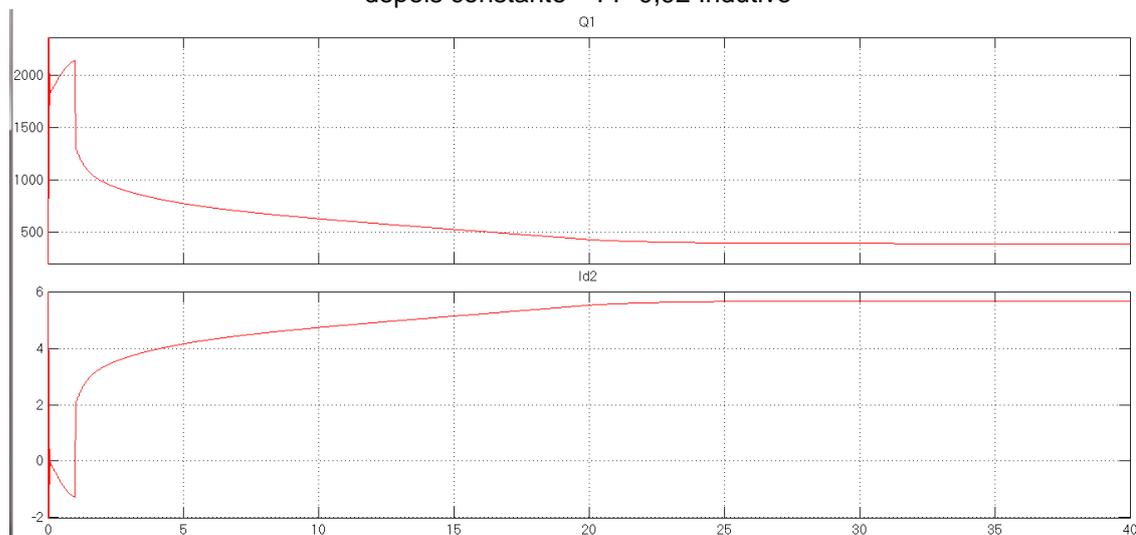
Figura 44: Potência reativa mensurada x Potência reativa de referência - Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo



Nota-se que, quando a potência de eixo torna-se constante, a potência reativa consegue convergir para o valor de referência. Vale ressaltar também que a potência reativa diminui à medida que a potência de eixo decresce, para que o fator de potência permaneça constante.

A figura 45 mostra o comportamento da potência reativa do estator e da corrente de eixo de direto do rotor.

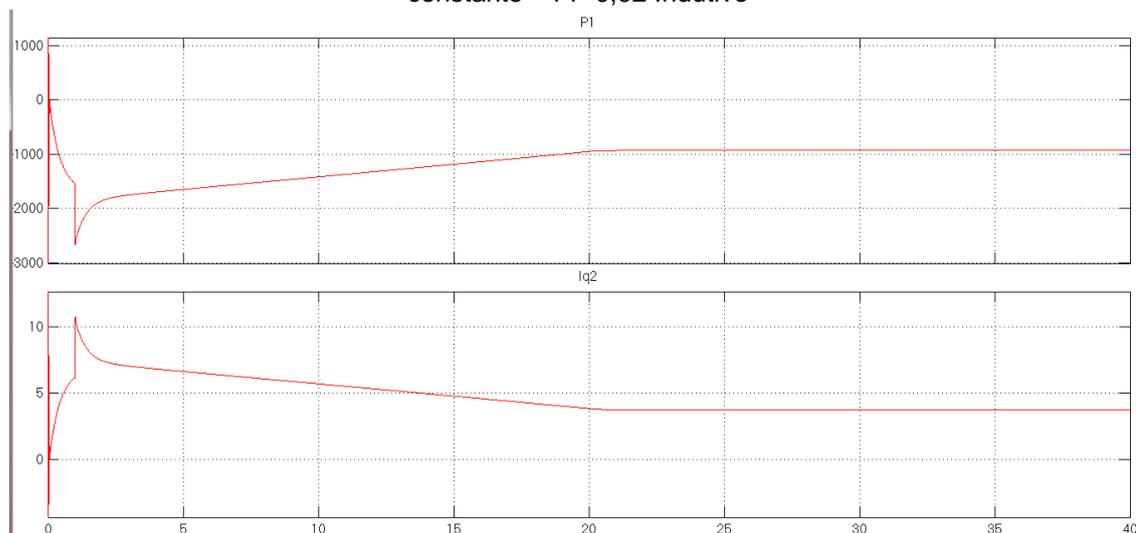
Figura 45: Potência Reativa x Corrente de eixo direto do rotor – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo



Percebe-se que os gráficos são antissimétricos, desprezando as escalas dos eixos das coordenadas, o que corrobora a equação (49).

A figura 46 apresenta a potência ativa e a corrente de eixo em quadratura do rotor.

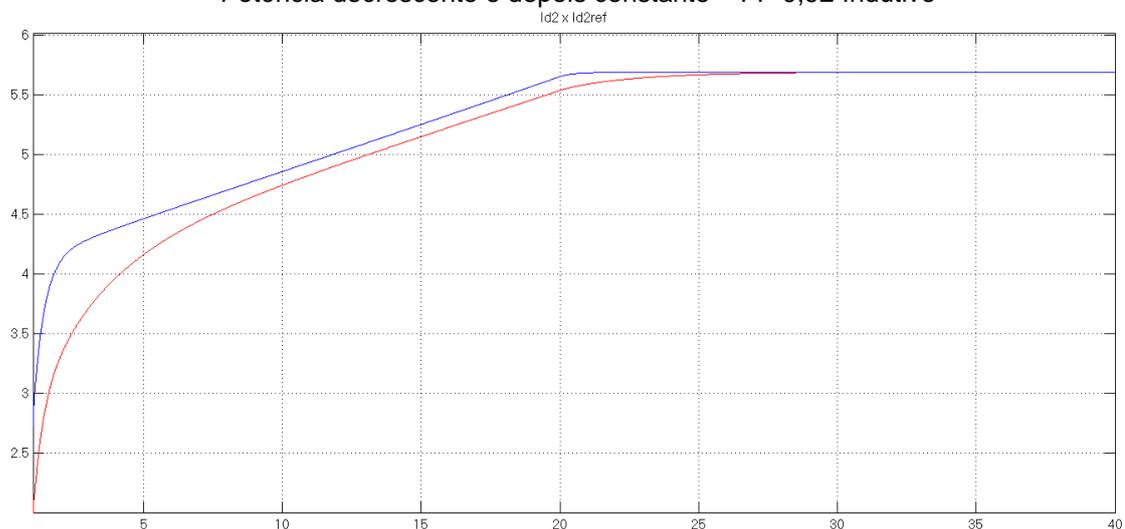
Figura 46: Potência Ativa x Corrente de eixo em quadratura do rotor – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo



Nota-se, novamente, que os gráficos são antissimétricos, o que condiz com a equação (48).

A figura 47 mostra as correntes de eixo direto do rotor (em vermelho) e de referência (em azul).

Figura 47: Corrente de eixo direto do rotor mensurada x Corrente de eixo direto do rotor de referência – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 Indutivo

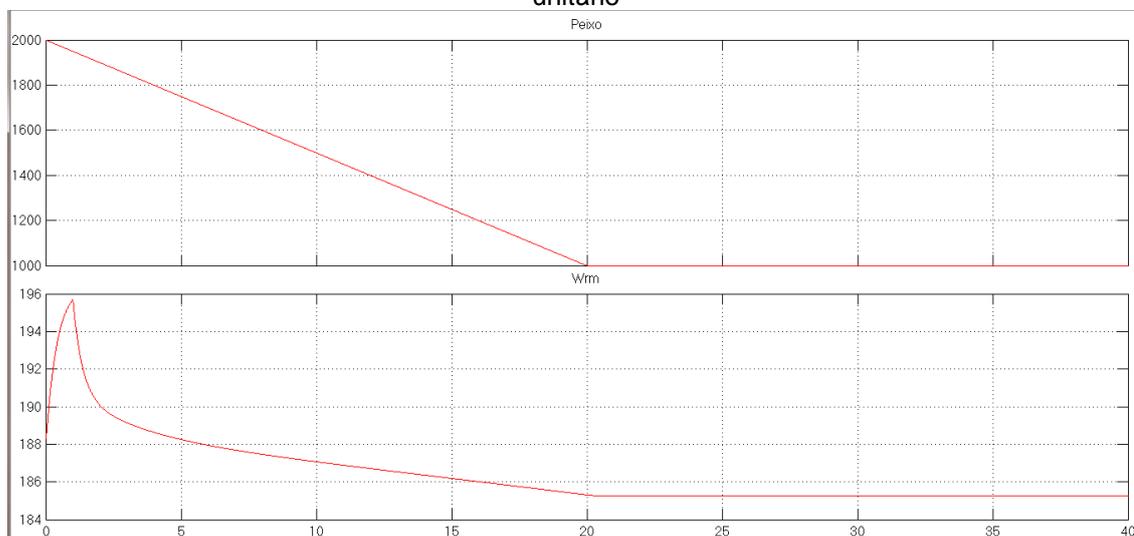


Nota-se que o erro em regime é nulo.

4.3.3 Com fator de potência unitário

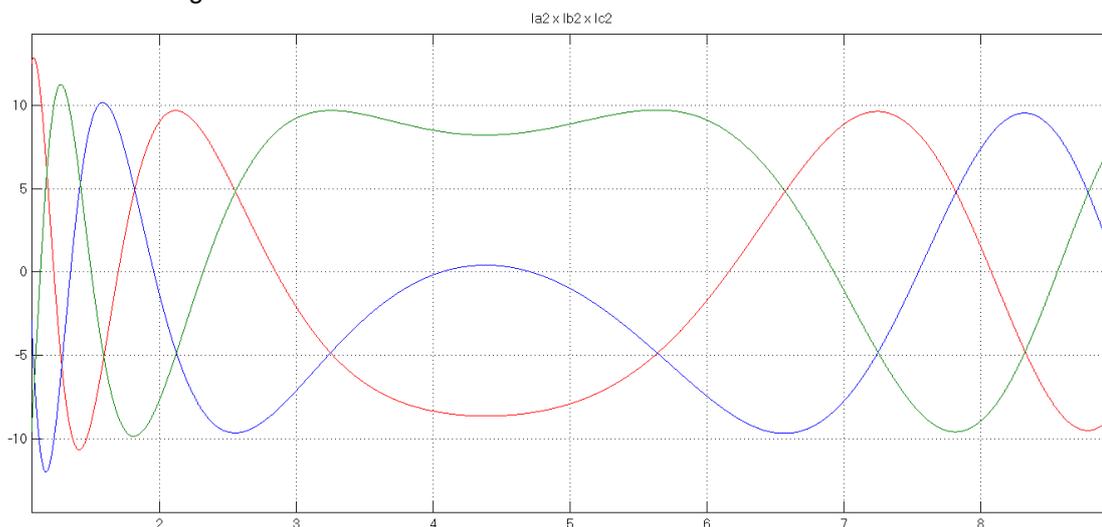
A figura 48 mostra a potência de eixo e a velocidade rotórica.

Figura 48: Potência decrescente de eixo e depois constante x velocidade de giro do rotor – FP unitário



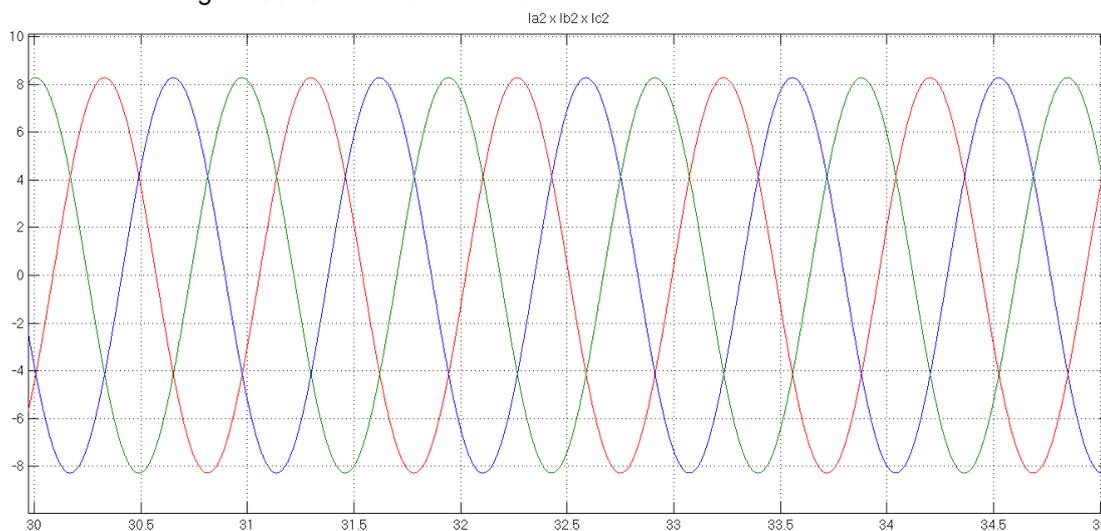
Novamente, o segundo inicial pode ser desconsiderado, pelos mesmos motivos relatados nas seções 4.3.1 e 4.3.2. A figura 49 mostra as correntes rotóricas em um determinado período da simulação.

Figura 49: Correntes rotóricas – Potência decrescente – FP unitário



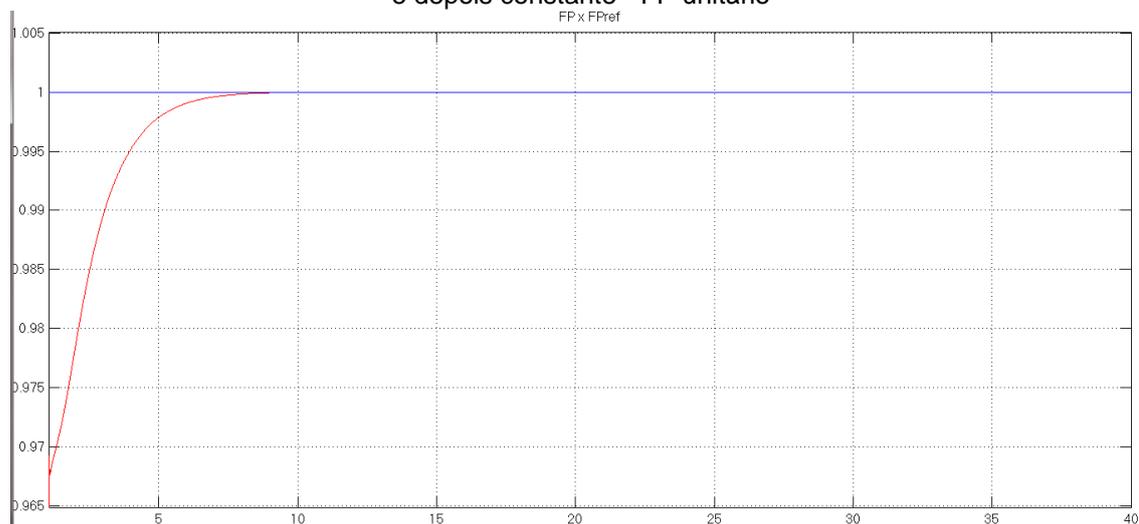
Percebe-se, mais uma vez, que a amplitude das correntes diminui à medida que a potência de eixo decresce e a frequência é reduzida, no regime supersíncrono, e aumentada, quando opera com velocidade subsíncrona. A figura 50 mostra as correntes rotóricas quando a potência de eixo é constante.

Figura 50: Correntes rotóricas – Potência constante – FP unitário



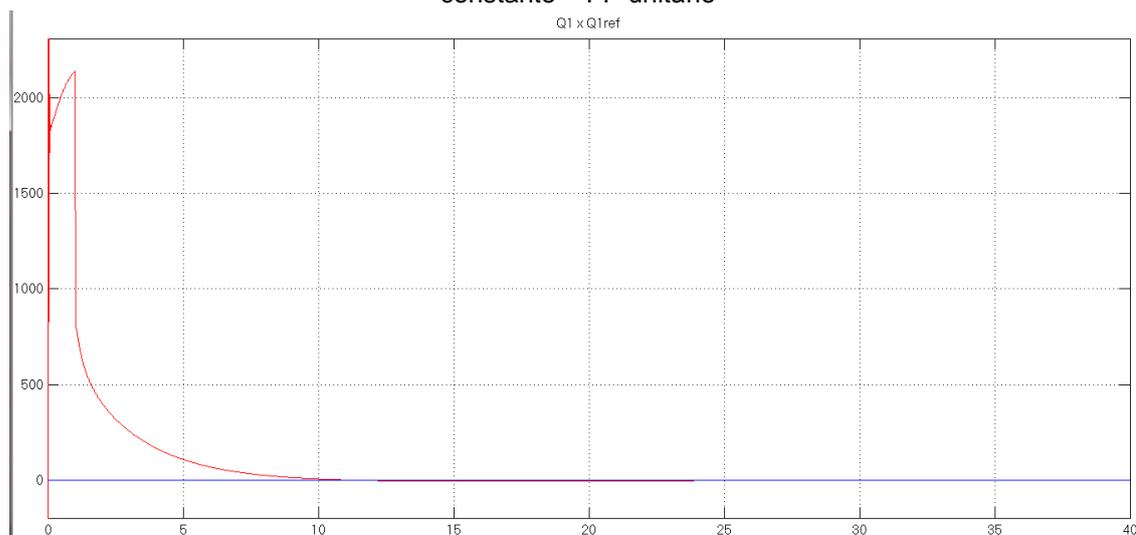
Para o caso anterior, a frequência e a amplitude das correntes rotóricas são constantes. A figura 51 apresenta o fator de potência medido (em vermelho) e o seu *set-point* (em azul).

Figura 51: Fator de potência medido x Fator de Potência de referência – Potência variável de eixo e depois constante - FP unitário



A figura 52 mostra a potência reativa medida do estator (em vermelho) e o seu valor de referência (em azul).

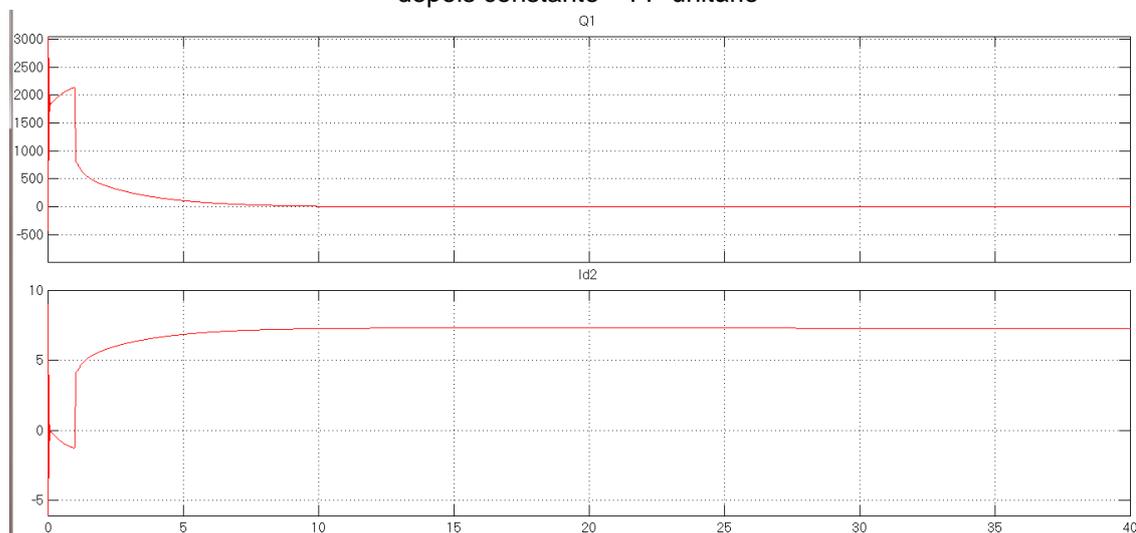
Figura 52: Potência Reativa medida x Potência Reativa de referência – Potência reativa e depois constante – FP unitário



Nota-se que a potência reativa tende ao seu *set-point*.

A figura 53 apresenta a potência reativa do estator e a corrente de eixo direto em quadratura do rotor.

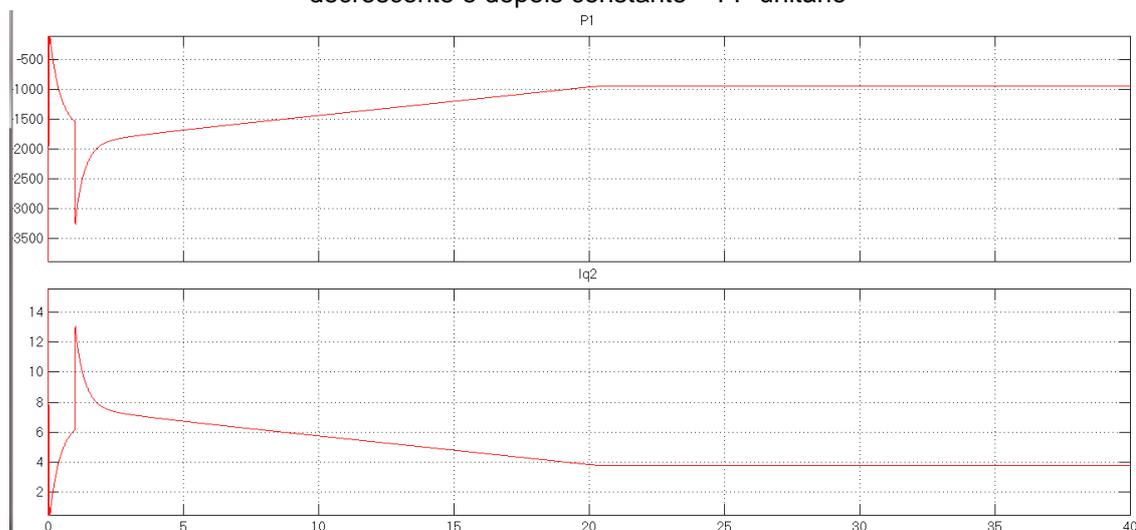
Figura 53: Potência reativa do estator x Corrente de eixo direto do rotor – Potência decrescente e depois constante – FP unitário



Os resultados são análogos aos das seções 4.3.1 e 4.3.2.

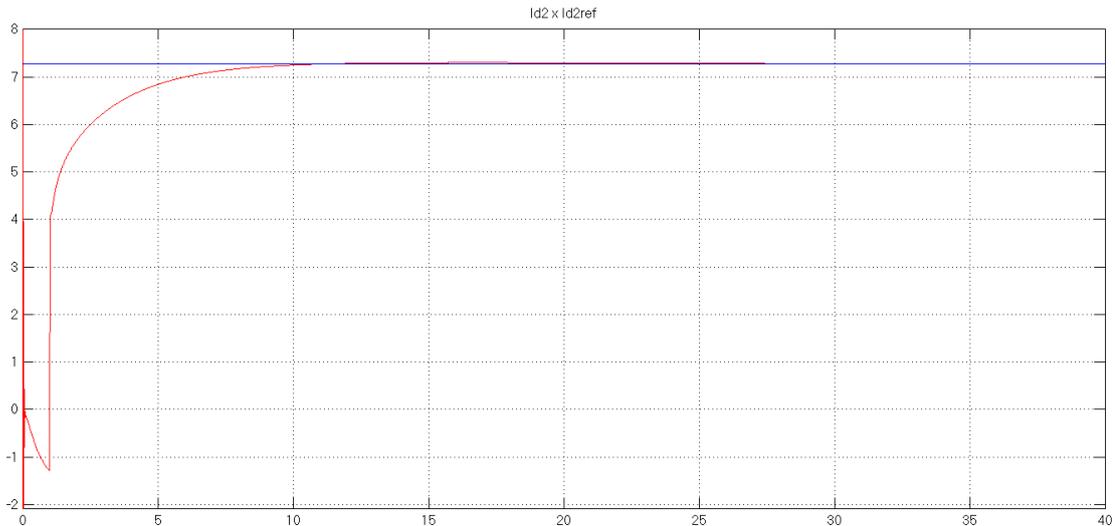
A figura 54 mostra a potência ativa do estator e a corrente de eixo em quadratura do rotor.

Figura 54: Potência ativa do estator x Corrente de eixo em quadratura do rotor – Potência de eixo decrescente e depois constante – FP unitário



Pelos mesmos motivos citados nas seções 4.3.1 e 4.3.2, os gráficos da potência ativa do estator e da corrente de eixo em quadratura do rotor são antissimétricos. Por último, a figura 55 mostra as correntes mensurada e de referência de eixo direto do rotor.

Figura 55: Corrente mensurada de eixo direto do rotor x Corrente de referência de eixo direto do rotor – Potência decrescente e depois constante – FP unitário



Nota-se que o erro em regime entre as correntes é nulo.

4.4 CENÁRIO 3 – Mudança Abrupta de potência representando uma rajada de vento, com fator de potência 0,92 indutivo.

Uma rajada de vento representa uma mudança abrupta de torque aplicado ao eixo da turbina eólica, ocasionando um aumento (caso o torque seja aplicado no mesmo sentido de giro) ou diminuição da velocidade (torque no sentido oposto ao giro) de rotação do rotor do gerador.

A função da potência externa utilizada para esse cenário foi:

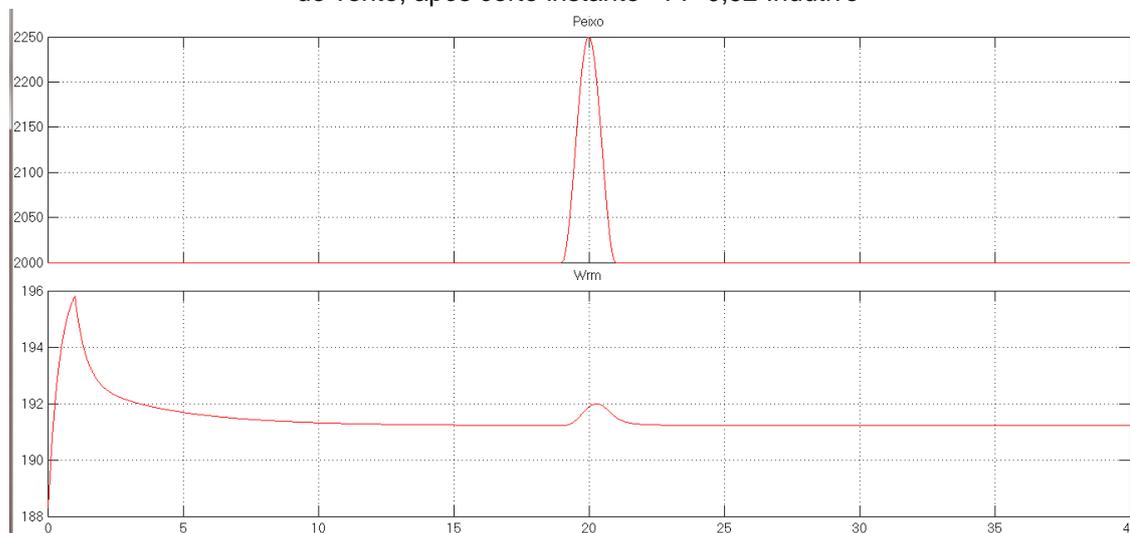
$$P_{ext} = \begin{cases} P_{const}, & \text{para } 0 < t \leq 19 \text{ s} \\ P_{const} + P_{var}, & \text{para } 19 \text{ s} < t < 21 \text{ s} \\ P_{const}, & \text{para } 21 \text{ s} < t < 40 \text{ s} \end{cases}$$

Com

$$P_{const} = 2 \text{ kW}$$

$$P_{var} = 0,125 \cdot \{1 - \cos[\pi \cdot (t - 19)]\} \text{ kW}$$

Figura 56: Potência externa x Velocidade angular do rotor – Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante - FP 0,92 Indutivo

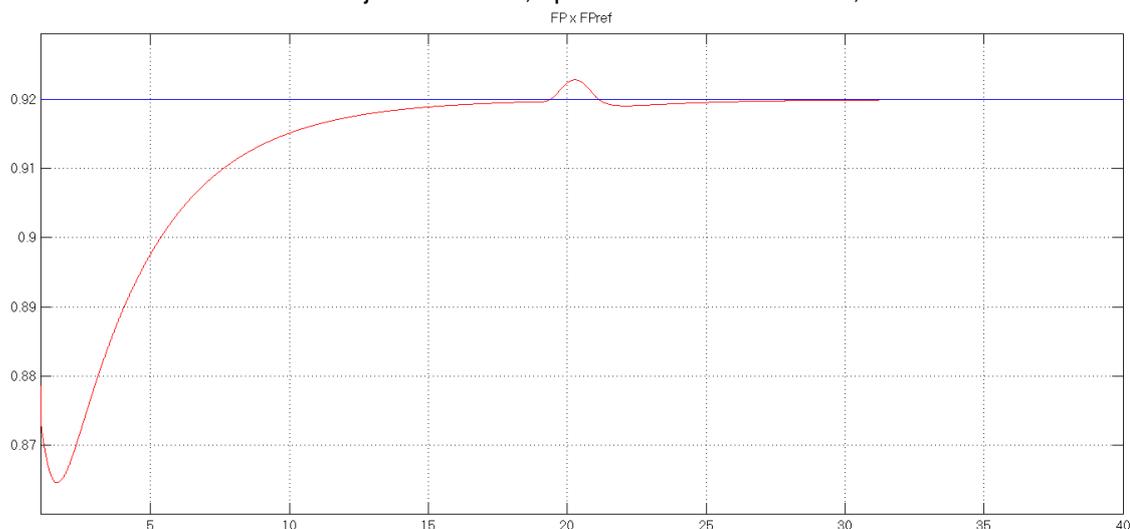


Apesar de ter sido aplicada uma mudança abrupta na potência de eixo rotor, a figura 56 mostrou que houve uma alteração pouco significativa na velocidade de giro do rotor.

O segundo inicial pode ser desconsiderado, pelo mesmo motivo citado nos cenários 1 e 2.

A figura 57 mostra os comportamentos do fator de potência do estator e do seu valor de referência.

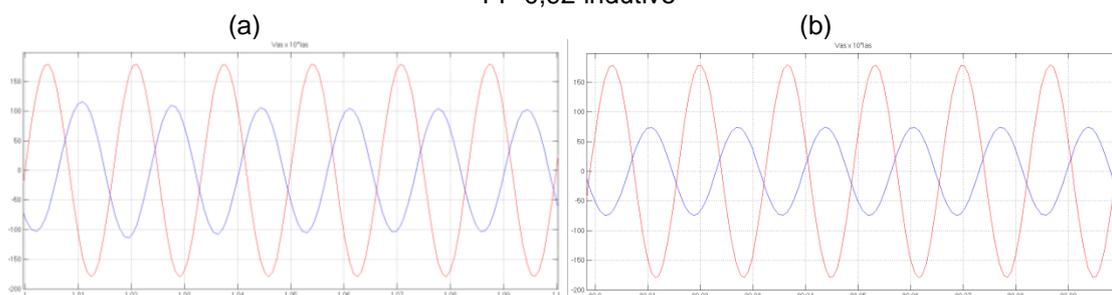
Figura 57: Fator de potência do estator x Fator de Potência de Referência – Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo



É notável, pela figura 57, o momento em que ocorre a rajada de vento (entre 19 e 21 segundos). Porém, essa “perturbação” não prejudica o sistema a ponto de instabilizá-lo. Cessado esse transitório, o fator de potência volta a convergir para o *set-point*.

A figura 58 apresenta como a corrente do estator está em atraso em relação à sua tensão, no início e no final da simulação.

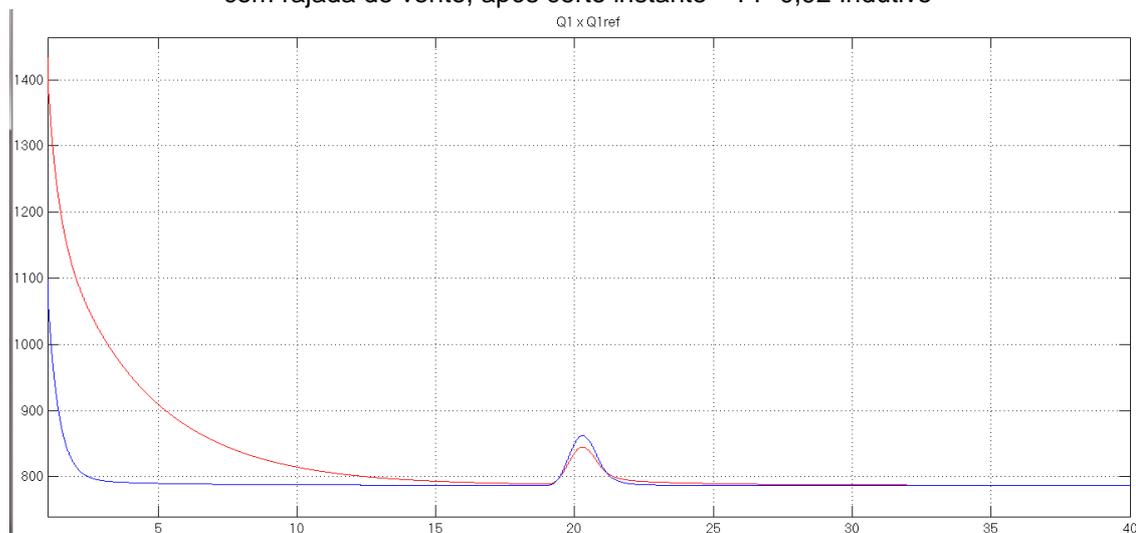
Figura 58: Defasagem entre V_{s1} e I_{s1} : (a) Início; (b) Final – Potência decrescente e depois constante – FP 0,92 indutivo



Mais uma vez, como o sistema trifásico é balanceado, é necessário apenas apresentar apenas a corrente e a tensão de uma das fases do estator, nesse caso a fase “a”.

A figura 59 mostra a potência reativa do estator e o seu valor de referência.

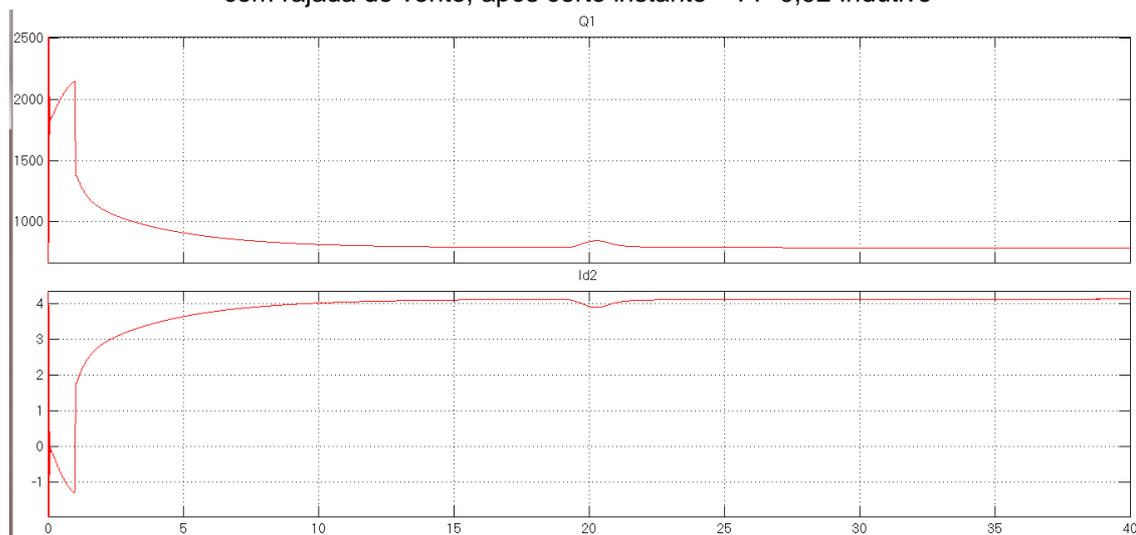
Figura 59: Potência reativa do estator x Potência Reativa de Referência – Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo



No momento da ocorrência da rajada de vento, o valor de referência também varia, para que o fator de potência permaneça constante.

A figura 60 mostra a potência reativa do estator e a corrente de eixo em quadratura do rotor, ao longo do tempo.

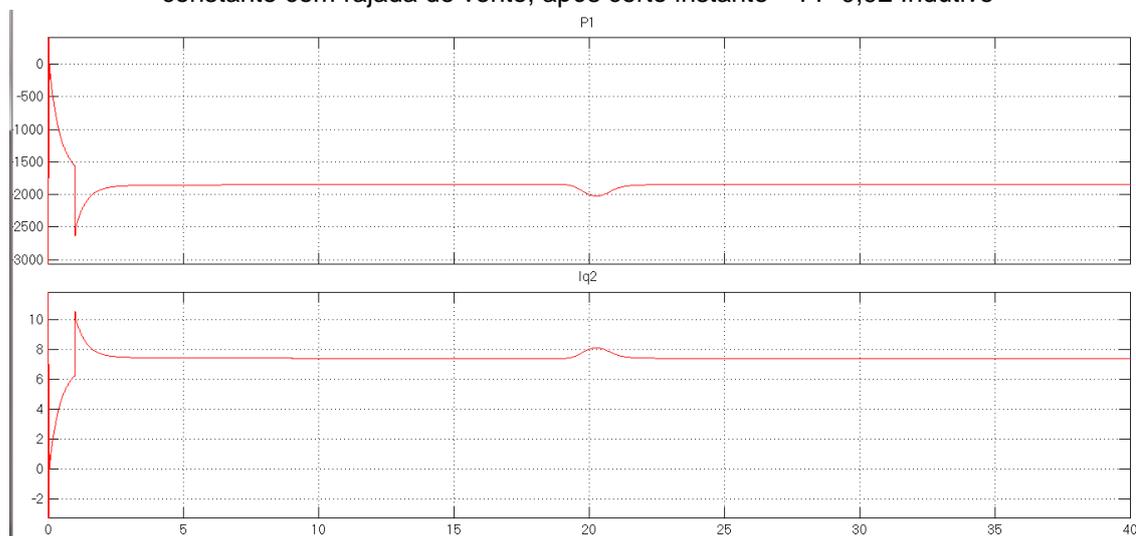
Figura 60: Potência Reativa do Estator x Corrente de eixo direto do rotor - Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo



Novamente, os gráficos da potência reativa e da corrente de eixo direto do rotor são antissimétricos, assim como nos cenários 1 e 2, o que está condizente com a equação (49).

A figura 61 mostra o comportamento da potência ativa do estator e da corrente de eixo em quadratura do rotor.

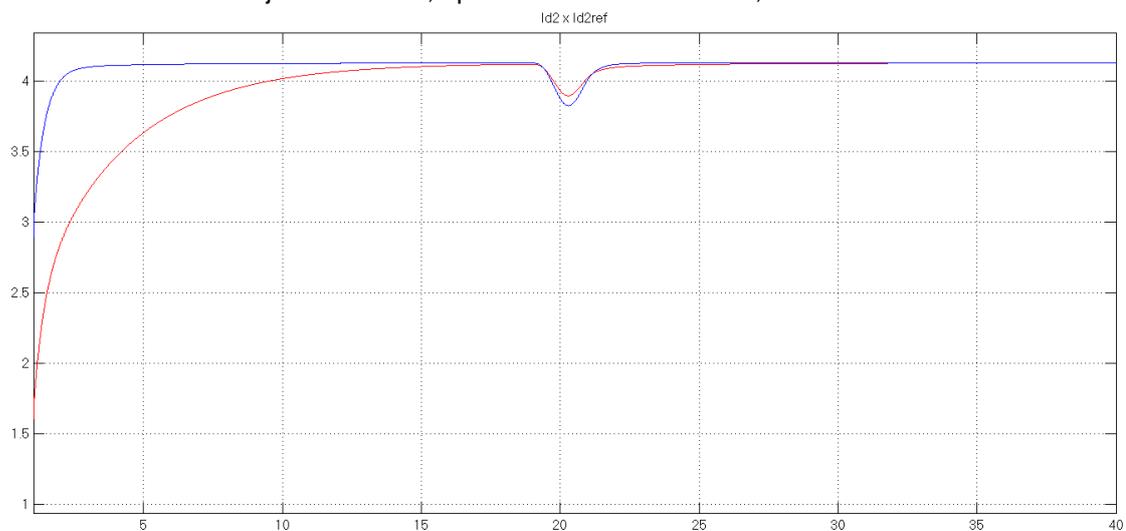
Figura 61: Potência ativa do estator x Corrente de eixo em quadratura do rotor - Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo



Analogamente ao caso anterior, a potência ativa do estator e a corrente de eixo em quadratura do rotor são antissimétricos, comprovando o que está escrito na equação (48).

Outra forma de visualizar indiretamente como se comporta o fator de potência do estator em relação ao *set-point* é através da comparação entre as correntes de eixo direto do rotor da máquina em relação ao seu valor de referência, conforme mostra figura 62.

Figura 62: Correntes de eixo direto do rotor de referência e medida - Potência de eixo constante com rajada de vento, após certo instante – FP 0,92 Indutivo



Os valores em vermelho são referentes à corrente mensurada e os em azul são as grandezas de referência. Nota-se que o erro em regime permanente é nulo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desse trabalho foi feita uma revisão bibliográfica das principais técnicas e tecnologias existentes e utilizadas em turbinas eólicas, bem como os seus componentes. Porém, essa pesquisa se ateve principalmente a um equipamento da turbina, de suma importância para esta, que foi o gerador. Além disso, foi escolhido um tipo e uma topologia específica: o gerador de indução duplamente alimentado (GIDA).

Diferentemente de um gerador com rotor em gaiola, o equipamento estudado permite o acesso às variáveis rotóricas e, com a utilização da técnica de controle vetorial (FOC – *Field Oriented Control*) por orientação do fluxo de estator para o controle de potência reativa, foi possível desacoplar a potência ativa e reativa do estator e, como consequência, aumentar a controlabilidade desta, conseguindo realizar o controle de potência reativa, a depender da situação.

Os resultados de simulação mostraram resultados satisfatórios quanto ao controle da potência reativa do estator, quando o GIDA opera em torno de uma determinada faixa de velocidade. A perturbação que representa a rajada de vento e a mudança do fator de potência indutivo para capacitivo não desestabilizaram o sistema, considerando que a potência de eixo do gerador estava inicialmente constante. No entanto, percebeu-se que, no momento em que ocorria mudança em alguma das entradas do sistema, quer seja no fator de potência, quer seja na potência de eixo, a potência reativa divergia do seu valor de referência.

No cenário em que a potência de eixo era decrescente inicialmente, o controlador não conseguia fazer o controle adequado do FP durante esse período. Somente quando esta potência tornava-se constante, era possível fazer esse controle. Pode-se inferir com isso que, devido ao comportamento multivariável e não linear do GIDA, não é aconselhável utilizar o PI para uma ampla faixa de velocidade do rotor, caso os ganhos deste permaneçam constante.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, vislumbrou-se os temas abaixo apresentados. A ordem dos assuntos não necessariamente indica ordem de prioridade.

1. Projeto de um controlador que funcione em toda a faixa de velocidade que opere o GIDA, pois, dado que esta máquina apresenta comportamento não linear, os ganhos do PI só conseguem controlar o GIDA no entorno de um determinado ponto de operação (processo de linealização).
2. Controle de reativos do rotor – Neste trabalho o controle ficou restrito ao estator, porém, poder-se-ia estender isso para o fluxo de potência do rotor, aumentando-se com isso a eficiência da máquina.
3. Utilização de outra estratégia de controle aplicada ao GIDA, como a técnica CDP (Controle Direto de Potência), que permita controlar de forma desacoplada as potências ativa e reativa, para que se possa fazer comparações com a estratégia de controle vetorial por orientação do fluxo de estator.
4. Testes experimentais dos estudos e das simulações realizadas para o GIDA, para corroborar os resultados obtidos neste trabalho.

APÊNDICE A- Parâmetros do Gerador de Indução

<i>Tensão nominal de estator</i>	$V_n = 220(\Delta) = 127(Y)$
<i>Corrente nominal de estator</i>	$I_n = 9A$
<i>Resistência de estator</i>	$r_s = 0,7\Omega(Y)$
<i>Resistência de rotor referida ao estator</i>	$r_r' = 1\Omega$
<i>Indutância de dispersão de estator</i>	$L_{l1} = 5,21mH$
<i>Indutância de dispersão de rotor referida ao estator</i>	$L'_{l2} = 5,21mH$
<i>Indutância de magnetização</i>	$L_m = 65,45mH$
<i>Frequência nominal de estator</i>	$f_1 = 60Hz$
<i>Potência nominal de estator</i>	$P_n = 2,24kW$
<i>Velocidade mecânica nominal</i>	$\omega_n = 176 \frac{rad}{s} = 1680 rpm$
<i>Torque nominal</i>	$T_n = 12,73 Nm$
<i>Escorregamento nominal</i>	$s_n = 0,067$
<i>Fator de potência nominal</i>	$FP_n = 0,8$
<i>Constante de inércia</i>	$J = 0,05 kgm^2$
<i>Potência de perdas rotacionais</i>	$P_r = 65,37 W$
<i>Torque de perdas rotacionais</i>	$T_r = 0,35 Nm$

Fonte: “Controle do Fluxo de Potência da Máquina de Indução Duplamente Alimentada” - Segnini (2006).

REFERÊNCIAS

AMBIENTE, M. DO M. Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>>. .

ANEEL. Resolução Normativa N°482. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. .

ANTÔNIO VILLAR ALÉ, J. (PUCRS); CIRILO DA SILVA SIMIONI, G. (SENAI); ANDRÉ SCHUH FRANTZ, R.; et al. Centro de Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/index.htm>>. .

BEN. **Balanço energético nacional**. 2013.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 2nd ed. Rio de Janeiro: Campus: Elsevier, 2012.

BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook**. 2nd ed. Wiley, 2011.

BULHÕES, R. L.; **Métodos de Redução de Perdas Elétricas em um Sistema de Distribuição**, 2009. Universidade Federal da Bahia.

FARIELLO, D. Governo admite pela primeira vez risco de apagão, ainda que “baixíssimo.” Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/governo-admite-pela-primeira-vez-risco-de-apagao-ainda-que-baixissimo-1-11596110>>. Acesso em: 25/4/2014.

FERREIRA, J. F. DA S. B. **Controlo de Geradores de Indução Duplamente Alimentados em Turbinas Eólicas**, 2009. Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/2030/1/Ferreira_2009.pdf>. .

FARIA, C. **Controladores (Energia Eólica)**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/tecnologia/controladores-energia-eolica/>>. Acesso em: 11/09/2014.

INFRAERO. Sobre navegação aérea. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/perguntas-frequentes/sobre-navegacao-aerea.html#7>>. Acesso em: 22/7/2014.

INSTITUTE, W. Crescimento global da energia solar e eólica continua a superar outras tecnologias. Disponível em: <http://www.epochtimes.com.br/crescimento-global-da-energia-solar-e-eolica-continua-a-superar-outras-tecnologias/#.U15Tm_ldVzU>. .

LAYTON, J. A moderna tecnologia de geração eólica. Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>>. .

LIU, S. Y. **Controle Direto de Potência em Gerador de Indução Duplamente Alimentado**, 2011. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/defesas/183M.PDF>>. .

MARQUES, J. **TURBINAS EÓLICAS : MODELO , ANÁLISE E CONTROLE DO GERADOR DE INDUÇÃO COM**, 2004.

MOLLY, J. P. Perspectivas da Energia Eólica no Mundo e no Brasil. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/a-camara/altosestudios/seminarios/energiasrenov/molly.pdf>>. .

MÜLLER, S.; DEICKE, M.; W., R. Doubly Fed Induction Generator Systems. **IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE**, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=999610>>. .

NOGUCHI, T.; TOMIKI, H.; KONDO, S.; TAKAHASHI, I. Direct Power Control of PWM Converter Without Power-Source Voltage Sensors. , v. 34, n. 3, p. 473–479, 1998. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=673716>>. .

PEREIRA, M. M. **Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante**, 2004. Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2008/12/211037.pdf>>. .

SEGNINI, H. H. DE A. **Controle do Fluxo de Potência da Máquina de Indução Duplamente Alimentada**, 2006. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000379024>>. .

SILVA, B. B. DA; AZEREDO, D. P. DA S. Aerogeradores, conceitos das turbinas e suas principais tecnologias. , p. 4, 2010. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/1842/1020>>. .

SILVA, J. L. DA. **Estratégia de Controle e Supervisão de um Gerador de Indução Duplamente Excitado para Turbinas Eólicas**, 2009.

SILVA, K. F. DA. **Controle e integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados.**, 2006. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-18042006-182933/pt-br.php>>. .

SimPowerSystems For Use with Simulink. ., 2003.

TREMBLAY, E.; ATAYDE, S.; CHANDRA, A.; MEMBER, S. Comparative Study of Control Strategies for the Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems : A DSP-Based Implementation Approach. , v. 2, n. 3, p. 288–299, 2011.

XU, L.; CARTWRIGHT, P. Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation. **IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION**, 2006.

YAO, X.-J.; LIU, S.; WANG, X.-D.; et al. Doubly-fed induction generator control for variable-speed wind power generation system. **2009 International Conference on Mechatronics and Automation**, p. 855–859, 2009. Ieee. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5246281>>. .

ZHI, D.; XU, L. Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance. **IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION**, v. 22, 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04106023>>. .