

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTROLADOR GMV APLICADO À REGULAÇÃO DO ÂNGULO
DE PASSO EM UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA:
UMA ABORDAGEM LINEAR, PREDITIVA E ESTOCÁSTICA.

ANDERSON DE FRANÇA SILVA

DM 22/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém - Pará - Brasil
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDERSON DE FRANÇA SILVA

CONTROLADOR GMV APLICADO À REGULAÇÃO DO ÂNGULO
DE PASSO EM UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA:
UMA ABORDAGEM LINEAR, PREDITIVA E ESTOCÁSTICA.

DM 22/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém - Pará - Brasil
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDERSON DE FRANÇA SILVA

CONTROLADOR GMV APLICADO À REGULAÇÃO DO ÂNGULO
DE PASSO EM UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA:
UMA ABORDAGEM LINEAR, PREDITIVA E ESTOCÁSTICA.

Dissertação submetida à Banca Examinadora do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica na área de
Sistemas de Energia.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém - Pará - Brasil

2017

Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de
Bibliotecas da UFPA

Silva, Anderson de França, 1991-

Controlador GMV aplicado à regulação do ângulo de passo em um sistema de conversão de energia eólica : uma abordagem linear, preditiva e estocástica / Anderson de França Silva.- 2017

Orientador : Antonio da Silva Silveira

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1. Força eólica. 2. Turbinas eólicas – testes. 3. Teoria de controle. 4. Sistemas lineares de controle. I. Título.

CDD 23. ed. 621.312136

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**"CONTROLADOR GMV APLICADO À REGULAÇÃO DO ÂNGULO DE
PASSO EM UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA:
UMA ABORDAGEM LINEAR, PREDITIVA E ESTOCÁSTICA"**

AUTOR: ANDERSON DE FRANCA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

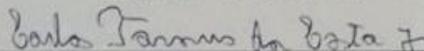
APROVADA EM: 07/04/2017

BANCA EXAMINADORA:



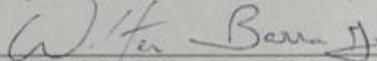
Prof. Dr. Antônio da Silva Silveira

(Orientador – PPGEE/UFPA)



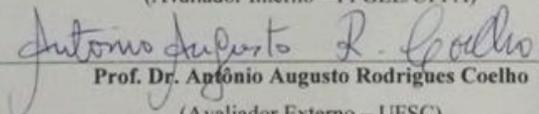
Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Walter Barra Júnior

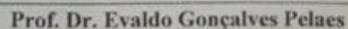
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Antônio Augusto Rodrigues Coelho

(Avaliador Externo – UFSC)

VISTO:



Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, João Batista e Edna Regina. Ao meu pai, que nunca mediu esforços para providenciar meu sustento e as condições necessárias para que eu pudesse estudar e crescer na vida. À minha mãe, minha primeira professora, que em meio aos cuidados domésticos teve a habilidade para ensinar-me a ler e escrever.

Vossos cuidados e ensinamentos compõem a essência que tornou possível esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, que com sua soberana graça me salvou, fazendo com que eu enxergasse a grandiosa obra de Jesus Cristo na cruz do calvário. Além desta benção (que é a maior que um homem pode receber), providenciou tudo o que eu necessitei para a conclusão deste trabalho. Em especial, a contribuição das pessoas citadas abaixo.

Aos meus pais, Batista e Edna, por todo amor e cuidado, concluímos juntos mais esta etapa da minha vida. A todos meus familiares, que sempre me deram todo apoio que precisei. Especialmente meus avós, Otacílio e Maria, que sempre me amaram incondicionalmente. Este trabalho é um dos frutos de tudo aquilo de bom que vocês plantaram. Agradeço a todos os meus irmãos, em especial ao Adriano e à Izabelle, que durante nossa convivência, sempre me amaram e me apoiaram.

Agradeço, especialmente, à minha noiva Talita, por todo amor, cuidado e companheirismo reservados à mim. Sem o teu apoio, era bem provável que eu não concluísse o mestrado. Deveras, faltariam laudas para citar tudo o que fizeste para que eu alcançasse mais este sonho.

Agradeço ao meu orientador e professor Antonio Silveira, por todos ensinamentos e paciência dedicados a mim, ao longo destes 2 anos no mestrado. Quando iniciei como seu orientando, ganhei não somente um orientador excepcional, mas também, um amigo. É um privilégio trabalhar com o senhor no Laboratório de Controle e Sistemas (LACOS).

Ao professor, Carlos Tavares, por todo apoio ao longo do curso de mestrado e, especialmente, durante a preparação do meu plano de trabalho para tentar uma vaga no PPGEE. Aos professores, Walter Barra, Orlando Silva (Nick), e José Augusto (Real) pelos ensinamentos de Teoria de Controle.

Agradeço aos meus amigos do LACOS: Paulo de Tarso, Jaqueline, João Carlos, Carlos Eduardo, Samoel, Leiliane, Tarcísio, Maryson, Mauro, Bruno, Luís, Felipe e Gabriela. Monstros! (piada interna). Aos amigos do LACSPOT: Erick, Florindo, Marcus Ciro, e especialmente ao Cleonor, que também me ajudou muito na escrita do meu plano de trabalho. A todos meus amigos da igreja. Em especial, ao Nilton e Wirley, por todo apoio nesta jornada acadêmica.

Agradeço à toda secretaria e coordenação do PPGEE, por todo apoio e incentivo, os quais nunca me faltaram durante o curso de mestrado.

À UFPA, que tem contribuído de maneira ímpar para minha formação profissional. Agradeço à CAPES pela confiança e suporte financeiro.

*"Meus irmãos, muitos de vós não sejam mestres, sabendo que receberemos mais
duro juízo." Tiago 3.1*

LISTA DE SÍMBOLOS

$v(t)$	Velocidade do vento
$v_{est}(t)$	Componente estacionária de baixa frequência
$v_t(t)$	Componente não estacionária de turbulência
\bar{v}	Velocidade média do vento dada de hora em hora
a	Parâmetro relacionado à velocidade média do vento
σ	Desvio padrão
I_t	Intensidade da turbulência
L_t	Comprimento da turbulência
z	Altura do solo onde a velocidade do vento é calculada
z_0	Rugosidade
T_s	Período de amostragem
K_F	Ganho estático do filtro
B	Função beta (integral de Euler de primeiro tipo)
σ^2	Variância
U_∞	Velocidade do vento axial
Ω_r	Velocidade do elemento de pá
W	Velocidade relativa
ϕ	Ângulo de inclinação
α	Ângulo de ataque
β	Ângulo de passo
F_L	Força de sustentação
ρ	Densidade do ar
A_b	Área da pá em
$C_L(\alpha)$	Coefficiente de sustentação
F_D	Força de arrasto
$C_D(\alpha)$	Coefficiente de arrasto
R	Comprimento da pá

P_m	Potência mecânica extraída da turbina eólica
$C_p(\lambda)$	Coeficiente de potência
λ	Razão de velocidade na ponta da pá
Ω_r	Velocidade do rotor
$C_T(\lambda)$	Coeficiente de torque
U_{ci}	Velocidade de vento <i>cut-in</i>
U_{co}	Velocidade de vento <i>cut-out</i>

LISTA DE SIGLAS

SCEE	Sistemas de Conversão de Energia Eólica
TE	Turbinas Eólicas
SISO	<i>Single-Input-Single-Output</i>
MIMO	<i>Multiple-Input-Multiple-Output</i>
TCE	Teoria de Controle Estocástico
MVC	<i>Minimum Variance Controller</i>
GMV	<i>Generalized Minimum Variance</i>
MPC	<i>Model Predictive Controller</i>
MVP	<i>Minimum Variance Predictor</i>
LACOS	Laboratório de Controle e Sistemas
AE	Augmentação Estocástica
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>
ARMAX	<i>Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
RST	Polinômios de controlador com estrutura generalizada R, S, e T
UFPA	Universidade Federal do Pará
ESP	Estabilizadores do Sistema de Potência
BEM	<i>Blade Element Theory</i>
EVB	Eixo de velocidade baixa
EVA	Eixo de velocidade alta
RV	Regulador de Velocidade
RAP	Regulador do Ângulo de Passo
PI	Proporcional-Integral
PT _{gmv} Q	Polinômios do controlador GMV
ARIMAX	<i>Auto-Regressive Integrated-Moving-Average with eXogenous inputs</i>
ARX	<i>Auto-Regressive with eXogenous inputs</i>
ADC	<i>Actuator Duty Cycle</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Motivação.....	22
1.2 Objetivos gerais e específicos	24
1.2.1 Objetivos gerais	24
1.2.2 Objetivos específicos.....	25
1.2.3 Materiais e métodos.....	25
1.3 Organização do trabalho.....	26
2 FUNDAMENTOS E CONTROLE DOS SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA	27
2.1 Fundamentos do Sistema de Conversão de Energia Eólica	27
2.1.1 Modelo do perfil eólico	29
2.1.2 Princípio de funcionamento das turbinas eólicas	32
2.1.3 Sistema de transmissão mecânica.....	36
2.1.4 Sistema de geração de potência elétrica	37
2.2 Controle do SCEE	37
2.2.1 Regulador de velocidade	39
2.2.2 Regulador do ângulo de passo	40
2.3 Conclusão do capítulo	41
3 CONTROLADOR RST, CONTROLADOR GMV E AUGMENTAÇÃO ESTOCÁSTICA.....	43
3.1 Controlador RST	44
3.2 Controlador GMV	47
3.3 Augmentação Estocástica.....	51
3.4 Conclusão do capítulo	53

4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA E PROJETO DO REGULADOR DO ÂNGULO DE PASSO	55
4.1 Identificação do SCEE	56
4.1.1 Teste Dinâmico e Coleta de Dados.....	58
4.1.2 Parâmetros Estimados e Validação do Modelo	61
4.2 Projeto dos Controladores	63
4.2.1 Projeto do RV	63
4.2.2 Projeto do RAP.....	64
4.3 Conclusão do capítulo	70
5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	72
5.1 Partida do SCEE.....	73
5.2 Variação abrupta da velocidade do vento.....	77
5.3 Rajada de Vento	81
5.4 Acoplamento físico das pás	84
5.5 Conclusão do capítulo	85
6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6.1 Principais contribuições desta dissertação	88
6.2 Publicações.....	88
6.2.1 Trabalhos relacionados diretamente com esta pesquisa	88
6.2.2 Trabalhos relacionados indiretamente com esta pesquisa	89
6.3 Proposta para trabalhos futuros	90
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DE SCEE PROPOSTO PELA MATHWORKS®	96
APÊNDICE B - EQUIVALÊNCIA ENTRE A POSIÇÃO DOS ATUADORES E O ÂNGULO DE PASSO.....	104
APÊNDICE C - FILTROS SIMULINK® : RV e RAP.....	107

APÊNDICE D - CÓDIGO PARA O PROJETO DOS CONTROLADORES E
TESTES SOBRE O SISTEMA LINEAR..... 108

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema de conversão de energia eólica com turbina de eixo horizontal. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).....	28
Figura 2: Modelo espectral de Van der Hoven da velocidade do vento. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).	30
Figura 3: Geração de velocidade do vento não estacionária. Fonte: adaptado de Munteanu et al. 2008.....	32
Figura 4: Elemento de pá realizando uma varredura anular. Fonte: adaptado de Burton et al (2001).	33
Figura 5: Diagramas vetoriais das (a) velocidades e (b) forças no elemento de pá. Fonte: adaptado de Burton et al. (2001).....	33
Figura 6: Potência mecânica x Velocidade do vento. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).	36
Figura 7: Sistema de transmissão mecânica. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).	36
Figura 8: Topologia do SCEE de velocidade fixa. Fonte: adaptado de Ackermann (2005).	37
Figura 9: Diagrama de blocos do sistema de controle do ângulo de passo.	38
Figura 10: Regulador de velocidade.....	39
Figura 11: Sistema de atuação do controle individual do ângulo de passo. Fonte: adaptado de Hau (2005).	40
Figura 12: Regulador do ângulo de passo.	41
Figura 13: Estrutura canônica RST.	44
Figura 14: Exemplo com conceito de variância mínima.....	52
Figura 15: Representação de um modelo geral. Fonte: adaptado de Aguirre (2014) e Coelho e Coelho (2015).	56
Figura 16: Representação de um modelo com estrutura ARMAX. Fonte: adaptado de Coelho e Coelho (2015).	57
Figura 17: Diagrama representativo do teste realizado para identificação dos sistemas atuadores.	59
Figura 18: Teste dinâmico para coleta de dados para identificação - Malha externa. .	60
Figura 19: Teste dinâmico para coleta de dados para identificação - Malha interna. .	60
Figura 20: Dados coletados para (a) estimação e (b) validação.	61

Figura 21: Validação do modelo ARMAX do (a) Atuador 1, (b) Atuador 2 e (c) Atuador 3.....	62
Figura 22: Representação da analogia existente entre as estruturas canônicas dos controladores RST e GMV.	67
Figura 23: Diagrama de Bode - Atuador 1.....	69
Figura 24: Mapeamento de polos do Atuador 1.....	70
Figura 25: Velocidade do vento.	72
Figura 26: Curva estática - Ângulo de passo.....	72
Figura 27: Velocidade do vento - Teste de partida.	74
Figura 28: Velocidade do rotor - Teste de partida.	75
Figura 29: Ângulo de passo das pás da turbina - Teste de partida.....	75
Figura 30: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Teste de partida.....	76
Figura 31: Velocidade do vento - Variação abrupta.	78
Figura 32: Velocidade do rotor da turbina - Variação abrupta da velocidade do vento.	78
Figura 33: Ângulo de passo das pás da turbina - Variação abrupta da velocidade do vento.....	79
Figura 34: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Variação abrupta da velocidade do vento.	80
Figura 35: Velocidade do vento - Rajada de vento	81
Figura 36: Velocidade do rotor da turbina - Rajada de vento.	82
Figura 37: Ângulo de passo das pás da turbina - Rajada de vento.....	82
Figura 38: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Rajada de vento.....	83
Figura 39: Ângulo de passo das pás da turbina - Acoplamento físico entre as pás.	84
Figura 40: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Acoplamento físico entre as pás.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos ARMAX identificados.	62
Tabela 2: Parâmetros dos controladores PI contínuo e digital.	63
Tabela 3: Parâmetros dos controladores RST projetados.	65
Tabela 4: Parâmetros dos filtros $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$	67
Tabela 5: Margens de ganho e fase do controlador projetado - Atuador 1.	69
Tabela 6: Índices de desempenho – Teste de Partida.	77
Tabela 7: Índices de desempenho - Teste de Variação Abrupta.	80
Tabela 8: Índices de desempenho – Rajada de Vento.	83

RESUMO

Nesta pesquisa, foram investigadas técnicas de controle linear, preditivo e estocástico, aplicadas ao problema de regulação do ângulo de passo de uma Turbina Eólica. A topologia do Sistema de Conversão de Energia Eólica (SCEE) estudado é do tipo Velocidade Fixa, com ângulo de passo variável. Os SCEE, de maneira geral, são sistemas que, durante seu funcionamento, estão sujeitos à constante entrada de perturbações do tipo estocásticas. Este tipo de perturbação, em muitos casos, é negligenciado, o que afeta o desempenho de controladores cujo o projeto foi baseado em modelos determinísticos. Pesquisas desenvolvidas na da Teoria de Controle Preditivo e Estocástico, têm comprovado os benefícios de se realizar o projeto de controladores baseados em modelos que consideram as parcelas, determinística e estocástica, do processo. Seguindo esta mesma abordagem de projeto, foi desenvolvido, nesta dissertação, o projeto de Reguladores do Ângulo de Passo (RAP), por meio da técnica de Augmentação Estocástica (AE) de controladores determinísticos. Os principais objetivos buscados foram: minimizar o consumo de energia do sistema de controle; e reduzir os custos relacionados à manutenção e troca dos atuadores no sistema de regulação do ângulo de passo. Foram realizados testes em um simulador de SCEE da MathWorks[®]. Os resultados dos testes comprovam o bom desempenho dos RAP projetados através da AE, os quais alcançaram os objetivos buscados no desenvolvimento desta pesquisa.

Palavras chave: Sistemas de Conversão de Energia Eólica, Regulador do Ângulo de Passo, Controlador GMV, Augmentação Estocástica, Teoria de Controle Preditivo e Estocástico.

ABSTRACT

In this research, we investigated linear, predictive and stochastic control techniques applied to the pitch angle control of a Wind Turbine. The topology of the Wind Energy Conversion System (WECS) studied was the Fixed-Speed Variable-Pitch. The WECS, in general, is a system that, during their operation, is subject to the constant entry of stochastic disturbances. This type of disturbance is often neglected, which will negatively affect the performance of controllers whose design was based on deterministic models. Researches developed within the Predictive and Stochastic Control Theory, have proven the benefits of performing the design of controllers based on models that consider both the deterministic and stochastic portions of the process. Following this same design approach, the Pitch Angle Control (PAC) project was developed, in this dissertation, using the Stochastic Augmentation (SA) of deterministic controllers. The main objectives sought, were: to minimize the energy consumption of the control system; and to reduce the costs related to the maintenance and replacement of actuators in the pitch angle control system. Simulation tests were performed on a MathWorks® WECS simulator. The results of the tests have proved the good performance of the PAC designed through the SA, which reached the control objectives sought with the development of this research.

Keywords: Wind Energy Conversion Systems, Pitch Angle Control, GMV Controller, Stochastic Augmentation, Stochastic and Predictive Control Theory

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, a humanidade tem usado a energia extraída dos ventos em várias aplicações, por exemplo, moagem de grãos e no bombeamento de água. Na década de 1970, devido à uma forte crise no setor petrolífero, a geração de energia elétrica, tendo o vento como fonte primária, sofreu uma revolução (BIANCHI et al., 2007). Isto é, com o aumento do preço do petróleo, a geração de eletricidade a partir de termoelétricas se tornou cara demais, o que motivou as empresas do setor energético a investirem em pesquisas com o objetivo de se aproveitar melhor a energia proveniente dos ventos na geração de eletricidade. Neste período, os avanços tecnológicos alcançados nos Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE)¹, deram origem à era de produção de energia elétrica em larga escala sendo a energia eólica a fonte primária.

Recentemente, a exploração da energia eólica tem se consolidado ainda mais devido a três motivos: crescente demanda no consumo de energia elétrica, interesses voltados para a diversificação do mercado de energia e preocupações concernentes às questões ambientais.

Considerando a atual proeminência da indústria de energia eólica, faz-se necessário que as tecnologias aplicadas aos SCEE possam garantir sua operação da maneira mais eficiente e segura possível. Nesse contexto, o principal desafio relacionado aos sistemas eólicos de potência consiste na discrepância que há entre a forte característica irregular da fonte primária, *i.e.*, o vento (a velocidade do vento é um processo intrinsecamente aleatório, com turbulências e variações acentuadas), e as demandas concernentes à qualidade de energia elétrica: fornecimento de tensão em níveis adequados, potência reativa e oscilações na rede (ACKERMANN, 2005; MUNTEANU et al., 2008). Neste âmbito, destaca-se que, a operação de um SCEE dentro das rigorosas normas exigidas pelo mercado de energia elétrica e seus padrões técnicos, só é possível graças aos sistemas de controle automático empregados neste setor (FOX et al, 2007; MUNTEANU et al., 2008).

A necessidade dos sistemas de controle, presentes nos sistemas eólicos de potência, se dá devido a capacidade dos controladores de fornecerem condições favoráveis para o funcionamento das Turbinas Eólicas (TE)², a qual é o componente principal do SCEE (BURTON et al., 2001). O controle automático aplicado às TE permite que estas explorem

¹ Ao longo do texto a sigla SCEE será utilizada tanto no singular quanto no plural. Isto é, em sentenças no singular será Sistema de Conversão de Energia Eólica, já em sentenças no plural ficará Sistemas de Conversão de Energia Eólica

² Idem o princípio usado na sigla SCEE

sua capacidade de maneira eficiente, além de reduzir as fadigas nos seus componentes através da atenuação das cargas aerodinâmicas e mecânicas impostas durante o funcionamento das turbinas (BIANCHI et al., 2007; LUO et al., 2014). Neste sentido, em Laks et al. (2009) é possível ter uma visão geral das diversas técnicas de controle (tradicionais e que são tendências) aplicadas aos problemas inerentes às turbinas eólicas. Algo que é destacado por Laks et al. (2009), consiste na utilização de técnicas de controle SISO (do inglês *Single-Input-Single-Output*) e MIMO (do inglês *Multiple-Input-Multiple-Output*) através de uma abordagem linear e determinística. Contudo, cabe salientar novamente a forte natureza estocástica do vento, variável fundamental no processo de geração de eletricidade no SCEE. A característica estocástica do vento torna necessária, ou no mínimo sugestiva a investigação e aplicação, de técnicas adequadas a este tipo de processo.

Na literatura encontram-se duas metodologias, baseadas em Teoria de Controle, para tratar os desafios impostos pela característica estocástica do sistema de geração eólica: **(i)** uma abordagem através de técnicas de controle linear a partir de modelos determinísticos dos subsistemas presentes no SCEE utilizando-se de sensores que podem fornecer uma previsão do comportamento futuro do vento, permitindo com que a malha de controle se antecipe às variações do sistema (SCHOLBROCK et al., 2016). **(ii)** Outra abordagem é o tratamento adequado das perturbações estocásticas presentes no sistema, a partir de modelos que são levantados considerando-se as parcelas determinística e estocástica do processo (ELNAGAR et al., 2013).

Neste trabalho, utilizou-se a metodologia conforme a abordagem do tipo **(ii)** tendo como base a Teoria de Controle Estocástico (TCE) (ÅSTRÖM, 1970). A partir do Regulador de Variância Mínima (MVC - *Minimum Variance Controller*) proposto por Åström e Wittenmark (1973), deu-se origem às metodologias de projeto de controladores estocásticos de variância mínima (SILVEIRA, 2012). O aprimoramento do MVC foi o controlador de variância mínima generalizado (GMV - *Generalized Minimum Variance*) proposto por Clarke e Gawthrop (1975). O GMV é um dos membros advindos da família dos controladores baseados em modelo (MPC - *Model Predictive Controller*). As aplicações do GMV se estendem aos problemas tipo SISO (DOI; MORI, 2002) e MIMO (COELHO, 1991), sistemas com dinâmica de fase não mínima, sistemas instáveis em malha aberta e sistemas com atraso de transporte. Tratando-se de trabalhos recentes, envolvendo o controlador GMV, em (Silveira et al., 2016) tal controlador é aplicado com o intuito de resgatar a parte mais sensível do preditor estocástico de variância mínima (MVP - *Minimum Variance Predictor*) de Åström e Wittenmark (1973), que seria a capacidade de distinguir entre, causa e efeito determinístico,

de ruído e incertezas de natureza estocástica. A metodologia de projeto proposta por Silveira et al. (2016) tem sido o ponto de partida para o desenvolvimento de trabalhos como os de Trentini et al. (2016) e Pinheiro et al. (2016), os quais apresentam uma nova estratégia de sintonia de controladores lineares e estocásticos. O método proposto por Trentini et al. (2016) e Pinheiro et al. (2016), desenvolvido em parceria entre o Laboratório de Controle e Sistemas (LACOS) da Universidade Federal do Pará (UFPA) e pesquisadores da Hochschule Hannover, na Alemanha, investiga como acrescentar propriedades estocásticas aos controladores determinísticos. Em língua portuguesa o método é denominado como *Augmentação Estocástica (AE)*.

Partindo do cenário apresentado, no qual buscou-se ressaltar principalmente: a necessidade e a possibilidade de se utilizar métodos de controle linear e estocástico na automação dos sistemas de conversão de energia eólica juntamente com as tendências advindas da teoria de controle com métodos de sintonia envolvendo o controlador GMV, apresenta-se a seguir a motivação, os objetivos e organização dos capítulos desta dissertação.

1.1 Motivação

A motivação para elaboração da pesquisa apresentada nesta dissertação, partiu de três realidades existentes no contexto dos sistemas de controle aplicados em processos industriais:

(i) Apesar da existência de perturbações do tipo estocásticas presentes numa grande porção dos sistemas industriais, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura aplicam as malhas de controle tradicionais, por exemplo, malhas do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) e LQR (do inglês *Linear Quadratic Regulator*), baseadas em modelos determinísticos (OGATA, 2003; ÅSTRÖM; HAGGLUND, 2006).

(ii) A realidade descrita em (i) também se estende aos sistemas de geração de energia eólica e poucos são os trabalhos baseados em modelos que incluem a natureza estocástica do processo (THOMSEN et al., 2009). Mesmo nos casos em que são aplicados controladores baseados na TCE, percebe-se alguns equívocos na maneira de se utilizar o MVC, como é o caso em Elnaggar et al. (2014), no qual uma técnica de variância mínima sem restrições sobre o esforço de controle foi aplicada sobre um problema que exigia restrições do esforço de controle.

(iii) Em trabalhos mais recentes, a literatura de controle linear e estocástico tem buscado realizar o projeto de controladores GMV baseados em modelos completos, como os do tipo ARMAX (do inglês *Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs*) e Box and Jenkins (BJ) (COELHO; COELHO, 2015), através da Augmentação Estocástica (TRENTINI et al., 2016; PINHEIRO et al., 2016).

Algo que deve ser notado é que a realidade (i) justifica-se com base no Princípio da Parcimônia (AGUIRRE, 2014). Não é preciso, necessariamente, se valer de um modelo com elevado grau de complexidade para se projetar um bom controlador (COELHO; COELHO, 2015). A maioria dos processos industriais é descrita a partir de modelos determinísticos e os resultados obtidos destas aplicações são considerados satisfatórios. Contudo, ainda assim existem as desvantagens deste tipo de abordagem. A principal se dá na presença de perturbações estocásticas inseridas nos sistemas. Neste cenário, os controladores determinísticos apresentam considerável perda de desempenho, já que a banda passante da malha de controle é comumente reduzida buscando-se garantir boas margens de estabilidade.

Devido as variações na velocidade do vento, as turbinas eólicas estão sujeitas à constante entrada de perturbações. Estas são propagadas em seus componentes e conseqüentemente aos sensores responsáveis por monitorar as variáveis do sistema. Em (SCHOLBROCK et al., 2016) é discutida uma forma de mitigar a perda de desempenho dos controladores através do uso de sensores com tecnologia LIDAR (do inglês *Light Detection And Ranging*). Uma excelente analogia feita por Scholbrock et al. (2016) é a de que os controladores que não possuem a malha de realimentação adicional com dados de medição do sensor LIDAR, são como um motorista dirigindo de olhos vendados, o qual irá reagir instantaneamente aos impactos sofridos pelo carro. Isto é, as entradas de controle são atualizadas sem nenhum tipo de antecipação às perturbações impostas pela incidência do vento na turbina.

Malhas de controle realimentadas com a medição do sensor LIDAR são, na analogia do motorista, como um condutor dirigindo sem estar vendado, capaz de atualizar as entradas de controle de forma antecipada às perturbações que serão sofridas pelo sistema. Apesar das vantagens de se utilizar o sensor LIDAR, a motivação por trás da pesquisa apresentada nesta dissertação se baseia em uma metodologia diferente e inédita na solução do problema em questão.

A metodologia consiste na expectativa de se aplicar técnicas de controle linear, preditivo e estocástico, sem o uso do sensor LIDAR. O que se buscou alcançar foi o tratamento adequado dos problemas resultantes da entrada de perturbações do tipo estocástica

com a metodologia (iii). Acrescentando-se propriedades estocásticas aos controladores com a estrutura canônica RST, é possível diminuir as perdas de desempenho dos controladores das turbinas eólicas, mesmo diante dos impactos causados pela variação do vento incidente na turbina. Sendo assim, retomando a analogia feita no parágrafo anterior, espera-se que mesmo dirigindo com olhos vendados (sem o uso do sensor LIDAR) seja possível reduzir os impactos de possíveis colisões. A maior motivação deste trabalho consiste na expectativa de se diminuir os impactos sofridos pelo SCEE devido às perturbações estocásticas inerentes a este sistema com a aplicações de controladores via abordagem linear, preditiva e estocástica.

Outra motivação que também impulsionou a elaboração deste trabalho foi a possível contribuição que esta pesquisa pode trazer para o seu contexto regional. Pesquisas relacionadas ao controle e automação aplicados em sistemas de geração de energia são tradicionais, tanto no âmbito de pós-graduação quanto no de graduação, na UFPA (BARRA, 2001; SILVA, 2014). Os sistemas de geração hidrelétrica têm recebido maior ênfase, com especialidade na sintonia de Estabilizadores do Sistema de Potência (ESP) por meio de técnicas de controle adaptativas, inteligente, robustas, preditivas, de ordem fracionária e análise intervalar (BARRA JUNIOR, 2005; COSTA, 2013; AYRES JR, 2014; CUNHA et al., 2016). As técnicas de controle investigadas nesta pesquisa são do tipo preditivas e estocásticas e buscou-se aplicá-las ao contexto das energias renováveis no âmbito do SCEE. Sendo assim, é possível contribuir com novas técnicas de controle sendo aplicadas aos sistemas elétricos de geração.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais e específicos relacionados ao desenvolvimento desta investigação. Com o intuito de esclarecer ao leitor o procedimento utilizado para desenvolver esta pesquisa, apresenta-se os materiais e métodos aplicados.

1.2.1 Objetivos gerais

O que espera-se de um sistema projetado para gerar energia é que este, o faça da maneira mais eficiente. Isto é, a quantidade de energia consumida, durante a operação do sistema gerador, deve ser a menor possível. Sendo assim, o principal objetivo desta pesquisa é reduzir o consumo de energia por parte do sistema de controle da turbina eólica no SCEE em

estudo. Buscou-se também, minimizar os custos relacionados à manutenção e troca dos atuadores no sistema de regulação do ângulo de passo do SCEE.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar os objetivos gerais, foram projetados controladores através da técnica de Augmentação Estocástica, aplicados como reguladores do ângulo de passo no sistema de conversão de energia eólica operando em seu regime de plena carga. Além disso, foram buscados os objetivos específicos, descritos a seguir:

- Compreender um simulador do SCEE proposto pela Mathworks®;
- Identificar modelos do tipo ARMAX do sistema a ser controlado;
- Projetar o regulador do ângulo de passo do SCEE no simulador da Mathworks®, através da Augmentação Estocástica;
- Projetar o regulador de velocidade do SCEE no simulador da Mathworks®;
- Analisar os resultados obtidos da aplicação da estratégia de sintonia proposta.

1.2.3 Materiais e métodos

Devido à flexibilidade e capacidade de reprodução de um sistema de geração real, foi escolhido o simulador do SCEE proposto pela Mathworks® (MILLER, 2017). Para identificar os modelos dos sistemas, foi utilizada a *System Identification Toolbox*TM da MathWorks®.

A partir do modelo linear identificado com o aplicativo IDENT, foram projetados os reguladores do ângulo de passo das pás da TE. O projeto foi realizado dentro do ambiente de programação do Matlab®. Além do projeto, foram realizados testes com os controladores atuando sobre o modelo linear dos sistemas identificados. O código de projeto e teste é apresentado no Apêndice D. Comprovado o bom desempenho sobre o modelo linear, os controladores foram testados sendo aplicados sobre malha de controle do modelo não linear do simulador.

Por fim, foram calculados os índices de desempenho dos controladores testados, a partir de métricas recomendadas pela literatura. Na seção a seguir, é apresentado como os capítulos desta dissertação foram organizados.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada conforme mostrado a seguir:

No **Capítulo 2** é realizado o estudo dos fundamentos e controle dos SCEE. No **Capítulo 3** é realizado o estudo da teoria do controlador GMV e apresentação da Augmentação Estocástica de controladores determinísticos. No **Capítulo 4** são discutidos os métodos de identificação do sistema a ser controlado, bem como os modelos obtidos por tal identificação e, a partir dos modelos identificados, é realizado o projeto dos controladores com a sintonia de controle GMV a partir do *loop-shaping* de controlador RST. No **Capítulo 5** são discutidos e analisados os resultados das simulações realizadas com os controladores projetados. No **Capítulo 6** são feitas as considerações finais, apresentados os resultados publicados em decorrência desta pesquisa e as propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS E CONTROLE DOS SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos físicos relacionados ao funcionamento dos SCEE e os conceitos básicos concernentes aos sistemas de controle aplicados às Turbinas Eólicas. É sabido que a literatura apresenta diversas topologias de sistemas de geração de energia eólica bem como diversos esquemas de controle de TE (ACKERMANN, 2005; BIANCHI et al., 2007; PARDALOS et al., 2014). Contudo, a apresentação de cada um dos tipos de SCEE e topologias de controle aplicadas neste setor, mesmo se realizada de maneira resumida, fugiria do escopo desta dissertação.

Portanto, com o intuito de facilitar a compreensão do que foi realizado nesta pesquisa e fornecer uma melhor preparação para a leitura do Capítulo 4, o qual irá tratar da identificação dos modelos e projeto dos controladores, buscou-se destacar a topologia do SCEE de Velocidade Fixa e seu respectivo diagrama de controle.

Com relação aos princípios físicos do SCEE, serão apresentados seus principais subsistemas, com o devido destaque para a modelagem do perfil eólico que será utilizado para realização das simulações apresentadas no Capítulo 5.

A seguir serão descritos detalhes dos fundamentos e controle do SCEE do estudo de caso avaliado.

2.1 Fundamentos do Sistema de Conversão de Energia Eólica

O Sistema de Conversão de Energia Eólica é um processo que transforma a energia cinética contida no fluxo de ar em energia elétrica. Esta conversão é realizada em duas etapas. **(i)** O dispositivo responsável por extrair a energia cinética, o qual é o rotor da turbina eólica, gira sob a ação do fluxo de ar incidente na turbina, extraíndo, então, potência mecânica. **(ii)** O rotor aciona a máquina elétrica girante, o gerador, o qual irá realizar a conversão da potência mecânica fornecida pelo rotor da turbina em potência elétrica (MUNTEANU, et al., 2008).

Em Bhadra et al. (2005), são brevemente apresentados os diversos conceitos de turbinas eólicas desenvolvidos ao longo da história. As configurações básicas são classificadas em relação à disposição dos eixos das turbinas, isto é, se são horizontais ou verticais. A maioria das turbinas eólicas fabricadas atualmente são de eixo horizontal. Esta é a

mesma configuração do SCEE presente no simulador da MathWorks[®], projetado por Miller (2017). Tal simulador foi projetado para demonstrar a capacidade de modelagem e reprodução da dinâmica de sistemas físicos por meio da utilização do Simscape[™], dentro do ambiente de simulação Simulink[®] (MATHWORKS, 2016). A descrição detalhada do simulador do SCEE é apresentada no Apêndice A. Este foi o sistema sobre o qual foram aplicadas as técnicas de controle propostas nesta dissertação.

Para uma visão geral do SCEE com turbinas cujo o eixo é disposto horizontalmente, é ilustrada na Figura 1 uma turbina eólica de eixo horizontal. Percebe-se que é um processo com vários subsistemas.

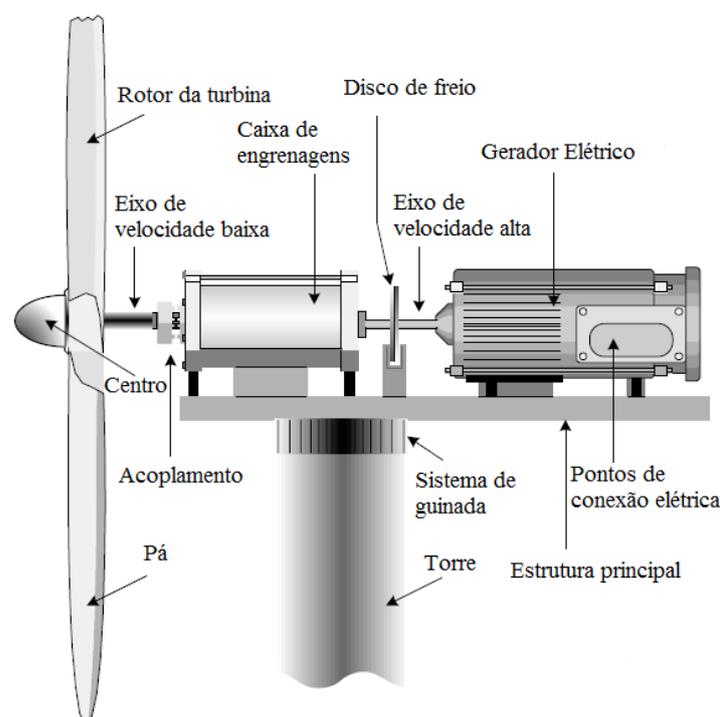


Figura 1: Sistema de conversão de energia eólica com turbina de eixo horizontal. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).

A conversão de energia neste sistema eólico de potência é organizada, conforme Munteanu et al. (2008), em quatro subsistemas:

(i) O subsistema aerodinâmico, consistindo principalmente no rotor da turbina, o qual é composto pelas pás e pelo centro da turbina, neste são acopladas e suportadas as pás;

(ii) O subsistema de transmissão, composto pelo eixo de velocidade baixa (acoplado ao centro da turbina), pela caixa de engrenagens, a qual realiza a multiplicação de velocidade e pelo eixo de velocidade alta (o qual é acoplado ao eixo do gerador e responsável por acioná-lo);

(iii) O subsistema eletromagnético, que consiste no gerador elétrico.

(iv) E por fim, o subsistema elétrico, o qual inclui os dispositivos de conexão com a rede e a própria rede elétrica local.

Nas subseções a seguir, serão apresentados detalhes dos principais subsistemas, destacando-se inicialmente a modelagem do perfil eólico utilizado nesta pesquisa.

2.1.1 Modelo do perfil eólico

Analisando-se a geração de energia eólica como um sistema, é constatado que a velocidade do vento representa o principal sinal exógeno aplicado ao SCEE e que determina seu comportamento (MUNTEANU, et al., 2008). Sua característica mais notável é a variabilidade, a qual é altamente dependente das características geográficas do local onde está situado o parque eólico e de suas condições atmosféricas. Fica evidente que, por o vento se tratar de uma variável que depende de vários fatores, levantar um modelo da velocidade do vento é uma tarefa difícil.

Nos trabalhos de Burton et al. (2001), Bianchi et al. (2007) e Munteanu et al. (2008) são fornecidos os conceitos e métodos necessários para se obter o modelo adequado da velocidade do vento. Os quais serão descritos nesta subseção.

A dinâmica do vento resulta de uma combinação dos aspectos geográficos de um determinado local e de suas condições atmosféricas. Desta maneira, a velocidade do vento é modelada na literatura como um processo aleatório não estacionário, produzido pela superposição de duas componentes,

$$v(t) = v_{est}(t) + v_t(t), \quad (2.1)$$

onde $v_{est}(t)$ é a componente estacionária de baixa frequência e $v_t(t)$ é a componente não estacionária de turbulência. Tais componentes podem ser identificadas no modelo espectral de Van der Hoven ilustrado na Figura 2. O intervalo espectral, em torno de 0 a 0,5 mHz, sugere que a componente de turbulência $v_t(t)$ pode ser modelada como um processo randômico de média nula. A componente estacionária de baixa frequência $v_{est}(t)$ é considerada constante quando observada na escala temporal de turbulência.

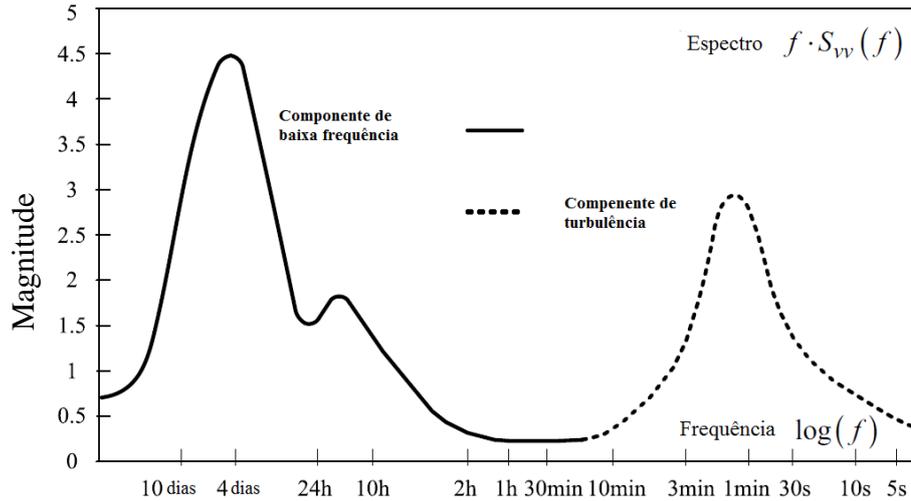


Figura 2: Modelo espectral de Van der Hoven da velocidade do vento. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).

A componente estacionária de baixa frequência $v_{est}(t)$ corresponde às variações mais lentas da velocidade do vento. É expressa conforme Munteanu et al. (2008)

$$v_{est}(t) = a \cdot v(t) \cdot e^{-1/2a\bar{v}^2}, \quad (2.2)$$

onde \bar{v} é a velocidade média do vento dada de hora em hora e a é o parâmetro relacionado à velocidade média do vento tomada a longo prazo. Como será visto a seguir, o valor desta componente influencia na amplitude da turbulência, todavia sua evolução não é crucial para o comportamento do SCEE a curto e médio prazo (ACKERMANN, 2005).

As variações rápidas na velocidade do vento são modeladas pela componente de turbulência $v_t(t)$. Esta é descrita matematicamente como uma distribuição normal de média nula, com desvio padrão, σ , que depende do valor atual médio dado de hora em hora, $v_{est}(t)$. A intensidade da turbulência é uma medida do nível de turbulência, que depende da superfície do solo e é definida como (MUNTEANU, et al., 2008)

$$I_t = \frac{\sigma}{v_{est}(t)}. \quad (2.3)$$

Em Burton et al. (2001) é apresentado, por meio da análise do espectro de Kaimal (ACKERMANN, 2005), um outro parâmetro, importante chamado comprimento da turbulência L_t , o qual imprime as propriedades dinâmicas sobre a componente de turbulência. Ambos os parâmetros, intensidade da turbulência I_t e comprimento da turbulência L_t são adotados de acordo com diversos padrões industriais. Um exemplo, é o padrão Dinamarquês

(DS 742 2007), o qual utiliza as relações entre estes parâmetros de acordo com (MUNTEANU et al., 2008)

$$I_t = \frac{1}{\ln(z / z_0)}, \quad (2.4)$$

e

$$L_t = \begin{cases} 150 \text{ m, se } z \geq 30\text{m} \\ 5 \cdot z \text{ m, se } z \leq 30\text{m} \end{cases} \quad (2.5)$$

onde z é a altura do solo onde a velocidade do vento é calculada e z_0 é a rugosidade.

A componente de turbulência é sintetizada através da filtragem de ruído branco (MUNTEANU, et al., 2008). Em Welfonder et al. (1997) é mostrado um procedimento utilizado para auxiliar na obtenção da componente de turbulência. Uma das contribuições do método consiste no cálculo da constante de tempo do filtro (responsável por filtrar o ruído branco),

$$T_F = \frac{L_t}{v_{est}}. \quad (2.6)$$

Como dito anteriormente, o filtro é alimentado com ruído branco de variância unitária, e cujo período de amostragem T_s , pode ser configurado. O cálculo do ganho estático do filtro é feito conforme

$$K_F = \sqrt{\frac{2\pi}{B(1/2, 1/3)} \cdot \frac{T_F}{T_s}} \quad (2.7)$$

onde B é a função beta (integral de Euler de primeiro tipo), que possibilita a obtenção do ruído colorido de variância unitária na saída do filtro. Para obter a variância σ^2 correspondente à velocidade média do vento, $v_{est}(t)$, o ruído colorido é multiplicado pelo produto de $I_t \cdot v_{est}(t)$.

Nichita et al. (2002) faz uma adaptação do método proposto por Welfonder et al. (1997). Tal adaptação consiste na obtenção de uma velocidade do vento não estacionária, dentro de uma larga escala de tempo, utilizando o diagrama de blocos da Figura 3.

O filtro do ruído branco de variância unitária, mostrado na Figura 3, é aproximado por uma função de transferência composta por dois polos e um zero (NICHITA et al., 2002):

$$H_t(s) = K_F \cdot \frac{m_1 T_F s + 1}{(T_F s + 1)(m_2 T_F s + 1)}, \quad m_1 = 0,4, \quad m_2 = 0,25. \quad (2.8)$$

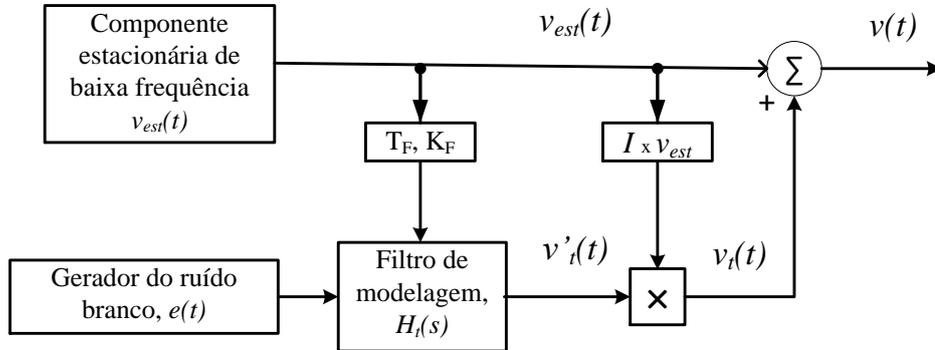


Figura 3: Geração de velocidade do vento não estacionária. Fonte: adaptado de Munteanu et al. 2008.

O modelo da velocidade do vento não estacionária no diagrama de blocos da Figura 3 foi implementado no ambiente de simulação Simulink[®] e adicionado ao simulador do SCEE. Este modelo de perfil eólico foi utilizado para realização dos testes de identificação e dos controladores descritos nos Capítulos 4 e 5. Vale ressaltar que este modelo segue o padrão industrial para testes de simulação da velocidade do vento para SCEE (SOLIMAN, 2013).

2.1.2 Princípio de funcionamento das turbinas eólicas

Após o estudo do modelo da velocidade do vento, será descrito nesta subseção o princípio de funcionamento das turbinas eólicas, dando ênfase para a aerodinâmica das turbinas, os conceitos de força, potência e torque produzidos pela turbina, bem como os regimes de operação do SCEE.

Uma das formas de se levantar o modelo aerodinâmico das turbinas eólicas é através da Teoria do Elemento de Pá (BEM - do inglês *Blade Element Theory*). A análise realizada pela BEM consiste no estudo das forças aerodinâmicas aplicadas a um elemento de pá de comprimento infinitesimal (BIANCHI, et al., 2007). Na Figura 4 é ilustrado tal elemento fazendo uma varredura do tipo anular disposto a uma distância r do centro da turbina e girando à uma velocidade Ω_r .

A seguir serão apresentadas importantes definições relacionadas ao estudo da aerodinâmica das turbinas eólicas com base na BEM aplicada ao elemento extraído da Figura 4.

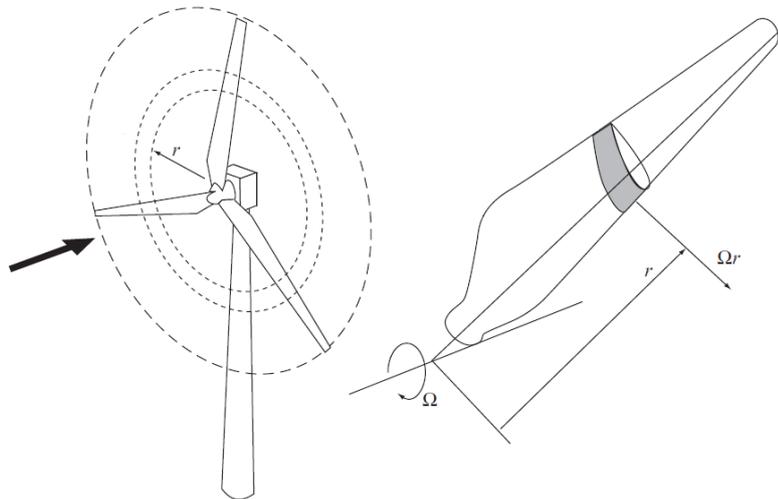


Figura 4: Elemento de pá realizando uma varredura anular. Fonte: adaptado de Burton et al (2001).

A Figura 5 mostra os diagramas vetoriais das velocidades e forças atuantes no elemento de pá. Nos trabalhos de Burton et al. (2001) e Bhadra et al. (2005) são apresentadas as seguintes definições:

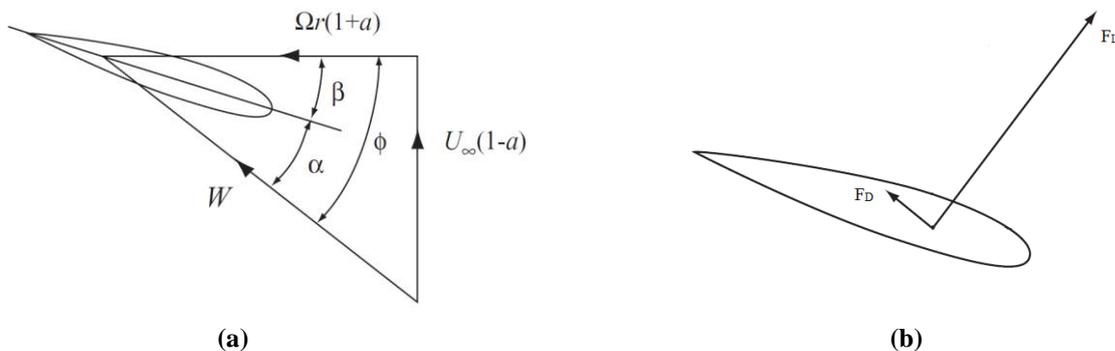


Figura 5: Diagramas vetoriais das (a) velocidades e (b) forças no elemento de pá. Fonte: adaptado de Burton et al. (2001).

Velocidade do vento axial U_{∞} : É a velocidade do vento através do rotor da turbina dada em metros por segundo, também chamada velocidade pura do vento.

Velocidade do elemento de pá Ω_r : É a velocidade da pá à uma distância r do eixo do rotor.

Velocidade relativa W : É a velocidade do fluxo de ar em relação à pá,
 $W = U_\infty - \Omega_r$.

Ângulo de inclinação ϕ : É o ângulo entre o vetor da velocidade relativa e o plano de rotação.

Ângulo de ataque α : É o ângulo entre a o vetor da velocidade relativa e a linha da corda do aerofólio.

Ângulo de passo β : É o ângulo entre a corda do aerofólio seccionado em r e o plano de rotação.

Na Figura 5(b) estão ilustradas as principais forças atuantes no elemento de pá. A força de sustentação F_L é definida como a componente da força aerodinâmica na direção perpendicular à velocidade relativa do vento, expressa por

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A_b W^2 C_L(\alpha), \quad (2.9)$$

onde ρ é a densidade do ar, A_b é a área da pá em m^2 e $C_L(\alpha)$ é o coeficiente de sustentação que está em função do ângulo de ataque α .

A força de arrasto F_D é definida como a componente da força aerodinâmica na direção da velocidade relativa do vento dada por

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A_b W^2 C_D(\alpha), \quad (2.10)$$

onde $C_D(\alpha)$ é o coeficiente de arrasto também calculado em função do ângulo de ataque α .

Os ângulos de ataque α , inclinação ϕ e passo β estão relacionados conforme

$$\alpha = \phi - \beta \quad (2.11)$$

Esta relação é de suma importância para o controle das turbinas eólicas. Conforme é ressaltado por Bianchi et al. (2007), para um dado valor crítico do ângulo de ataque, ocorre uma mudança abrupta nos valores dos coeficientes de sustentação $C_L(\alpha)$ e arrasto $C_D(\alpha)$ podendo levar os aerofólios da turbina à estolagem. Nesta condição, a força de sustentação F_L é reduzida enquanto a força de arrasto F_D é aumentada devido o fluxo de ar na pá não ser mais laminar, deixando de passar pela parte superior do aerofólio.

Segundo Munteanu et al. (2008), uma turbina eólica é, em sua essência, um dispositivo projetado para extrair potência. Portanto, além dos conceitos da aerodinâmica em

turbinas eólicas, é importante entender outros princípios no contexto do funcionamento destas como a potência e torque extraídos do vento.

A potência mecânica extraída por uma turbina eólica, cujo comprimento de sua pá é R , pode ser expressa como

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_\infty^3 C_p(\lambda), \quad (2.12)$$

onde $C_p(\lambda)$ é definido como o coeficiente de potência dado em função da razão de velocidade na ponta da pá, lambda, expressa por

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_l}{U_\infty}. \quad (2.13)$$

Na Equação (2.13) Ω_l é a velocidade do rotor (no eixo de velocidade baixa - Figura 1).

O torque mecânico desenvolvido pela turbina eólica é expresso pela razão entre a potência mecânica P_m extraída pela turbina e a velocidade do rotor Ω_l , conforme,

$$T_m = \frac{P_m}{\Omega_l} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 U_\infty^2 C_T(\lambda) \quad (2.14)$$

onde $C_T(\lambda) = C_p / \lambda$ é o coeficiente de torque.

Para finalizar esta subseção, apresentam-se, a seguir, os regimes de operação dos SCEE.

Na Figura 6, é ilustrada a curva de potência ideal das turbinas eólicas. Seu funcionamento pode variar desde a velocidade de vento *cut-in*, U_{ci} , até a velocidade de vento *cut-out*, U_{co} . A potência mecânica extraída pela turbina P_m aumenta proporcionalmente com o cubo da velocidade do vento U_∞ , conforme expressa a Equação (2.12), até atingir seu valor nominal P_n . Isto ocorre no mesmo instante em que a velocidade nominal do vento, U_n , é alcançada, dividindo então os regimes de operação em dois intervalos: **(i)** regime de operação em carga parcial e **(ii)** regime de operação à plena carga. O objetivo desta pesquisa foi trazer melhorias na operação do SCEE em regime de plena carga.

Neste intervalo de operação (valores das velocidades de vento entre U_n e velocidade *cut-out* U_{co}), a turbina está sob a ação de velocidades do vento elevadas e portanto, a potência capturada é impedida de aumentar acima de seus valores nominais.

Os objetivos de controle neste regime de operação consistem em reduzir as cargas no sistema de acionamento mecânico e proteger o gerador de possíveis sobrecargas. Em casos

de rajadas de vento com velocidades acima de U_{co} , o controle da potência aerodinâmica realiza a estolagem da turbina.

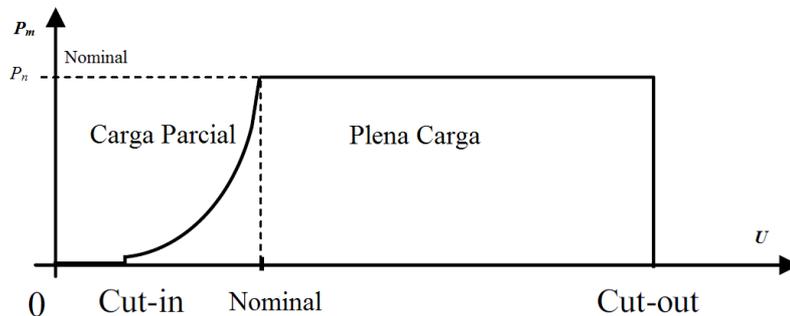


Figura 6: Potência mecânica x Velocidade do vento. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).

2.1.3 Sistema de transmissão mecânica

O sistema de transmissão mecânica conecta o subsistema aerodinâmico (turbina eólica) ao subsistema eletromagnético (gerador elétrico). Sua função é transmitir o movimento rotacional do rotor da turbina para o gerador. A estrutura deste subsistema depende de cada tecnologia utilizada no SCEE. A mais popular é composta por multiplicadores de velocidade, que realizam a transmissão de potência mecânica por meio de uma caixa de engrenagens com uma razão de multiplicação (ACKERMANN, 2005).

Na Figura 7 é ilustrado um típico sistema de transmissão. A multiplicação de velocidade realizada pela caixa de engrenagens divide a transmissão em duas partes: o eixo de velocidade baixa (EVB), no qual o rotor da turbina está acoplado, e o eixo de velocidade alta (EVA) que, por sua vez, está acoplado ao eixo do gerador (MUNTEANU et al., 2008).

Os parâmetros do sistema de transmissão do SCEE presente no simulador da MathWorks[®] são descritos na Seção A.5, do Apêndice A.

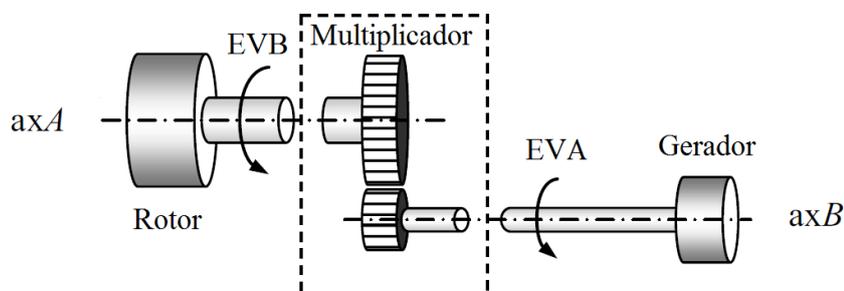


Figura 7: Sistema de transmissão mecânica. Fonte: adaptado de Munteanu et al. (2008).

2.1.4 Sistema de geração de potência elétrica

O sistema de geração de potência elétrica engloba, ambos, subsistema eletromagnético e subsistema elétrico. Além do gerador elétrico e dispositivos de eletrônica de potência, também utiliza-se neste sistema um transformador para possibilitar a compatibilidade de tensão com a rede. A topologia do sistema de geração depende do tipo de máquina elétrica utilizada e de sua interface de conexão com a rede (ACKERMANN, 2005).

O simulador da MathWorks® emprega a topologia de um SCEE de Velocidade Fixa, ilustrada na Figura 8.

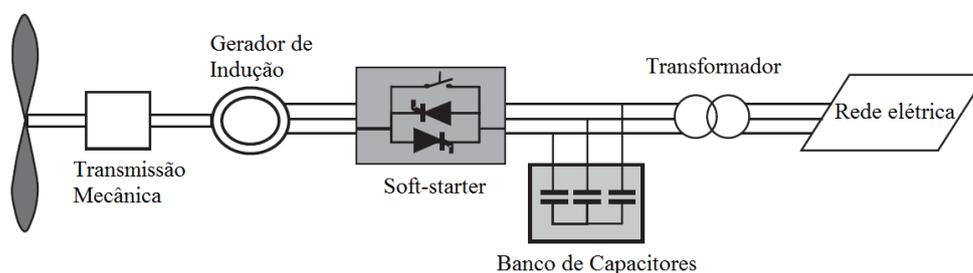


Figura 8: Topologia do SCEE de velocidade fixa. Fonte: adaptado de Ackermann (2005).

Na configuração do SCEE ilustrado na Figura 8, industrialmente conhecido como o *conceito dinamarquês*, a turbina eólica opera com velocidade fixa e um gerador de indução conectado à rede através de um transformador (ACKERMANN, 2005). Devido o constante consumo de potência reativa por parte da máquina de indução, nesta topologia é utilizado um banco de capacitores para compensar o consumo de reativos. A conexão mais suave com a rede elétrica é feita usando-se uma soft-starter.

Os parâmetros do gerador de indução e da rede elétrica do SCEE do simulador da MathWorks® são apresentados nas Seções A6 e A7 do Apêndice A.

2.2 Controle do SCEE

Esta seção foi elaborada para descrever a estrutura do sistema de controle projetado para o desenvolvimento dos testes realizados nesta dissertação. Existem algumas particularidades que devem ser destacadas com relação ao modelo do SCEE proposto pela MathWorks®. Caso o leitor deseje ter uma visão geral dos sistemas de controle aplicados para

cada topologia do SCEE recomenda-se a leitura dos trabalhos de Burton et al. (2001) e Ackermann (2005).

De maneira geral, o controle dos sistemas de geração eólica são elaborados com dois objetivos principais: **(i)** possibilitar geração de potência de maneira a garantir que o SCEE esteja dentro dos padrões de qualidade de energia; **(ii)** reduzir as cargas dinâmicas do sistema, garantindo certo nível de resiliência às partes mecânicas bem como a diminuição dos custos energéticos (BURTON et al., 2001; MUNTEANU et al., 2008).

A estrutura do sistema de controle do ângulo de passo projetado para o modelo da turbina eólica proposto por Miller (2017), atua principalmente sobre os subsistemas aerodinâmico e mecânico. Portanto, a estratégia de controle que foi desenvolvida nesta dissertação buscou garantir o objetivo de controle **(ii)**. Na Figura 9 é ilustrado o sistema de controle aplicado ao SCEE em estudo.

O controle da velocidade do rotor da turbina é realizado por um Regulador de Velocidade (RV) atuando em uma malha externa, cujo sinal de comando é o ângulo de ataque desejado α^* para manter o rotor operando em sua referência de velocidade Ω_r^* . É assumido que o ângulo de inclinação,

$$\phi = \arctg\left(\frac{U_\infty}{\Omega_r}\right), \quad (2.15)$$

pode ser medido e portanto, através da Equação (2.11), é definido o ângulo de passo desejado β^* para manter a velocidade Ω_r^* .

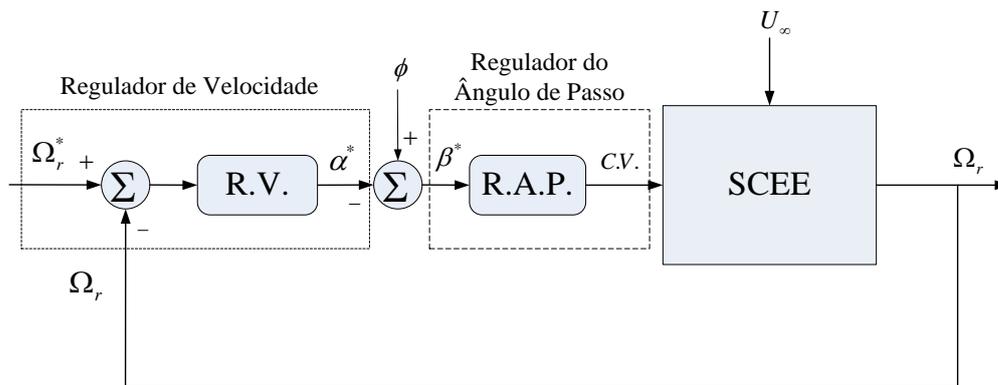


Figura 9: Diagrama de blocos do sistema de controle do ângulo de passo.

O Regulador do Ângulo de Passo (RAP), por sua vez, atua em uma malha de controle interna e externa recebendo o sinal de comando β^* fornecido pelo RV. O sinal de

controle do RAP é o comando da válvula proporcional, *C.V.*, responsável por controlar o sistema hidráulico que manipula a posição das pás da turbina. O RAP deve ter ganho unitário para que não gere erro de regime na malha externa de velocidade. Esse tipo de abordagem é similar ao que vem sendo realizado em trabalhos recentes encontrados na literatura, como é o caso em Xiao et al. (2014).

Em Hau (2005) é explicado que o controle do ângulo de passo pode ser resumido na composição dos dois controladores, RV e RAP (malha externa e malha interna). Sendo portanto, a função principal do RV, determinar o ângulo de ataque desejado. O RAP, por sua vez, recebe o sinal de comando e ajusta a posição dos atuadores hidráulicos de forma a manter o ângulo de passo num valor que garanta a velocidade de operação do sistema.

Nesta dissertação, optou-se por enfatizar as distinções entre o RV e o RAP. Contudo, é necessário ter mente que, a operação em conjunto destes reguladores, consiste no controle do ângulo de passo (HAU, 2005).

Nas subseções a seguir, ambos controladores são detalhados, RV e RAP.

2.2.1 Regulador de velocidade

O Regulador de Velocidade é projetado para manter o sistema operando na mesma frequência da rede elétrica a qual este é conectado. Este controle é ilustrado na Figura 10. O sinal de erro e é dado pela diferença entre a referência de velocidade Ω_r^* e a velocidade do rotor da turbina Ω_r , medida.

No SCEE da MathWorks[®], o RV projetado é um controlador PI (Proporcional-Integral) paralelo contínuo que determina o ângulo de ataque α^* . No presente estudo, os controladores projetados estão todos no domínio digital. No Capítulo 4, será apresentado o projeto do controlador digital utilizado para substituir o RV contínuo que já vem no simulador.

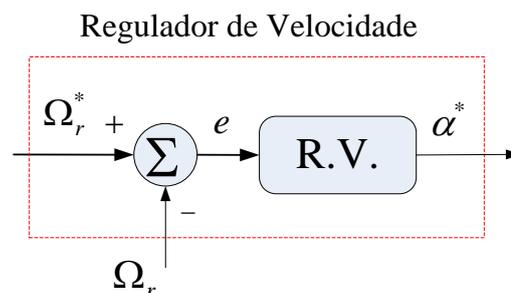


Figura 10: Regulador de velocidade.

2.2.2 Regulador do ângulo de passo

A principal função do mecanismo que envolve a regulação do ângulo de passo das pás de turbinas eólicas, consiste em realizar o controle da potência e velocidade do SCEE (HAU, 2005). Nos sistemas de Velocidade Fixa, o controle de potência é destinado a manter o SCEE funcionando dentro de seus limites de operação. Em relação ao controle de velocidade, foi explorada, nesta investigação, a operação em regime de plena carga, na qual o controle do ângulo de passo é aplicado com o intuito principal de controlar a velocidade do rotor, a partir do comando dado pela malha externa³ (ver Figura 9).

Os sistemas de controle do ângulo de passo de turbinas eólicas, de uma maneira geral, podem ser divididos em duas categorias: **(i)** controle coletivo e **(ii)** controle individual (BOSSANYI, 2003). O SCEE do simulador em estudo, tem o sistema de regulação da categoria **(ii)**. O controle individual do ângulo de passo é implementado nos casos em que cada hélice possui um atuador hidráulico, que movimentam suas pás, e que possuem um comando de válvula individual. Um sistema de controle individual do ângulo de passo é ilustrado na Figura 11. A turbina eólica do SCEE estudado possui três pás. Sendo assim, foram projetados três RAP, um para cada pá.

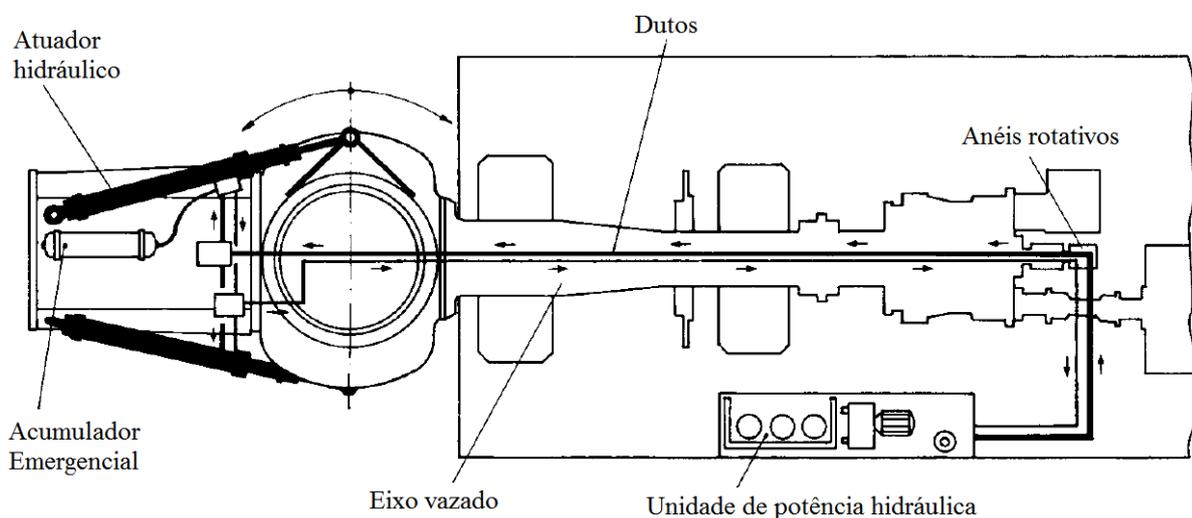


Figura 11: Sistema de atuação do controle individual do ângulo de passo. Fonte: adaptado de Hau (2005).

³ Pode parecer redundante esta afirmação. Mas é fornecida com o intuito de enfatizar que o controle do ângulo de passo é realizado pelo funcionamento de duas malhas de controle (externa e interna). Isto não é esclarecido em alguns trabalhos da literatura relacionada a este tema, como em Muljadi et al (2013).

O Regulador do Ângulo de Passo é responsável por manter o ângulo β em um valor $\beta^* = \phi - \alpha^*$. O RAP atua como um controlador de malha interna, uma vez que depende do valor do ângulo de ataque desejado α^* determinado pelo RV.

O bloco do RAP é ilustrado no diagrama da Figura 12. O controle consiste em regular a posição do atuador hidráulico que movimentam as pás da turbina. A posição do atuador E é proporcional ao ângulo de passo das pás β (ver Tabela B1 no Apêndice B).

Portanto, o sinal de comando β^* equivale ao sinal de posição E^* desejado para que o atuador hidráulico mantenha o ângulo de passo das pás igual a β^* .

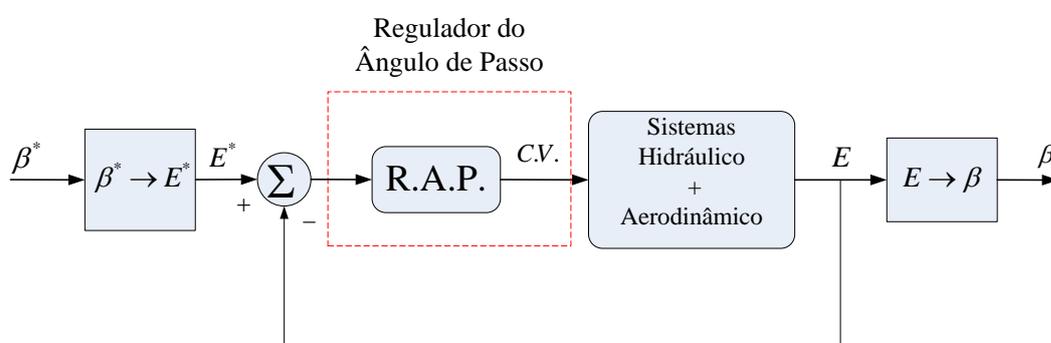


Figura 12: Regulador do ângulo de passo.

A posição do atuador é determinada pelo sinal de comando $C.V.$, cujo o intervalo vai de -1 a 1, gerado pelo RAP. O qual, no modelo descrito no Apêndice A, é um controlador PID contínuo. Nesta pesquisa, o controle do ângulo de passo, assim como o RV, foi feito por meio de controladores digitais cujo o projeto está descrito no Capítulo 4.

2.3 Conclusão do capítulo

Neste capítulo foi apresentado brevemente os principais conceitos relacionados ao funcionamento e controle do SCEE em estudo. Destacou-se como é realizada a modelagem da velocidade do vento, a qual é a principal variável do sistema e que condiciona fortes características estocásticas ao processo de geração eólica.

Para que o leitor obtivesse uma visão geral do SCEE, foram apresentados cada um dos subsistemas que o compõem, identificando a topologia do SCEE de Velocidade Fixa.

Foi também apresentada a estrutura de controle utilizada, bem como os dois controladores empregados, i. e., um Regulador de Velocidade e um Regulador do Ângulo de Passo. No capítulo seguinte, será feito o estudo das técnicas que serão aplicadas ao projeto do RV e do RAP.

3 CONTROLADOR RST, CONTROLADOR GMV E AUGMENTAÇÃO ESTOCÁSTICA

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas de controle que foram utilizadas para o projeto dos controladores digitais aplicados na presente investigação. O objetivo deste capítulo é oferecer uma preparação para leitura do Capítulo 4 no qual é descrito o projeto dos controladores implementados no SCEE em estudo. Com base na Teoria de Controle, serão apresentados os controladores RST, GMV e a Augmentação Estocástica.

A estrutura canônica RST é uma forma de implementação de controladores digitais baseada em modelos determinísticos de sistemas SISO (ASTROM; WITTENMARK, 1996). Tal estrutura de controle pode ser aplicada como solução de diversos problemas. No contexto dos sistemas de geração de energia elétrica, tem-se o exemplo de tal aplicação em trabalhos como o de Silva et al. (2015), onde esta técnica resolve o problema da regulação de velocidade de turbinas hidráulicas. Na presente pesquisa, aplicou-se o controlador digital com estrutura RST ao SCEE através da transferência do *loop-shaping* de sua malha ao controlador GMV.

O GMV é um controlador que foi desenvolvido por Clarke e Gawthrop (1975). Suas origens estão na metodologia de projeto chamada controle de variância mínima (SILVEIRA; COELHO, 2011). Proposto por Astrom e Wintternmark (1973), o MVC tem suas bases na teoria de controle ótimo e estocástico e é considerado o precursor do GMV. A escolha do controlador GMV justifica-se devido sua capacidade de oferecer um tratamento adequado às perturbações estocásticas presentes no sistema (SILVEIRA et al., 2016). Esta propriedade é acrescentada ao controlador RST utilizando a Augmentação Estocástica.

A Augmentação Estocástica é uma técnica de controle que acrescenta propriedades estocásticas à controladores determinísticos (TRENTINI et al., 2016; PINHEIRO et al., 2016). A base para esta metodologia de projeto reside na teoria de controle linear, preditivo e estocástico. O método une as características de projeto de controladores lineares, com estrutura canônica RST, ao tratamento adequado das perturbações do tipo estocásticas por meio da transferência do *loop-shaping* da malha RST ao controlador GMV. Em Trentini et al. (2016), a AE foi aplicada ao problema de regulação da tensão nos terminais de uma máquina síncrona. Já em Pinheiro et al. (2016) sua aplicação se estende ao controle de um motor de corrente contínua. Nesta dissertação, até onde foi investigado na literatura, a aplicação será inédita na solução dos problemas de controle em SCEE.

Nas seções a seguir serão descritas com mais detalhes cada uma das estratégias de projeto de controladores.

3.1 Controlador RST

Utilizada como solução do problema de alocação polinomial no domínio das funções de transferência, a estrutura canônica RST é uma forma generalizada de se representar um controlador discreto atuando sobre um sistema $G(z^{-1})$, como ilustrado na Figura 13.

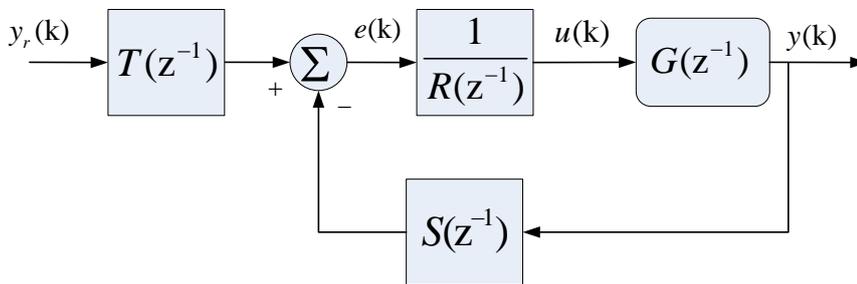


Figura 13: Estrutura canônica RST.

A forma RST possui a variável de controle $u(k)$ e uma entrada, a qual é o sinal de referência $y_r(k)$ e a saída medida $y(k)$. A lei de controle generalizada é expressa por

$$R(z^{-1})u(k) = T(z^{-1})y_r(k) - S(z^{-1})y(k), \quad (3.1)$$

sendo os polinômios generalizados $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ e $T(z^{-1})$ definidos no domínio do operador de atraso z^{-1} conforme

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + \dots + r_{n_r} z^{-n_r}, \quad (3.2)$$

$$S(z^{-1}) = s_0 + s_1 z^{-1} + \dots + s_{n_s} z^{-n_s}, \quad (3.3)$$

$$T(z^{-1}) = t_0 + t_1 z^{-1} + \dots + t_{n_t} z^{-n_t}. \quad (3.4)$$

O projeto de controladores com a estrutura generalizada RST soluciona o problema de alocação de polos e zeros e torna possível a imposição de qualquer dinâmica, dentro do domínio linear, de malha fechada. Além de fornecer uma lei de controle com dois graus de liberdade, i. e., os problemas de regulação e rastreamento são tratados de maneira separada (ÅSTRÖM; WINTTENMARK, 1996).

Dependendo do tipo de sistema, a solução da alocação polinomial de polos pode ter duas alternativas de projeto: posicional ou incremental. Na presente investigação são projetados os controladores pelo método incremental, descrito a seguir.

Considere uma planta linear genérica descrita como o modelo

$$G(z^{-1}) = \frac{y(k)}{u(k)} = \frac{B(z^{-1})z^{-d}}{A(z^{-1})}, \quad (3.5)$$

onde d é o atraso de tempo discreto. Conectando-se a planta à forma canônica da Figura 12, é possível obter de maneira analítica a lei de controle RST substituindo-se a Equação (3.1) na Equação (3.5), que resultará na equação de malha fechada da malha de controle, da referência $y_r(k)$ para a saída $y(k)$, desenvolvendo as seguintes equações:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})z^{-d}u(k) \quad (3.6)$$

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})z^{-d} \left[\frac{T(z^{-1})y_r(k) - S(z^{-1})y(k)}{R(z^{-1})} \right], \quad (3.7)$$

$$\left[R(z^{-1})A(z^{-1}) + S(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d} \right] y(k) = B(z^{-1})z^{-d}T(z^{-1})y_r(k), \quad (3.8)$$

que resultará em

$$\frac{y(k)}{y_r(k)} = \frac{B(z^{-1})T(z^{-1})z^{-d}}{R(z^{-1})A(z^{-1}) + S(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d}}. \quad (3.9)$$

Analisando-se a Equação (3.9), é possível perceber que ao considerar os polinômios $B(z^{-1})$ e $A(z^{-1})$ que descrevem o processo, bastaria determinar os polinômios RST capazes de fornecer uma dinâmica de malha fechada desejada,

$$G_{mf}(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})T(z^{-1})z^{-d}}{R(z^{-1})A(z^{-1}) + S(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d}}. \quad (3.10)$$

Por se tratar de uma estrutura generalizada, os polinômios $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ e $T(z^{-1})$, admitem infinitas soluções para estabelecer a função de transferência de malha fechada $G_{mf}(z^{-1})$.

Neste trabalho, será aplicado o método baseado em Åström e Winttenmark (2011), por meio do qual é possível obter polinômios RST do tipo compensador dinâmico, que contém uma parcela observadora, evitando o cancelamento de polos e garantindo maior robustez à malha de controle (ÅSTRÖM; WINTTENMARK, 1996).

O compensador dinâmico no domínio das funções de transferência é garantido porque em Åström e Wittenmark (2011) a função de transferência de malha fechada desejada é imposta por meio de uma parcela controladora $H_c(z^{-1})$ vezes a parcela observadora $H_o(z^{-1}) = A(z^{-1})$. Além disso, tem-se a garantia de *offset* nulo da referência para saída através da compensação do ganho estático com $T(z^{-1})$ e os zeros de malha aberta do sistema $B(z^{-1})$.

Igualando-se a função de transferência de malha fechada desejada da Equação (3.9) com a relação de alocação descrita no parágrafo anterior, tem-se

$$G_{mf}(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})T(z^{-1})z^{-d}}{H_c(z^{-1})H_o(z^{-1})}, \quad (3.11)$$

$$\frac{B(z^{-1})T(z^{-1})z^{-d}}{R(z^{-1})A(z^{-1}) + S(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d}} = \frac{B(z^{-1})T(z^{-1})z^{-d}}{H_c(z^{-1})H_o(z^{-1})}, \quad (3.12)$$

de onde pode-se definir o polinômio característicos de malha fechada desejado, como,

$$H_{mf}(z^{-1}) = R(z^{-1})A(z^{-1}) + S(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d} = H_c(z^{-1})H_o(z^{-1}). \quad (3.13)$$

O polinômio $H_{mf}(z^{-1})$ é mônico e descrito por,

$$H_{mf}(z^{-1}) = 1 + h_1 z^{-1} + \dots + h_{n_h} z^{-n_h}. \quad (3.14)$$

A Equação (3.12) é uma Equação de Diophantine, e em geral admite mais de uma solução (ÅSTRÖM; WINTTENMARK, 1996; SILVEIRA, 2012; SILVA et al., 2016).

Para o tratamento pelo método incremental, é válido lembrar que a ação incremental no domínio digital equivale à ação integral no domínio de tempo contínuo. Esta ação garante que o sinal de erro, dado pela diferença entre a referência e saída medida, seja nulo em regime permanente.

Em Silveira (2015), é fornecido um artifício matemático para que plantas não integradoras recebam um integrador. Por meio da aproximação *Backward* $\frac{1}{s} := \frac{1}{\Delta}$, onde

$\Delta = 1 - z^{-1}$, é possível aumentar artificialmente a descrição do modelo de projeto incluindo

$\frac{1}{s} := \frac{1}{\Delta}$ no modelo da planta, como

$$\frac{1}{\Delta} \frac{y(k)}{u(k)} = \frac{1}{\Delta} \frac{B(z^{-1})z^{-d}}{A(z^{-1})}, \quad (3.15)$$

$$\Delta A(z^{-1})y(k) = \Delta u(k)B(z^{-1})z^{-d}. \quad (3.16)$$

Agora o problema de alocação polinomial RST será resolvido para o novo sistema descrito na Equação (3.15) tendo o polinômio aumentado $\Delta A(z^{-1})$,

$$\Delta A(z^{-1}) = (1 - z^{-1})A(z^{-1}) \quad (3.17)$$

e para a síntese da lei de controle $\Delta u(k)$ e não mais para $u(k)$.

Sendo assim, a equação de Diophantine também será modificada e é expressa por,

$$H_{mf}(z^{-1}) = R(z^{-1})\Delta A(z^{-1}) + S(z^{-1})B(z^{-1})z^{-d}. \quad (3.18)$$

Ressalta-se que, apesar de oferecer solução para uma variedade de problemas e atingir índices de robustez, normalmente, satisfatórios, a estratégia de controle RST fornece controladores baseados em modelos determinísticos. No caso da planta genérica analisada nesta seção, os polinômios $B(z^{-1})$ e $A(z^{-1})$ poderiam até ter sido obtidos a partir de uma descrição de modelo do tipo ARMAX. Contudo, o projeto do controlador não inclui no modelo, as perturbações do tipo estocásticas, fazendo com que os controladores obtidos apresentam perda de desempenho, ao estabelecerem margens conservadoras de filtragem de dinâmicas de alta frequência, reduzindo a banda passante da malha de controle para se ter baixa sensibilidade ao ruído e incertezas de alta frequência (STEVENS; LEWIS, 2016).

Na seção seguinte, será apresentado o controlador GMV que oferece solução para o tratamento de perturbações do tipo estocásticas.

3.2 Controlador GMV

A teoria de controle GMV parte de um modelo ARMAX

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})z^{-d}u(k) + C(z^{-1})\xi(k), \quad (3.19)$$

sendo $d \in \mathbb{N}^*$, $y(k) \in \mathbb{R}$, $u(k) \in \mathbb{R}$, $\xi(k) \in \mathbb{R}$, dados que representam, respectivamente, o atraso de tempo discreto, a saída, a entrada e uma sequência randômica do tipo ruído branco de variância σ_ξ^2 .

Os polinômios $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ e $C(z^{-1})$ representam o comportamento dinâmico do sistema e estão descritos no domínio do operador de atraso z^{-1} com as seguintes formas canônicas:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}, \quad (3.20)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}, \quad (3.21)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c}. \quad (3.22)$$

Conforme Clarke e Gawthrop (1975), o problema de controle GMV consiste em otimizar uma saída generalizada a d passos a frente, isto é,

$$\phi(k+d) = P(z^{-1})y(k+d) - T_{gmv}(z^{-1})y_r(k+d) + Q(z^{-1})u(k), \quad (3.23)$$

tenda ao seu valor mínimo pela minimização do índice de desempenho quadrático,

$$J = \mathbf{E}[\phi^2(k+d)] \quad (3.24)$$

derivado em função do sinal de controle $u(k)$,

$$\frac{\partial J}{\partial u(k)} = 0. \quad (3.25)$$

Na Equação (3.24), o operador $\mathbf{E}[\cdot]$ representa a esperança matemática. Os polinômios $P(z^{-1})$, $T_{gmv}(z^{-1})$ e $Q(z^{-1})$ filtram a saída $y(k+d)$, a sequência de referência $y_r(k+d)$ e o sinal de controle $u(k)$, respectivamente. Os polinômios P , T_{gmv} , Q são responsáveis por ponderar a saída generalizada $\phi(k+d)$ e conseqüentemente, o índice de desempenho do GMV na Equação (3.24). Baseando-se em Clarke e Gawthrop (1975) define-se os polinômios P , T_{gmv} , Q como

$$P(z^{-1}) = p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{n_p} z^{-n_p}, \quad (3.26)$$

$$T_{gmv}(z^{-1}) = t_{gmv_0} + t_{gmv_1} z^{-1} + \dots + t_{n_{tgmv}} z^{-n_{tgmv}}, \quad (3.27)$$

e

$$Q(z^{-1}) = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{n_q} z^{-n_q}. \quad (3.28)$$

Analisando-se a Equação (3.23), da saída generalizada, é possível notar que os dados futuros do sinal de referência, $y_r(k+d)$, podem ser conhecidos. Contudo, para a saída $y(k+d)$, não se tem os dados futuros disponíveis. Segundo Silveira (2012), é necessário prever a saída do sistema d – passos à frente para que o controlador GMV possa compensar o atraso de maneira intrínseca.

Sendo assim, para encontrar a solução do MVP (do inglês *Minimum Variance Predictor*), deve-se incluir o filtro $P(z^{-1})$, presente em (3.23), na descrição do sistema ARMAX, conforme

$$P(z^{-1})y(k+d) = \frac{P(z^{-1})B(z^{-1})u(k)}{A(z^{-1})} + \frac{P(z^{-1})C(z^{-1})\xi(k+d)}{A(z^{-1})}. \quad (3.29)$$

Da Equação (3.29) percebe-se a influência do ruído branco $\xi(k+d)$ sobre os dados da saída $y(k+d)$. O problema do MVP é solucionado a partir da melhor informação disponível sobre $\xi(k)$ e separando-se a parcela relacionada a $\xi(k+d)$ em dados presentes e futuros como em Silveira e Coelho (2011),

$$\frac{P(z^{-1})C(z^{-1})\xi(k+d)}{A(z^{-1})} = \underbrace{\frac{F(z^{-1})}{A(z^{-1})}}_{\text{presente}} \xi(k) + \underbrace{E(z^{-1})\xi(k+d)}_{\text{futuro}}, \quad (3.30)$$

onde $F(z^{-1})$ e $E(z^{-1})$ são os polinômios que explicam a relação $\frac{P(z^{-1})C(z^{-1})\xi(k+d)}{A(z^{-1})}$. Com a devida análise e substituições desenvolvidas por Silveira (2012), chega-se à versão modificada da Equação (3.29), com base nas informações disponíveis até o instante k , isto é, a saída predita é

$$\hat{y}(k+d|k) = \frac{B(z^{-1})E(z^{-1})u(k) + F(z^{-1})y(k)}{A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1})}. \quad (3.31)$$

Considerando a Equação (3.30), é possível constatar que,

$$P(z^{-1})C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}). \quad (3.32)$$

A partir de (3.32) escreve-se então a equação do preditor, conforme:

$$\hat{y}(k+d|k) = \frac{B(z^{-1})E(z^{-1})u(k) + F(z^{-1})y(k)}{P(z^{-1})C(z^{-1})}. \quad (3.33)$$

Segundo Silveira (2012), o filtro $P(z^{-1})$ deve ser conhecido e atribuído pelo projetista. De onde chega-se à conclusão que a solução do MVP consiste em calcular os polinômios $F(z^{-1})$ e $E(z^{-1})$ da Equação (3.32) que é uma identidade polinomial designada como uma Equação de Diophantine (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 1973; CLARKE; GAWTHROP, 1975; SILVEIRA, 2012).

Baseando-se no trabalho de Clarke e Gawthrop (1975), os polinômios $F(z^{-1})$ e $E(z^{-1})$ podem ser obtidos por

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1} + f_2z^{-2} + \dots + f_{n_f}z^{-n_f}, \quad (3.34)$$

$$n_f = \max \left[(n_p + n_c), (n_a - 1 + n_e) \right] - d. \quad (3.35)$$

$$E(z^{-1}) = e_0 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots + e_{n_e} z^{-n_e}, \quad (3.36)$$

$$n_e = d - 1; \quad (3.37)$$

onde n_p , n_c , $n_{\delta a}$, são, respectivamente, a ordem dos polinômios P , C e ΔA .

Para finalizar a análise do problema de controle GMV, resta apenas encontrar a sua lei de controle. Esta pode ser obtida substituindo-se a equação do preditor (3.33) na Equação (3.23), de onde se reescreve a expressão para a saída generalizada em sua forma estimada com os dados disponíveis até o instante k , dada por

$$\hat{\phi}(k+d | k) = P(z^{-1})\hat{y}(k+d | k) - T_{gmv}(z^{-1})y_r(k+d) + Q(z^{-1})u(k). \quad (3.38)$$

Substituindo a Equação (3.38) em (3.24) e solucionando problema de otimização, encontra-se a lei de controle do GMV dada por

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})T_{gmv}(z^{-1})y_r(k+d) - F(z^{-1})y(k)}{B(z^{-1})E(z^{-1}) + Q(z^{-1})C(z^{-1})}. \quad (3.39)$$

Neste momento, espera-se que o leitor tenha se familiarizado com o problema de controle GMV. A partir de então, para fins de contextualização do que foi desenvolvido nesta dissertação, destaca-se que, assim como no caso da alocação polinomial de polos e zeros via estrutura de controladores RST, o problema do GMV foi aplicado para o caso incremental.

Para o tratamento do caso incremental, o projeto do GMV parte de uma descrição ARIMAX (do inglês *Auto-Regressive Integrated-Moving-Average with eXogenous inputs*), dada por

$$\Delta A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})z^{-d}\Delta u(k) + C(z^{-1})\xi(k), \quad (3.40)$$

A partir de (3.40), ocorre uma alteração da saída generalizada conforme,

$$\phi(k+d) = P(z^{-1})y(k+d) - T_{gmv}(z^{-1})y_r(k+d) + Q(z^{-1})\Delta u(k). \quad (3.41)$$

O problema de otimização agora é dado em função de $\Delta u(k)$, tal que

$$\frac{\partial \mathbf{E}[\phi^2(k+d)]}{\partial \Delta u(k)} = 0. \quad (3.42)$$

A Equação de Diophantine também sofre alteração, como em

$$P(z^{-1})C(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}). \quad (3.43)$$

Assim como,

$$n_f = \max \left[(n_p + n_c), (n_{\delta a} - 1 + n_e) \right] - d. \quad (3.44)$$

Com o mesmo procedimento utilizado para encontrar (3.39), obtém-se a lei de controle incremental do controlador GMV

$$\Delta u(k) = \frac{C(z^{-1})T_{gmv}(z^{-1})y_r(k+d) - F(z^{-1})y(k)}{B(z^{-1})E(z^{-1}) + Q(z^{-1})C(z^{-1})}. \quad (3.45)$$

Por fim, é válido ressaltar que existe uma analogia entre a estrutura generalizada RST e o problema de controle GMV com os polinômios $PT_{gmv}Q$. Esta é uma das razões que permitem o desenvolvimento da AE, descrita na seção a seguir.

3.3 Augmentação Estocástica

Para dar início ao estudo do conceito da Augmentação Estocástica, faz-se necessário estabelecer um ponto de partida. Por se tratar de um procedimento pouco explorado dentro da literatura, é válido fazer a seguinte pergunta: Por que a Augmentação Estocástica?

Na tentativa de responder este questionamento, será realizada a mesma análise feita em Silveira e Silva (2015) a respeito da teoria do MVC.

O conceito por trás do controle de variância mínima consiste em dizer que o controlador é capaz de ver através dos dados da saída contaminada com o ruído e separá-la em duas partes: **(i)** uma delas é possível modificar. **(ii)** A outra é simplesmente inacessível. No último caso, o controlador de variância mínima sabe que é ruído e nada pode ser feito para mitigá-lo uma vez que este ruído existe como uma discrepância e não como uma variação da condição física da saída medida.

Fazendo uma análise da perspectiva do sinal de saída, somente, em malha aberta, este sinal será composto de seu valor médio em torno do valor em que se deseja que a variável física se mantenha, mais o ruído. Note que se não existir mudanças no valor de entrada do sistema, em malha aberta, idealmente, a saída irá manter seu valor médio mais o ruído. No entanto, na configuração do sistema de malha fechada, o ruído será realimentado e conseqüentemente processado pela planta. Sendo assim, os resíduos dinâmicos do ruído irão surgir e poderão, de fato, desviar a saída para valores distantes do qual deseja-se que ela esteja.

Da perspectiva de um problema puramente regulatório, o controle de variância mínima estabelece que o sinal de saída se comportaria de forma a corresponder exatamente ao

próprio ruído. Para ilustrar graficamente esta afirmação, Silveira e Silva (2015) reproduzem o exemplo apresentado em Åström (1970) com o projeto do regulador de variância mínima baseado em dois modelos, ARX (do inglês *Auto-Regressive with eXogenous inputs*) e ARMAX. Na Figura 14 é ilustrado este resultado. Considere que as informações em, $y(k)$, $u(k)$, $\xi(k)$ e σ^2 representam, respectivamente, a saída, a entrada, a sequência ruído branco e os valores das variância dos sinais.

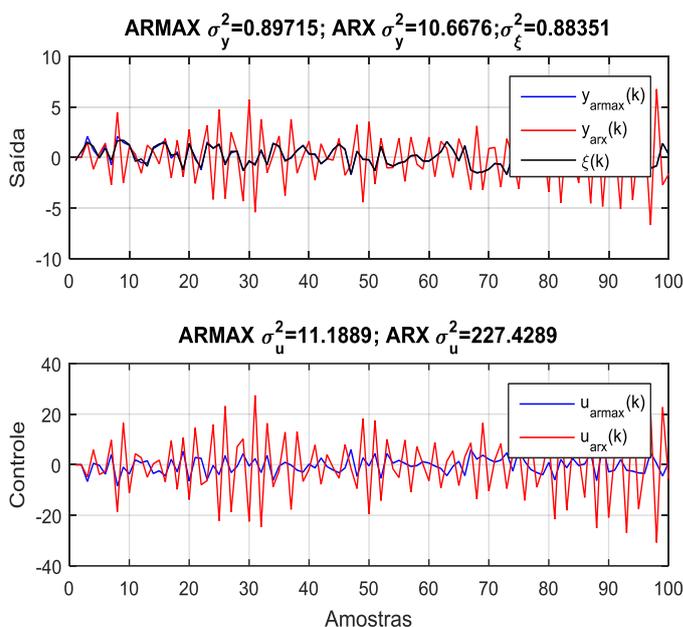


Figura 14: Exemplo com conceito de variância mínima.

A partir da análise da Figura 14, percebe-se que a saída $y(k)$ regulada pelo MVC baseado no modelo ARMAX, converge para entrar em fase com o ruído $\xi(k)$ a medida que k tende ao infinito. No teste regulatório em questão, não existe restrições para o sinal de comando $u(k)$, ou seja, toda a energia que se pode usar para garantir a variância mínima da saída será usada, o que raramente ocorre na prática. No projeto do controlador GMV, por outro lado, tem-se um caso subótimo, onde é possível sintonizar o consumo de energia e ao mesmo tempo manter as variâncias dos sinais com valores adequados, no senso de variância mínima (SILVEIRA; SILVA, 2015; SILVEIRA et al., 2016).

É neste cenário que se optou por realizar a Augmentação Estocástica. O princípio da AE explorado nesta investigação, consiste em usar a estrutura generalizada RST, que baseia-se em modelos determinísticos, para fornecer o *loop-shaping* de sua malha ao controlador GMV que, por sua vez, é projetado com base em modelos que incluem as parcelas determinística e estocástica do processo.

Num senso estocástico, o que se tem com esta augmentação é um controlador com as mesmas características advindas do *shape* RST, contudo melhor, devido a capacidade do controlador GMV atenuar os efeitos da realimentação do ruído, característica herdada do MVC como descrito por Silveira e Silva (2015) e Silveira et al. (2016).

Com o intuito de fornecer ao leitor o formalismo matemático do conceito da AE, é apresentada a análise a seguir.

Considerando que exista um sinal $u(k)$ que estabilize um sistema ARMAX como em (3.19), é garantido que $\phi(\infty) \rightarrow 0$, no caso determinístico. Sendo assim, a estrutura RST dada pela Equação (3.1) e a saída generalizada em (3.23) assemelham-se no seguinte formato

$$R(z^{-1})u(k) = T(z^{-1})y_r(k) - S(z^{-1})y(k), \quad (3.46)$$

$$Q(z^{-1})u(k) = T_{gmv}(z^{-1})y_r(k+d) - P(z^{-1})y(k+d). \quad (3.47)$$

Encontra-se uma equivalência presente nos polinômios responsáveis por filtrar, respectivamente, a referência $y_r(k)$, a saída $y(k)$ e o sinal de controle $u(k)$, tal que

$$S(z^{-1}) := P(z^{-1}), \quad (3.48)$$

$$T_{gmv}(z^{-1}) := T(z^{-1}), \quad (3.49)$$

$$R(z^{-1}) := Q(z^{-1}). \quad (3.50)$$

Como é necessário encontrar os polinômios $F(z^{-1})$ e $E(z^{-1})$ para a realização do projeto do controlador GMV, a Equação de Diophantine em (3.32) é alterada por meio da Equação (3.47) e, portanto, tem-se

$$S(z^{-1})C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}), \quad (3.51)$$

o que garante a transferência do *loop-shaping* do controlador RST para o GMV.

Note que esta analogia se estende para o caso incremental (PINHEIRO et al., 2016; TRENTINI et al., 2016).

3.4 Conclusão do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a Teoria de Controle que deu fundamento ao trabalho desenvolvido nesta dissertação. Foram apresentados os principais conceitos e procedimentos necessários para a realização do projeto de cada um dos controladores aplicados nesta pesquisa, i. e., a estrutura de controle RST, o controlador GMV e a AE. Foi

dado destaque para o projeto considerando o caso incremental, a partir de modelos ARIMAX do sistema.

Por fim, foi fornecida uma justificativa, baseada na teoria de controle estocástico, para o emprego AE. No capítulo 4, será apresentada aplicação da teoria aqui vista, através do projeto de controladores baseados em modelos identificados do SCEE.

4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA E PROJETO DO REGULADOR DO ÂNGULO DE PASSO

Neste capítulo será apresentada a metodologia aplicada na identificação do sistema bem como o projeto dos controladores implementados ao SCEE.

Apesar desta pesquisa não se tratar especificamente do tema de identificação de sistemas, buscou-se seguir com o devido rigor os métodos recomendados pela literatura. Além disso, os controladores projetados são baseados em modelos, o que evidencia a necessidade de se realizar corretamente a tarefa de identificação. Na metodologia de identificação, optou-se por utilizar a *System Identification Toolbox*TM da MathWorks[®], mais conhecida pelo uso de seu aplicativo, o IDENT (LJUNG, 2015). O IDENT do MATLAB[®] é uma poderosa ferramenta computacional utilizada para a identificação de sistemas. Tem sido utilizada como base para diversos trabalhos da literatura de Sistemas de Controle e também é em (AGUIRRE, 2014; COELHO; COELHO, 2015).

A terminologia de identificação de sistemas utiliza o termo "experimental", para denominar os dados coletados em experimentos realizados nos sistemas físicos reais. Sabe-se que simuladores podem falhar ao tentar reproduzir com total precisão o que ocorre nos sistemas físicos na prática. Contudo, devido o SCEE no simulador da MathWorks[®] reproduzir as dinâmicas e não linearidades presentes em sistemas de geração eólica reais com grau de precisão satisfatório (BALDO, 2012; MATHWORKS, 2016) e com o intuito de fornecer melhor compreensão dos procedimentos utilizados na identificação, optou-se por utilizar a nomenclatura para os dados coletados nos experimentos feitos no simulador como "dados experimentais".

Portanto, vale ressaltar, quando utilizado neste capítulo, o termo "dados experimentais", se refere à dados de entrada e saída coletados nos experimentos referente ao simulador do SCEE, uma vez que este é tratado como um sistema real. Ainda que, se saiba que foram dados levantados por simulações computacionais.

Com relação ao projeto dos controladores, vale ressaltar também que, um dos objetivos principais desta investigação, foi acrescentar melhoria ao sistema de regulação do ângulo de passo do SCEE em estudo. Sendo assim, o projeto dos controladores, com base nos métodos de projeto descritos no Capítulo 3, foram aplicados somente ao RAP. Para o projeto do controlador digital aplicado como RV, foi realizada a discretização do controlador PI que já vem no simulador.

Nas seções a seguir, são descritos os métodos utilizados para obtenção dos modelos ARMAX identificados e dos controladores resultantes da AE.

4.1 Identificação do SCEE

A estrutura de modelo generalizada dos sistemas de controle de malha aberta pode ser representada, conforme Coelho e Coelho (2015), como na Figura 15. As funções de transferência do processo, $G(z^{-1})$, e da perturbação⁴, $H(z^{-1})$, são descritas em Coelho e Coelho (2015), respectivamente, como,

$$G(z^{-1}) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (4.1)$$

e

$$H(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \quad (4.2)$$

A estrutura da função de transferência da Equação (4.1) é vastamente conhecida e representa a relação entre a saída do processo, $y(k)$, e a entrada do processo, $u(k)$. Em muitas aplicações, a função de transferência, $G(z^{-1})$, pode ser obtida por meio da identificação de modelos com estrutura ARX, como em Castro (2015). Neste caso, a função de transferência da perturbação, $H(z^{-1})$, possui valor unitário.

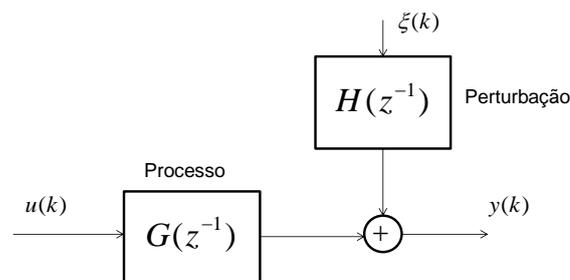


Figura 15: Representação de um modelo geral. Fonte: adaptado de Aguirre (2014) e Coelho e Coelho (2015).

Nesta pesquisa, por outro lado, foi dada a devida atenção à função de transferência de perturbação, $H(z^{-1})$. A função de transferência, $H(z^{-1})$, pode representar diversos tipos de perturbações, e.g.: dinâmicas não modeladas, efeitos causados por não linearidades e

⁴ Em Aguirre (2014), $H(z^{-1})$ é denominada como função de transferência do ruído. Mas como a entrada de perturbação, $\xi(k)$, pode representar perturbações do tipo carga e ruídos estocásticos, optou-se por usar o termo geral, i.e., perturbação.

perturbações estocásticas (COELHO; COELHO, 2015). Na TCE os controladores são projetados assumindo que as perturbações são estocásticas por natureza (ÅSTRÖM, 1970; COELHO; COELHO, 2015). O projeto do GMV segue esta mesma metodologia e baseia-se em modelos com estrutura ARMAX (CLARKE; GAWTHROP, 1975). Sendo assim, a estrutura de modelo escolhida para representar o sistema foi do tipo ARMAX, ilustrada na Figura 16. Tal abordagem foi necessária devido a principal variável do SCEE, o vento, ser intrinsecamente estocástica. A característica aleatória da velocidade do vento pode se propagar aos subsistemas do processo de geração eólica. Essa propagação pode ser caracterizada nos ruídos presentes em sensores. Os quais são modelados como na Equação (4.2).

A representação matemática do modelo ARMAX, ilustrado na Figura 16, pode ser expressa como,

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})z^{-d}u(k) + C(z^{-1})\xi(k). \quad (4.3)$$

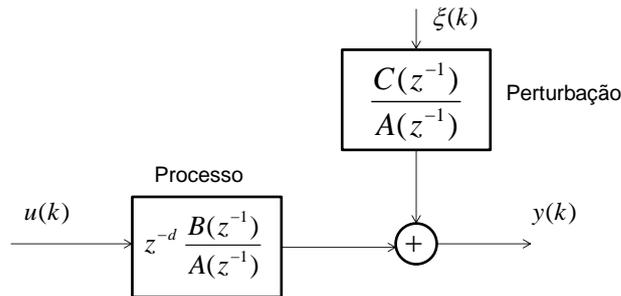


Figura 16: Representação de um modelo com estrutura ARMAX. Fonte: adaptado de Coelho e Coelho (2015).

Analisando-se o modelo ARMA (do inglês *Auto-Regressive Moving Average*), o qual é um caso particular do modelo ARMAX, sendo o ARMA descrito por

$$A(z^{-1})y(k) = C(z^{-1})\xi(k), \quad (4.4)$$

onde, $\xi(k)$ é uma sequência aleatória com média nula, utilizada para representar a perturbação, fica evidente que a função de transferência, $H(z^{-1})$, quantifica como o processo aleatório $\xi(k)$ afeta a saída $y(k)$ (AGUIRRE, 2014). Tal que,

$$H(z^{-1}) = \frac{y(k)}{\xi(k)} = \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \quad (4.5)$$

Feita esta breve apresentação da estrutura de modelo a ser utilizada para o projeto do Regulador de Ângulo de Passo, descrito na Subseção 4.2.2, é necessário ainda, antes de se apresentar os procedimentos de identificação, fazer mais uma consideração.

Sabe-se que a metodologia de identificação de sistemas, na maioria dos casos, precisa manter um compromisso entre o custo e o benefício, relacionados, respectivamente, à complexidade do modelo obtido e a melhoria efetiva em termos de desempenho dos controladores (Princípio da Parcimônia)(COELHO; COELHO, 2015). Na presente pesquisa, buscou-se tal compromisso e acredita-se tê-lo mantido. Foi levado em consideração que modelos do tipo ARMAX, em muitas aplicações, são considerados deveras complexos. Mas como descrito até aqui, é justificável a escolha desta estrutura. Tanto por ser base para projetos em TCE quanto os benefícios, os quais serão apresentados no Capítulo 5, obtidos ao se projetar controladores baseados em modelos que descrevem parcela determinística e estocástica do processo.

Nas subseções a seguir serão descritos: o teste dinâmico para se fazer a coleta dos dados para estimação do modelo, apresentação dos parâmetros estimados e validação dos modelos identificados. A identificação foi realizada de maneira não recursiva.

4.1.1 Teste Dinâmico e Coleta de Dados

Em identificação de sistemas, uma etapa importante consiste na realização de testes dinâmicos, os quais tratam-se de procedimentos realizados para fornecer dados com as informações essenciais relacionadas à dinâmica do sistema a ser controlado (AGUIRRE, 2014).

O teste dinâmico realizado para obtenção dos dados tratados no IDENT, está ilustrado na Figura 17. A operação de turbinas eólicas (principalmente o controle aerodinâmico) de malha aberta não é recomendável (VEEN, 2013). Portanto, a identificação foi realizada com o sistema operando em malha fechada, com a inclusão de um controlador. Para não influenciar de maneira significativa na dinâmica do sistema e tornar possível a operação do mesmo, foi inserido um controlador proporcional ($k_p = 70000$) para realização do teste. Como ilustrado na Figura 17, foram utilizados sistemas de aquisição, operando em uma frequência de amostragem igual a 10 Hz, para armazenar os dados de entrada, $u(k)$ (comando de válvula), e saída do sistema, $y(k)$ (posição do atuador na pá da hélice). A referência do sistema corresponde à posição E^* , proporcional ao ângulo de passo desejado β^* .

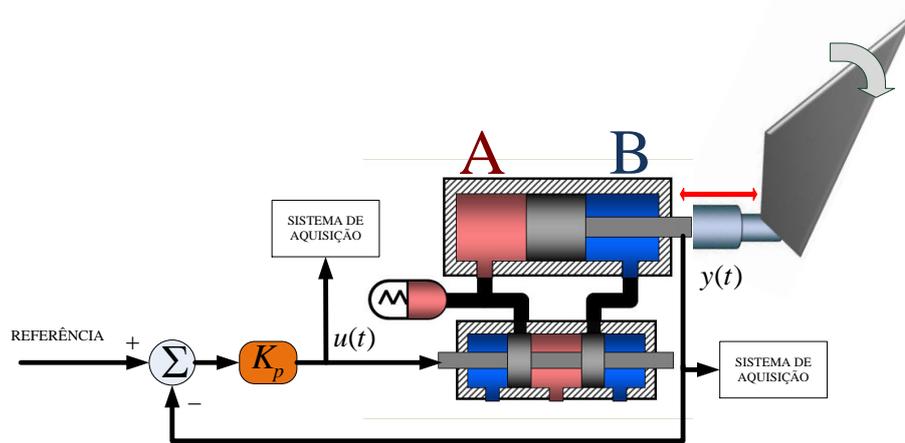


Figura 17: Diagrama representativo do teste realizado para identificação dos sistemas atuadores.

Como apresentado na seção A.1 do Apêndice A, a média anual da velocidade do vento é igual a $v(t) = 8,5\text{m/s}$. Esta velocidade corresponde ao ponto de operação nominal do SCEE em estudo. O perfil eólico sob o qual o SCEE foi submetido é o mesmo descrito na Subseção 2.1.1, sendo escolhida a componente estacionária $v_{est}(t) = 8,5\text{m/s}$, para garantir a realização do teste com o sistema operando em seu ponto de operação nominal.

Para estimular a dinâmica do sistema, foi necessário promover variações no sinal de referência β^* . Como visto no Capítulo 2, o ângulo de passo desejado, β^* , depende de duas variáveis: ângulo de inclinação, ϕ , e ângulo de ataque desejado, α^* . O ângulo ϕ , como expressa a Equação (1.15), depende da velocidade do vento, U_∞ . Esta é uma variável que não é possível controlar. Sendo assim, optou-se por promover variações no ângulo de ataque desejado α^* , o qual pode ser manipulado pelo regulador de velocidade a partir da mudança de referência da velocidade do rotor da turbina, Ω_r^* (ver Figura 9). As mudanças no ângulo de ataque influenciam diretamente a entrada responsável por estimular a dinâmica do sistema de atuação do RAP, a qual é o ângulo β^* .

Na Figura 18 é ilustrado a variação da velocidade do sistema durante a realização deste teste. Passado o intervalo de tempo necessário para o procedimento de partida e até que o sistema estivesse operando em seus valores nominais, foram aplicados degraus na referência de velocidade do rotor da turbina. No instante de tempo $t = 50\text{s}$, aplicou-se um degrau positivo na referência de velocidade igual a 2% do seu valor nominal, $\Omega_n = 14,3004\text{rpm}$. No instante de tempo $t = 70\text{s}$ retirou-se o degrau de 2%. Após o sistema retornar a seu valor de

velocidade nominal, foi aplicado um degrau negativo de 2% no instante de tempo $t = 90s$, e no instante $t = 110s$ retirou-se tal degrau.

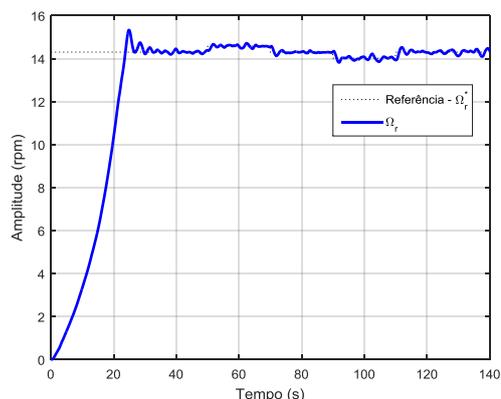


Figura 18: Teste dinâmico para coleta de dados para identificação - Malha externa.

É necessário ter em mente que as variações manipuladas pela malha externa, irão influenciar diretamente a dinâmica da malha interna, a qual é o alvo de interesse para identificação dos sistemas atuadores que regulam o ângulo de passo. Portanto, os dados de entrada e saída utilizados para tarefa de identificação são, como dito anteriormente, comando de válvula (com valores não normalizados)⁵ e a posição dos atuadores E^* (proporcional ao ângulo de passo desejado β^*). Na Figura 19, são mostrados os valores de entrada e saída coletados para identificação.

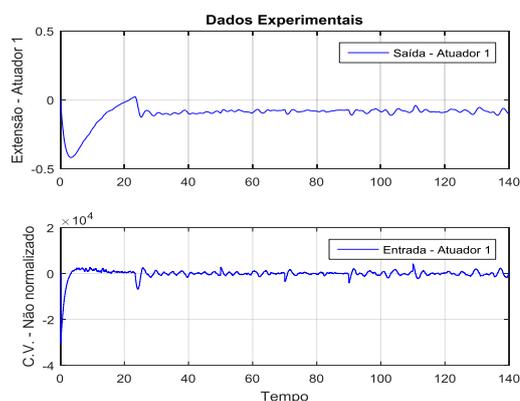


Figura 19: Teste dinâmico para coleta de dados para identificação - Malha interna.

Como a turbina eólica do SCEE possui 3 pás, e cada uma tem seu respectivo sistema de atuadores para regulação do ângulo de passo, foram identificados cada um dos sistemas de atuação. Denominados Atuador 1, Atuador 2 e Atuador 3. Na Figura 20, estão ilustrados os dados utilizados para estimação e validação do modelo correspondente ao

⁵ Destaca-se que o comando de válvula opera entre limites mínimo e máximo. No caso não normalizado se está usando o valor em Newtons (da força aplicada sobre o atuador), conforme é disponibilizado no simulador da MathWorks®.

Atuador 1. É recomendável que os dados de estimação e validação não sejam os mesmos (AGUIRRE, 2014; COELHO; COELHO, 2015; LJUNG, 2015). Portanto, do *datalog* ilustrado na Figura 18, o intervalo de tempo, entre $t = 85s$ e $t = 140s$, foi selecionado para os dados de estimação. O intervalo de tempo entre $t = 30s$ e $t = 80s$ foi escolhido para os dados de validação. Para realizar estes testes foi necessário implementar o perfil eólico descrito na subseção 2.1.1 do Capítulo 2 e no Apêndice A, juntamente com o ganho $k_p = 70000$ da Figura 17.

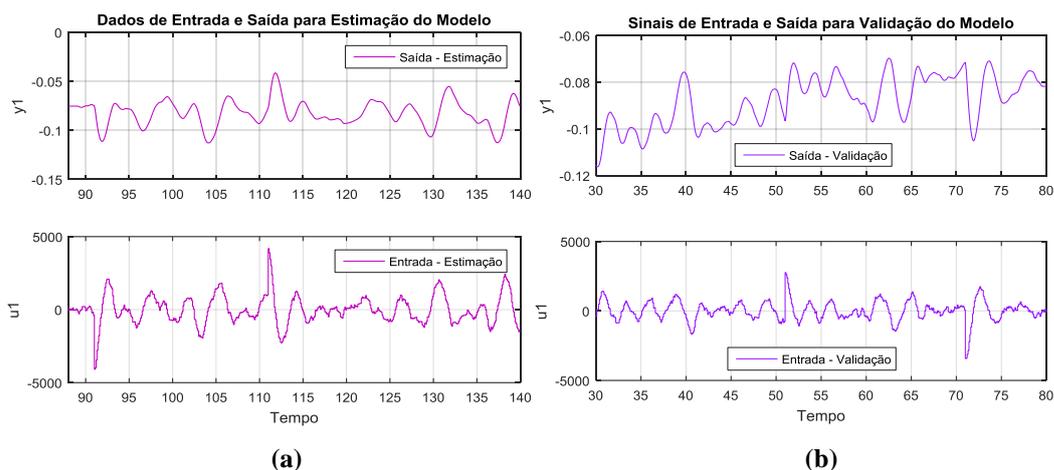


Figura 20: Dados coletados para (a) estimação e (b) validação.

Esse procedimento foi aplicado aos outros atuadores, i.e., Atuador 2 e Atuador 3. Na subseção seguinte, serão apresentados os dados estimados, bem como a validação dos modelos identificados.

4.1.2 Parâmetros Estimados e Validação do Modelo

Os parâmetros do modelo ARMAX foram estimados utilizando-se o aplicativo IDENT do MATLAB[®]. Na Tabela 1, encontram-se os modelos identificados de cada um dos atuadores. Destaca-se uma diferença significativa no modelo identificado do Atuador 3 em relação aos modelos dos Atuadores 1 e 2. Note que, o Atuador 3 possui um zero fora do círculo unitário, o que o caracteriza como um sistema de fase não-mínima.

Foram levantados os índices de ajuste do modelo identificado, comparando-se com os dados de validação. O índice Fit do IDENT calcula o valor do Erro Médio Quadrático Normalizado (LJUNG, 2015), o qual é uma métrica para indicar a porcentagem de quanto o modelo estimado está ajustado aos dados experimentais.

Tabela 1: Modelos ARMAX identificados.

Sistema	Modelo ARMAX	Índice de Ajuste
Atuador 1	$A(z^{-1}) = 1 - 0,8098z^{-1} - 0,1902z^{-2}$ $B(z^{-1}) = (0,1662z^{-1} + 0,0633z^{-2}) \times 10^{-5}$ $C(z^{-1}) = 1 + 0,5172z^{-1} + 0,1152z^{-2}$	Fit = 84,23%
Atuador 2	$A(z^{-1}) = 1 - 0,7108z^{-1} - 0,2892z^{-2}$ $B(z^{-1}) = (0,1637z^{-1} + 0,0851z^{-2}) \times 10^{-5}$ $C(z^{-1}) = 1 + 0,6722z^{-1} + 0,1286z^{-2}$	Fit = 80,83%
Atuador 3	$A(z^{-1}) = 1 - 0,1915z^{-1} - 0,8085z^{-2}$ $B(z^{-1}) = (0,1604z^{-1} - 0,1848z^{-2}) \times 10^{-5}$ $C(z^{-1}) = 1 + 0,9769z^{-1} + 0,1692z^{-2}$	Fit = 80,7%

Na Figura 21 é ilustrado o teste de validação dos modelos estimados do Atuador 1, Atuador 2 e Atuador 3.

Para validar os modelos identificados foram realizadas comparações com os dados de validação. Aplicou-se a mesma entrada e em seguida foram comparadas as saídas estimadas com a saída dos dados de validação. Os índices Fit de cada um dos modelos identificados foi superior a 80%, o que mostra que estão adequados para se realizar o projeto de controladores. Por outro lado, de um ponto de vista do controle estocástico, isto significa que pelo menos de 20% do problema é inacessível a partir de $u(k)$, pois o índice Fit avalia as saídas estimadas com base somente na parte determinística do modelo.

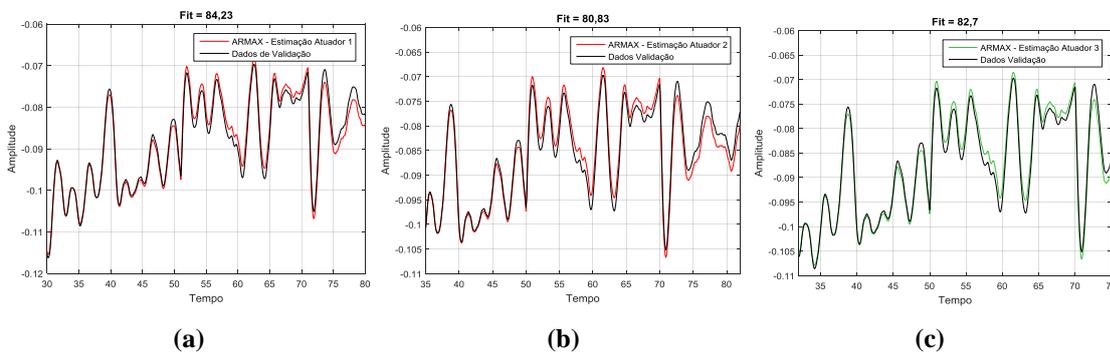


Figura 21: Validação do modelo ARMAX do (a) Atuador 1, (b) Atuador 2 e (c) Atuador 3.

4.2 Projeto dos Controladores

O sistema, sobre o qual foram aplicadas as técnicas de projeto de controladores descritas no Capítulo 3, foi o de regulação do ângulo de passo da turbina. Portanto, nesta seção, será dada maior ênfase ao projeto do RAP.

A seguir, é descrito o projeto do Regulador de Velocidade digital aplicado ao SCEE.

4.2.1 Projeto do RV

Nos SCEE com velocidade fixa, a frequência elétrica de operação do gerador deve ser igual à da rede elétrica. Este fato demonstra que o controle de velocidade desempenha um papel muito importante na operação do sistema, uma vez que é responsável por manter a velocidade do SCEE na mesma frequência da rede. No simulador em estudo o controle de velocidade do sistema é feito por um controlador PI Paralelo contínuo.

O projeto do Regulador de Velocidade, consistiu na discretização do controlador PI contínuo que já vem no simulador. O mapeamento entre o plano-s e plano-z foi feito pelo método *Backward* que considera a aproximação (FRANKLIN et al., 2010), isto é,

$$s := \frac{(1 - z^{-1})}{T_s}, \quad (4.6)$$

onde T_s é o período de amostragem. Na Tabela 2, são apresentados os ganhos do PI contínuo que já vem no simulador. Na mesma tabela estão os ganhos do PI digital após realizada a discretização *Backward*. O período de amostragem escolhido foi $T_s = 0.1s$.

Tabela 2: Parâmetros dos controladores PI contínuo e digital.

Controlador	Parâmetros
RV contínuo	$k_p = 20$ e $k_i = 5$
RV digital	$s_0 = 20,5$ e $s_1 = -20$

O RV digital foi aplicado ao simulador utilizando-se os filtros digitais do Simulink[®]. Sua estrutura é apresentada no Apêndice C.

4.2.2 Projeto do RAP

Foram projetados três Reguladores do Ângulo de Passo, um para cada sistema de atuação. Os projetos foram baseados nos modelos identificados, descritos na Tabela 1. Com base nas técnicas descritas no Capítulo 3, o projeto dos controladores foi realizado em duas etapas principais: **(i)** projeto do controlador RST e **(ii)** Augmentação Estocástica do controlador RST projetado, através da transferência de seu *loop-shaping* ao controlador GMV. O RAP de cada um dos sistemas identificados foi projetado passando pelas etapas **(i)** e **(ii)**, descritas a seguir.

A etapa de projeto do controlador RST consiste, principalmente, na solução da Equação de Diophantine. O objetivo principal é encontrar os parâmetros dos polinômios $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ e $T(z^{-1})$. A partir da determinação do polinômio característico de malha fechada desejado, $H_{mf}(z^{-1})$, e com os polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$ do sistema identificado é determinada a ordem dos polinômios $R(z^{-1})$ e $S(z^{-1})$ que favorecem a solução da Equação de Diophantine. O polinômio, $H_o(z^{-1})$, que descreve a parcela observadora de $H_{mf}(z^{-1})$ é igual ao polinômio $A(z^{-1})$.

Seguindo as especificações descritas no Apêndice A, Seção A4, foi determinado o polinômio, $H_c(z^{-1})$, responsável pela parcela controladora do polinômio de malha fechada desejado, $H_{mf}(z^{-1})$. O RAP da turbina deve manter o rastreamento de referência com uma defasagem do ângulo de passo, β , de no máximo 1°. Para garantir esta especificação, foi escolhido um polinômio $H_c(z^{-1})$ de 2ª ordem, cujo os polos de malha fechada desejados são característicos de um sistema de segunda ordem sobre-amortecido.

As especificações de desempenho foram garantidas com uma frequência natural, $\omega_n = 3\text{rad/s}$, e um coeficiente de amortecimento, $\zeta = 1,5$. Os parâmetros do polinômio $H_c(z^{-1})$ foram obtidos por

$$H_c(s) \xrightarrow[T_s=0.1s]{ZOH} H_c(z^{-1}), \quad (4.7)$$

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \xrightarrow[T_s=0.1s]{ZOH} 1 + h_{c1}z^{-1} + h_{c2}z^{-2}. \quad (4.8)$$

Com a escolha de $H_o(z^{-1})$ e $H_c(z^{-1})$ é determinada a estrutura da equação de Diophantine a ser solucionada, tal que

$$\overbrace{H_{mf}(z^{-1})}^{4^{\text{a}} \text{ ordem}} = \overbrace{R(z^{-1})}^{1^{\text{a}} \text{ ordem}} \overbrace{\Delta A(z^{-1})}^{3^{\text{a}} \text{ ordem}} - \overbrace{S(z^{-1})}^{2^{\text{a}} \text{ ordem}} \overbrace{B(z^{-1})}^{\text{Ordem 0}} z^{-1}. \quad (4.9)$$

Note que, na Equação (4.9), já é feito o projeto RST do tipo incremental. É feita uma aproximação do polinômio $B(z^{-1})$, considerando $B(1) = (b_0 + b_1)$, isto é, uma aproximação estática quando $z \rightarrow 1$, para simplificar os cálculos. Isto é possível já que as características de fase não-mínima são relevantes somente no Atuador 3 e, ainda assim, são praticamente desprezíveis. A solução da Equação (4.9) é dada por

$$r_0 = 1, \quad (4.10)$$

$$r_1 = \frac{h_4}{\bar{a}_3}, \quad (4.11)$$

$$s_0 = \frac{h_1 - r_0 \bar{a}_1 - r_1}{B(1)}, \quad (4.12)$$

$$s_1 = \frac{h_2 - r_0 \bar{a}_2 - r_1 \bar{a}_1}{B(1)}, \quad (4.13)$$

$$s_2 = \frac{h_3 - r_0 \bar{a}_3 - r_1 \bar{a}_2}{B(1)}. \quad (4.14)$$

Os parâmetros do polinômio $T(z^{-1})$ são encontrados por meio de

$$T(z^{-1}) = t_{off} H_o(z^{-1}), \quad (4.15)$$

onde t_{off} é uma tentativa de pré compensar o *offset* entre a referência e a saída do sistema, dado por

$$t_{off} = \frac{H_c(1)}{B(1)}. \quad (4.16)$$

A etapa (i) aplicada a cada um dos sistemas identificados, resultou nos filtros RST de cada um dos RAP, descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros dos controladores RST projetados.

Controlador	Parâmetros
RAP 1	$R(z^{-1}) = 1 - 0,4066z^{-1}$ $S(z^{-1}) = (2,5668 - 2,0785 z^{-1} - 0,4883z^{-2}) \times 10^4$ $T(z^{-1}) = S(z^{-1})$

	$R(z^{-1}) = 1 - 0,4065z^{-1}$
RAP 2	$S(z^{-1}) = (2,3673 - 1,6828 z^{-1} - 0,6845 z^{-2}) \times 10^4$
	$T(z^{-1}) = S(z^{-1})$
	$R(z^{-1}) = 1 - 0,4065z^{-1}$
RAP 3	$S(z^{-1}) = (1,7066 - 0,3269 z^{-1} - 1,3797 z^{-2}) \times 10^4$
	$T(z^{-1}) = S(z^{-1})$

Conforme Pinheiro et al. (2016) e Trentini et al. (2016), o controlador RST é determinístico, devido o fato do projeto ser baseado nos polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$, correspondentes à parcela determinística do processo. Para evitar que os RAP projetados apresentassem perda de desempenho e garantissem um menor consumo de energia por parte do sistema de controle, na presença de perturbações estocásticas no sistema, foi realizada a Augmentação Estocástica do controlador RST.

A Augmentação Estocástica dos RAP determinísticos, foi realizada por meio do projeto de controladores GMV baseados no *shape* herdado do controlador RST, considerando as Equações (3.48), (3.49), e (3.50). O problema consiste em se obter a solução da Equação de Diophantine presente no projeto do controlador GMV incremental,

$$S(z^{-1})C(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}), \quad (4.17)$$

na qual o polinômio $P(z^{-1})$ é substituído por $S(z^{-1})$ através da Equação (3.48).

Sendo $S(z^{-1})$, $C(z^{-1})$ e $\Delta A(z^{-1})$, polinômios conhecidos, a Equação (4.17) é solucionada determinando a ordem dos filtros $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$ que satisfazem sua igualdade, o que resulta em

$$\overbrace{S(z^{-1})C(z^{-1})}^{4^{\text{a}} \text{ ordem}} = \overbrace{\Delta A(z^{-1})}^{3^{\text{a}} \text{ ordem}} \overbrace{E(z^{-1})}^{\text{Ordem } 0} + z^{-1} \overbrace{F(z^{-1})}^{3^{\text{a}} \text{ ordem}}. \quad (4.18)$$

Os parâmetros dos filtros $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$ são a solução da Diophantine do controlador GMV incremental, dados por

$$e_0 = s_0, \quad (4.19)$$

$$f_0 = s_1 + s_0 c_1 - \bar{a}_1 e_0, \quad (4.20)$$

$$f_1 = s_1 c_1 + s_0 c_2 + s_2 - \bar{a}_2 e_0, \quad (4.21)$$

$$f_2 = s_1 c_2 + s_2 c_1 - \bar{a}_3 e_0, \quad (4.22)$$

$$f_3 = s_2 c_2. \quad (4.23)$$

Realizado o procedimento da etapa (ii), obtém-se os parâmetros dos filtros $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$. Na Tabela 4 são descritos tais parâmetros, pertencentes aos RAP obtidos através da Augmentação Estocástica.

Os controladores do ângulo de passo de cada uma das pás foram implementados no simulador do SCEE, utilizando os filtros digitais do ambiente de simulação Simulink[®]. Os diagramas dos RAP são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4: Parâmetros dos filtros $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$.

Controlador	Parâmetros
RAP 1	$e_0 = 2,5668;$ $f_0 = 3,8943; f_1 = -2,8578;$ $f_2 = -9,8024; f_3 = -5,6240.$
RAP 2	$e_0 = 2,3673;$ $f_0 = 3,9587; f_1 = -2,5096;$ $f_2 = -1,3610; f_3 = -8,8008.$
RAP 3	$e_0 = 1,7065;$ $f_0 = 3,3737; f_1 = -3,5742;$ $f_2 = -2,7828; f_3 = -2,3346.$

Considere a ilustração da Figura 22, onde os polinômios $\bar{R}(z^{-1})$, $\bar{S}(z^{-1})$ e $\bar{T}(z^{-1})$ representam os polinômios do controlador GMV.

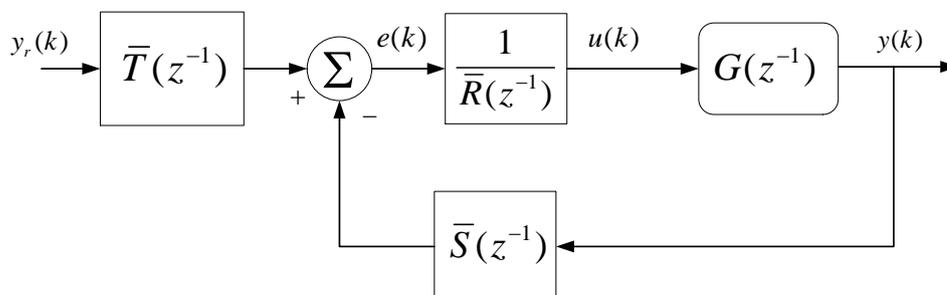


Figura 22: Representação da analogia existente entre as estruturas canônicas dos controladores RST e GMV.

A partir da análise da lei de controle incremental do GMV, dada por

$$\overbrace{[B(z^{-1})E(z^{-1}) + Q(z^{-1})C(z^{-1})]}^{\bar{R}(z^{-1})} \Delta u(k) = \overbrace{C(z^{-1})T_{gmv}(z^{-1})}^{\bar{T}(z^{-1})} y_r(k+d) - \overbrace{F(z^{-1})}^{\bar{S}(z^{-1})} y(k), \quad (4.24)$$

percebe-se que, se for feita uma analogia da Equação (4.24) com a Equação (3.1), irá resultar em

$$\bar{R}(z^{-1}) := B(z^{-1})E(z^{-1}) + Q(z^{-1})C(z^{-1}), \quad (4.25)$$

$$\bar{S}(z^{-1}) := F(z^{-1}), \quad (4.26)$$

$$\bar{T}(z^{-1}) := C(z^{-1})T_{gmv}(z^{-1}). \quad (4.27)$$

A diferença dos polinômios $\bar{R}(z^{-1})$, $\bar{S}(z^{-1})$ e $\bar{T}(z^{-1})$ em relação aos da estrutura RST convencional (determinística), consiste nos polinômios $P(z^{-1})$ e $Q(z^{-1})$, os quais são compostos pelos parâmetros dos filtros $E(z^{-1})$ e $F(z^{-1})$. Estes resultam de um projeto em que se leva em consideração a contribuição do polinômio $C(z^{-1})$, que descreve como o ruído estocástico afeta a saída do sistema. Note que a partir deste ponto, há incremento da ordem do controlador. Para melhor entendimento do algoritmo de projeto, é apresentado no Apêndice D o código com o projeto e teste do RAP do Atuador 1.

Outra forma de notar a diferença entre o controlador GMV, obtido através da Augmentação Estocástica, e o controlador RST é a partir da análise da função de sensibilidade, como é destacado em Pinheiro et al. (2016). Analisando-se as Equações (4.28) e (4.29), as quais representam as saídas do sistema de malha fechada sob ação dos controladores RST e GMV, respectivamente, percebe-se que a função de sensibilidade, a qual é afetada pela perturbação estocástica representada por $\xi(k)$, é modificada quando o controlador GMV atua na malha de controle.

$$y_{RST}(k) = \frac{B(z^{-1})T(z^{-1})}{B(z^{-1})S(z^{-1}) + A(z^{-1})\Delta R(z^{-1})} y_r(k+d) + \frac{C(z^{-1})R(z^{-1})}{B(z^{-1})S(z^{-1}) + A(z^{-1})\Delta R(z^{-1})} \xi(k) \quad (4.28)$$

$$y_{GMV}(k) = \frac{B(z^{-1})T(z^{-1})}{B(z^{-1})P(z^{-1}) + A(z^{-1})\Delta Q(z^{-1})} y_r(k+d) + \frac{B(z^{-1})E(z^{-1})C(z^{-1})Q(z^{-1})}{B(z^{-1})S(z^{-1}) + A(z^{-1})\Delta R(z^{-1})} \xi(k) \quad (4.29)$$

Na Figura 23 é ilustrado o diagrama de Bode das funções de sensibilidade e sensibilidade complementar. Em termos da função de sensibilidade complementar, a qual é

afetada pelo sinal de referência $y_r(k)$, não há diferença. Contudo, há uma ligeira mudança na função de sensibilidade.

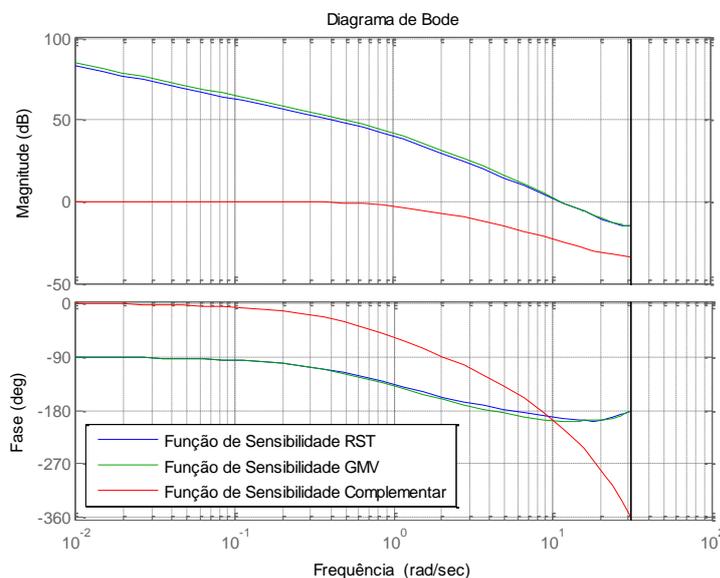


Figura 23: Diagrama de Bode - Atuador 1.

Na Tabela 5 são apresentados os valores das margens de ganho e fase do sistema com a inclusão dos controladores RST e GMV na malha de controle do Atuador 1. Note que se trata do mesmo controlador, uma vez que o GMV projetado herdou o *shape* da malha RST.

Tabela 5: Margens de ganho e fase do controlador projetado - Atuador 1.

Controlador	MG	MF
RST	11,4 dB	Infinita
GMV	11, 4 dB	Infinita

Para finalizar esta subseção, é necessário fazer uma importante observação. A partir da análise dos polos dos modelos identificados chega-se à conclusão de que tratam-se de sistemas do tipo 1. Para constatar tal fato, foi feito o mapeamento dos polos sobre o modelo identificado do Atuador 1. Na Figura 24 é mostrado que, de fato, o sistema possui um polo igual a 1, o que caracteriza o sistema como um integrador. Este comportamento dinâmico já era esperado, porque sabe-se, com base na literatura encontrada em livros e artigos deste assunto, que os sistemas servo atuadores, de posição, são integradores (PARDALOS et al., 2013; LUO et al., 2014).

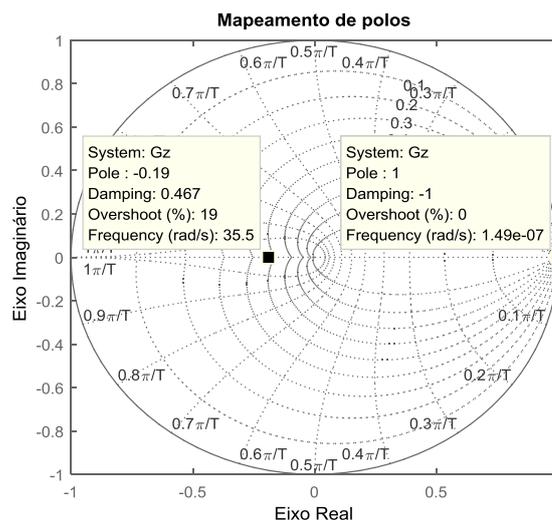


Figura 24: Mapeamento de polos do Atuador 1.

Sistemas tipo 1, dispensam o projeto de controladores com ação incremental. Dentre os motivos que justificam a não utilização da ação incremental, podem ser citados o surgimento de ciclo limite em regime permanente e a possibilidade de surgir uma dinâmica semelhante a de um oscilador harmônico, ambos causados pelo integrador duplo.

Com o objetivo de evitar estes problemas, foi realizado o projeto de ambos, controlador RST e GMV, pelo método posicional. No entanto, quando aplicados ao SCEE, constatou-se que os controladores posicionais não foram capazes de regular o ângulo de passo das pás com *offset* nulo.

Com os controladores projetados pelo método incremental, foi possível realizar de maneira satisfatória o controle do SCEE, sem o surgimento do ciclo limite. Uma das sugestões para explicar o porquê dos controladores incrementais funcionarem no sistema sevo atuador do controle do ângulo de passo, consiste no aparecimento das não linearidades presentes no processo, fazendo com que o sistema não-linear não seja, de fato, do tipo 1.

4.3 Conclusão do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia de identificação do sistema, bem com o projeto do controladores RST e GMV. Espera-se que o leitor tenha se familiarizado com o conceito da Augmentação Estocástica, a qual é a principal contribuição apresentada neste capítulo. Destaca-se a análise dos sinais de saída do sistema de malha fechada. Foi possível notar que um dos benefícios da Augmentação Estocástica consiste na modificação da

função de sensibilidade do sistema. Com esta mudança, a malha de controle poderá fazer um melhor tratamento das perturbações estocásticas presentes no sistema.

No Capítulo 5, serão apresentados os resultados dos testes realizados para comparar o desempenho dos controladores, cujo projeto e parâmetros foram descritos no presente capítulo.

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas para comparar o desempenho dos controladores. Todos os Reguladores do Ângulo de Passo foram testados atuando sobre o modelo não linear do SCEE conectado à rede elétrica.

Para destacar as características não lineares do simulador, é ilustrado nas Figuras 25 e 26, respectivamente, a velocidade do vento e o ângulo de passo de cada uma das pás. Perceba que a partir do instante $t = 50s$, em que o sistema começa a retornar para o ponto de operação inicial, isto é, $v_{est}(t) = 8\text{ m/s}$, o comportamento da resposta do ângulo de passo difere dos primeiros 50s, não retornando para o valor de ângulo de passo do início da simulação.

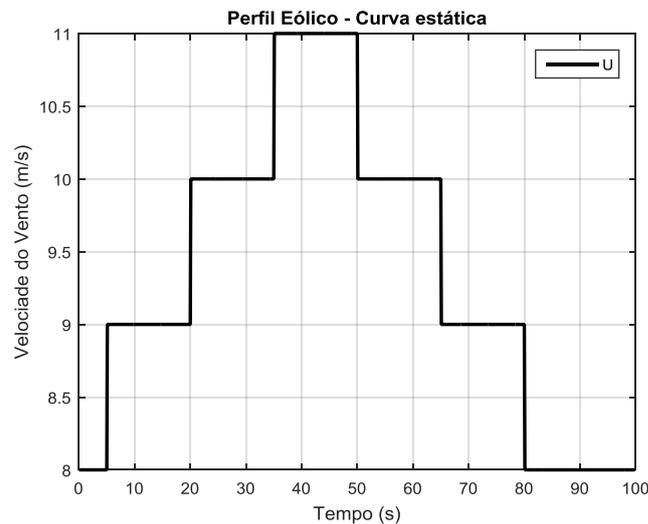


Figura 25: Velocidade do vento.

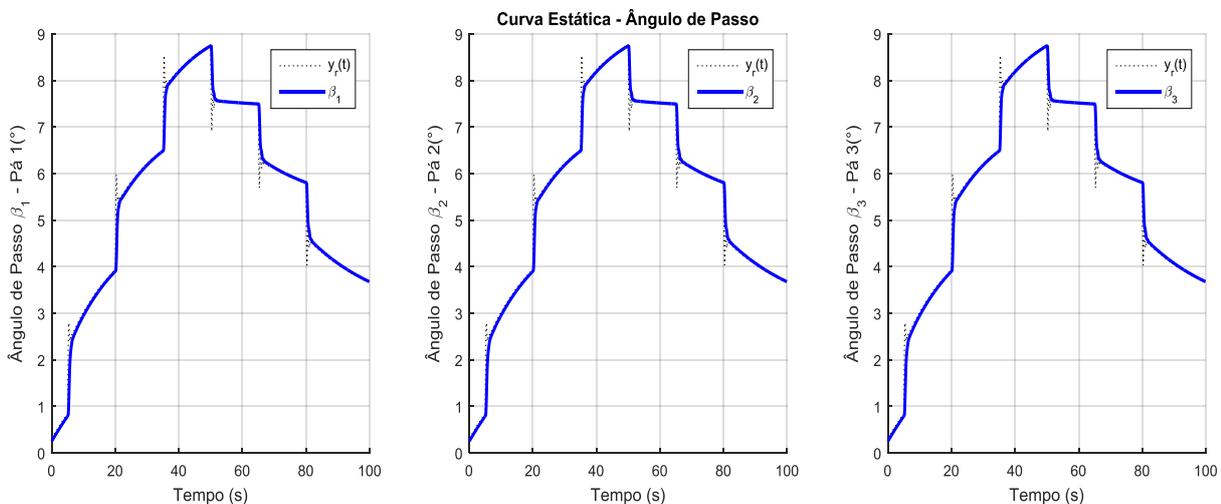


Figura 26: Curva estática - Ângulo de passo.

Os controladores foram testados de 4 maneiras: **(i)** teste de partida do SCEE; **(ii)** teste de variação abrupta (degrau na componente estacionária) na velocidade do vento; **(iii)** teste de rajada de vento; **(iv)** teste para verificar o acoplamento físico existente entre as pás da turbina.

O desempenho dos RAP foram avaliados a partir de métricas recomendadas na literatura, utilizadas tanto em trabalhos de teoria de controle quanto em trabalhos que envolvem a geração eólica. Uma das métricas empregadas corresponde à quantidade, por assim dizer, de energia contida numa sequência discreta de energia. Dado por (SILVEIRA et al., 2016),

$$\mathbb{E}_{\mathbf{w}} = (\mathbf{w}^T \mathbf{w}) T_s, \quad (5.1)$$

onde \mathbf{w} é um vetor genérico que pode representar o sinal de controle, sinal de erro de rastreamento e a saída generalizada, os quais, neste trabalho, irão indicar, respectivamente, os índices ISU, ISE e IS Φ .

A outra métrica utilizada para analisar o desempenho dos controladores, foi o ciclo de trabalho dos atuadores (ADC - do inglês *Actuator Duty Cycle*) (VALI et al., 2016). O qual determina o número total de variações que ocorrem no ângulo de passo, durante o intervalo de tempo da simulação (BOTASSO et al., 2013). Neste trabalho foi realizado o cálculo do ADC em sua versão discreta, dado por

$$ADC = \frac{1}{t_{sim}} \sum \left(\frac{\dot{\beta}}{\dot{\beta}_{max}} \right) T_s, \quad (5.2)$$

onde $\dot{\beta}$, $\dot{\beta}_{max}$ e t_{sim} , são, respectivamente, a taxa de variação do ângulo de passo, a máxima taxa de variação (dada de acordo com as especificações da turbina) e o tempo de simulação.

Levando em consideração que foram projetados três RAP, controlando os ângulos de suas respectivas pás, o cálculo do índice de desempenho foi realizado, computando-se a média dos índices de cada um dos sistemas de atuação, i.e., Atuador 1, Atuador 2 e Atuador 3.

Nas seções seguintes será detalhado cada um dos testes realizados bem como analisados os desempenhos de cada um dos RAP projetados.

5.1 Partida do SCEE

No teste de partida do SCEE, além dos controladores RST e GMV aplicados como RAP, foi testado o controlador de ângulo de passo que já vem no simulador. O controlador *default* do SCEE é um PID Paralelo contínuo, o qual foi discretizado por uma

aproximação *Backward*. A comparação entre, o controlador que já vem no simulador, e os controladores projetados nesta dissertação, foi realizada com o objetivo de verificar se houve melhoria em relação ao que já vem sendo implementado. Além de acrescentar uma contribuição ao simulador, por meio da implementação de controladores digitais, pois até onde se investigou, não foram encontrados trabalhos que aplicassem controle digital ao simulador do SCEE da MathWorks®.

O teste de partida foi realizado com o perfil eólico ilustrado na Figura 27. A componente estacionária da velocidade do vento escolhida para este teste foi $v_{est}(t) = 8,5 \text{ m/s}$. Com a velocidade do vento ilustrada na Figura 27, o SCEE opera em torno de seus valores nominais.

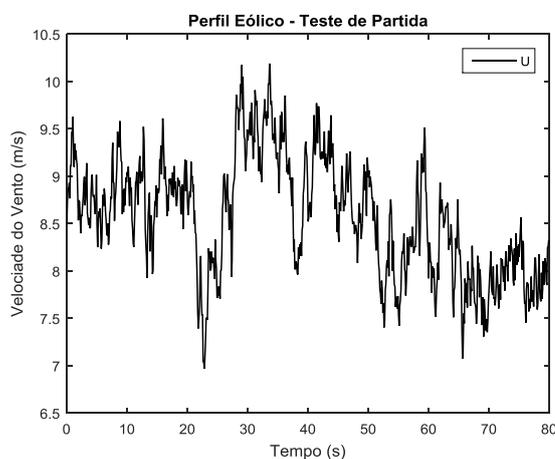


Figura 27: Velocidade do vento - Teste de partida.

Na Figura 28, é mostrado o comportamento da velocidade do rotor da turbina, durante a partida do sistema. Inicialmente, o Regulador de Velocidade fornece o valor máximo do ângulo de passo, $\alpha^* = 10,26$ graus, até que a velocidade do sistema alcance valores próximos de sua velocidade nominal, $\Omega_n = 14,3004 \text{ rpm}$. No instante de tempo $t = 18,5 \text{ s}$, o sistema alcança 80% da velocidade nominal. A partir deste instante, o RV modifica o ângulo de ataque desejado, α^* , atuando para manter a velocidade nominal do sistema.

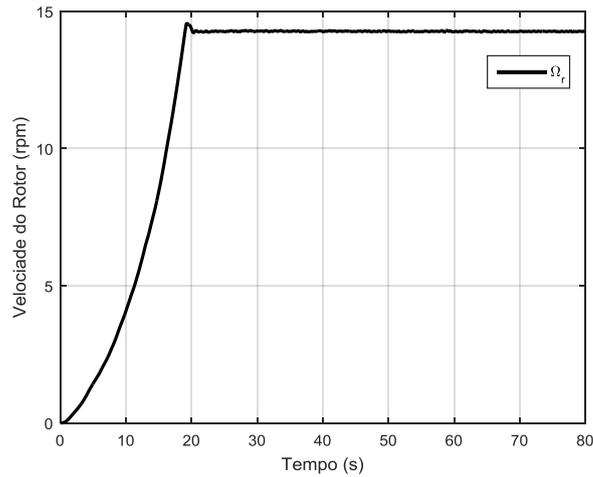


Figura 28: Velocidade do rotor - Teste de partida.

Percebe-se, pela análise da Figura 28, que, passado o transitório, o RV mantém o sistema operando em sua velocidade nominal, $\Omega_n = 14,3004\text{rpm}$, ao longo de toda a simulação.

Na Figura 29 são ilustrados os ângulos de passo regulados pelos controladores PID, RST e GMV. Em cada uma das pás, o ângulo de passo, inicialmente, é excursionado até as proximidades de seu limite máximo, para garantir o aumento da força de sustentação, a qual irá produzir o torque necessário para que o rotor comece a girar. Posteriormente, no instante $t = 20\text{s}$, o ângulo de passo é regulado para que o sistema opere em sua velocidade nominal. Percebe-se que, em relação às variâncias dos ângulos de passo, em cada uma das pás, os controladores obtêm valores aproximados.

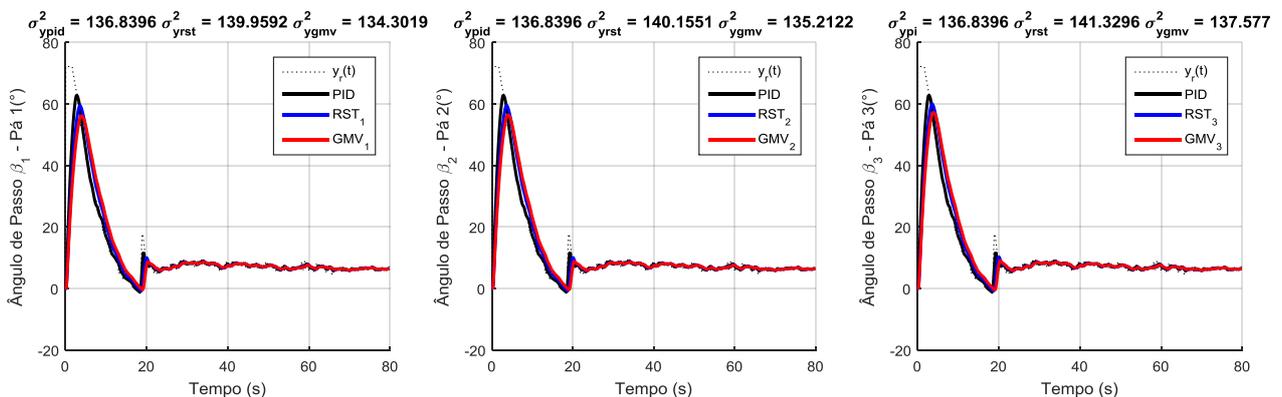


Figura 29: Ângulo de passo das pás da turbina - Teste de partida.

O comportamento dinâmico do ângulo de passo das turbinas reflete a ação dos controladores sobre o sistema de atuação hidráulico. O ângulo de passo é proporcional à

posição dos atuadores (ver Tabela B1, no Apêndice B), a qual é determinada pelo comando de válvula. Na Figura 30 é ilustrada a variação da posição do atuador durante o teste de partida. Nota-se que o rastreamento de referência ocorre de maneira satisfatória com a ação dos três controladores.

O controlador PID obteve os menores valores de variância da posição dos atuadores. Contudo, o índice ISU é penalizado. Isto ocorre devido o controlador PID empregar sinais de controle com maiores amplitudes, desde o período transitório da partida, até que o sistema alcançasse seus valores nominais.

Por outro lado, os controladores RST e GMV empregam sinais de comando com amplitudes menores e conseguem alcançar valores, em termos de variância na saída, i.e., da posição dos atuadores, aproximadamente iguais ao do controlador PID.

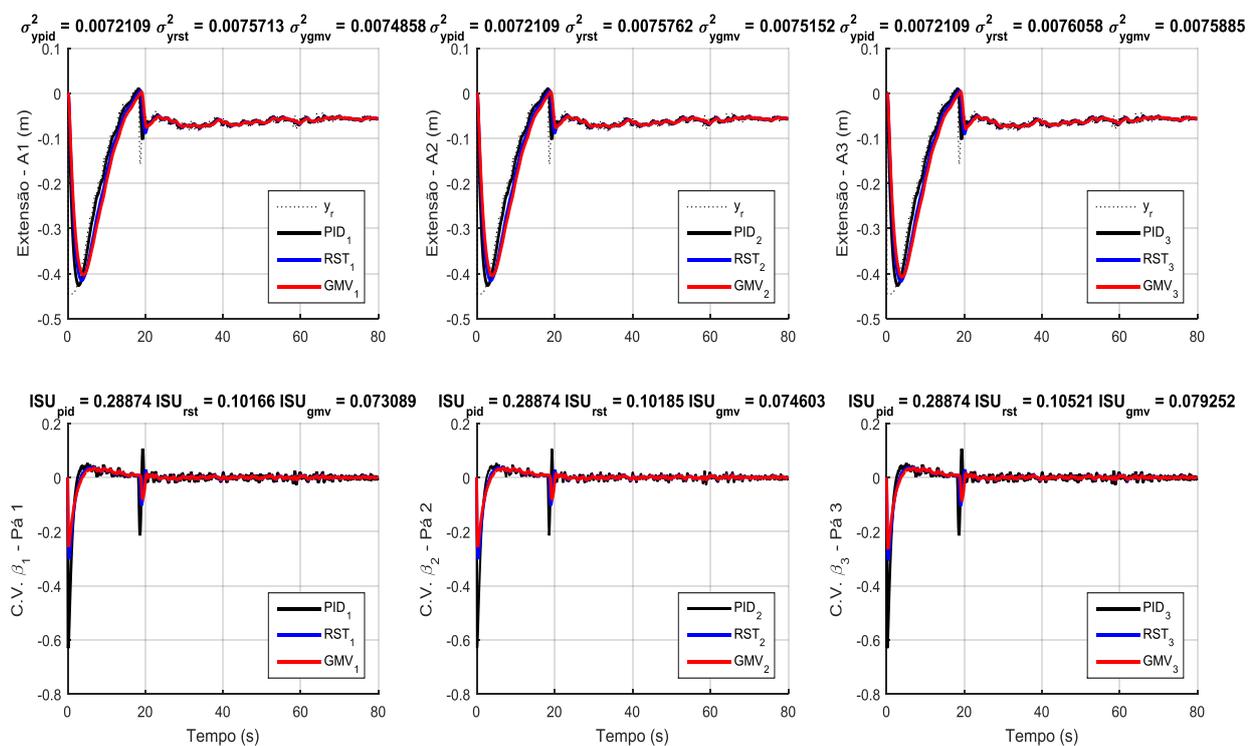


Figura 30: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Teste de partida.

A média dos índices ISU, $\sigma_{\beta}^{2,6}$ e ADC de cada um dos controladores é mostrada na Tabela 6. Percebe-se que o controlador GMV atingiu os menores valores em todos os índices, no teste de partida. Apesar de o controlador RST ter o maior valor de variância do

⁶ Variância do ângulo de passo.

ângulo de passo, os valores dos índices ISU e *ADC* são menores em relação ao controlador PID.

Tabela 6: Índices de desempenho – Teste de Partida.

Controlador	ISU	σ_{β}^2	<i>ADC</i>
PID	0,2887	136,8386	65,66 %
RST	0,1029	140,4813	62,76 %
GMV	0,0749	135,6970	62,03 %

Como o objetivo desta pesquisa foi sintetizar controladores, aplicados como RAP, para reduzir o consumo de energia dos sistemas de atuação, constatou-se que os controladores RST e GMV mantiveram, em relação ao controlador PID, índices mais satisfatórios, considerando o compromisso entre desempenho e consumo de energia.

Devido o controlador PID, fornecido no simulador MathWorks[®], manter o mesmo padrão de desempenho apresentado na partida do SCEE, nos testes de variação abrupta da velocidade do vento e rajada de vento, os resultados dos testes apresentados a seguir, foram analisados comparando-se o desempenho dos controladores RST e GMV, somente.

5.2 Variação abrupta da velocidade do vento

O segundo teste, foi realizado com o objetivo de analisar como os controladores RST e GMV regulariam o ângulo de passo durante uma variação abrupta na velocidade do vento, comuns de acontecer durante a operação de um SCEE. Este teste é importante de ser analisado devido o SCEE ser de Velocidade Fixa pois, caso o ângulo de passo não seja regulado de maneira adequada, o gerador pode começar a operar em uma frequência diferente da rede, o que irá provocar a perda de sincronismo e consequente desconexão com a rede.

A velocidade do vento empregada neste teste é ilustrada na Figura 31. Com o sistema operando com a componente de velocidade estacionária, $v_{est}(t) = 8,5 \text{ m/s}$, foi aplicado no instante de tempo, $t = 40\text{s}$, um degrau positivo de amplitude 2, na componente estacionária. No instante $t = 80\text{s}$, o degrau foi retirado, fazendo com que a velocidade do vento retornasse para o valor médio igual a $8,5 \text{ m/s}$. Entre os instantes de tempo $t = 40\text{s}$ e $t = 80\text{s}$, o sistema operou com a componente estacionária de velocidade do vento, $v_{est}(t) = 11,5 \text{ m/s}$.

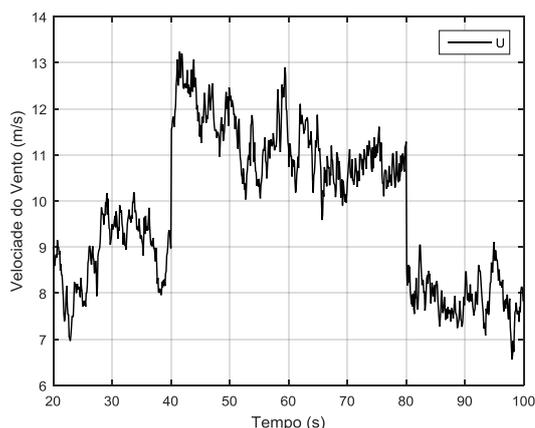


Figura 31: Velocidade do vento - Variação abrupta.

Na Figura 32, é ilustrado o efeito provocado pela variação da velocidade do vento sobre a velocidade do rotor da turbina. No mesmo instante $t = 40s$, em que foi modificada a velocidade do vento, ocorre uma variação na velocidade do rotor, chegando este a uma velocidade acima de 14,4 rpm. Apesar de ocorrer a mudança da velocidade do vento, o rotor continua operando em torno de sua velocidade nominal. No instante $t = 80s$, quando a velocidade do vento retorna para 8,5 m/s, o rotor chega a operar abaixo de 14,2 rpm, contudo, logo em seguida, o sistema retoma a operação em torno da velocidade nominal. Durante toda a simulação o sistema manteve-se dentro dos limites máximo e mínimo, os quais são $\pm 5\%$ da velocidade nominal.

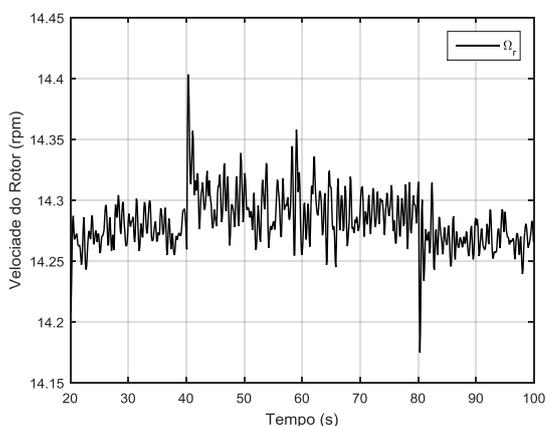


Figura 32: Velocidade do rotor da turbina - Variação abrupta da velocidade do vento.

Vale ressaltar que a regulação da velocidade do rotor, por meio do RV, é realizada com o RV e o RAP operando de maneira conjunta. Ou seja, para que o sistema mantenha a velocidade rotórica da turbina com um valor médio igual a $\Omega_n = 14,3004\text{rpm}$, é necessário que ocorram variações no ângulo de passo das pás da turbina.

As variações que ocorrem no ângulo de passo de cada uma das pás da turbina estão ilustradas na Figura 33. Percebe-se que, de fato, o ângulo de passo foi modificado, para que o sistema mantivesse a velocidade nominal do rotor da turbina. É possível notar que, a variância dos ângulos de passo de cada uma das turbinas é menor quando o sistema está sendo regulado pelo GMV.

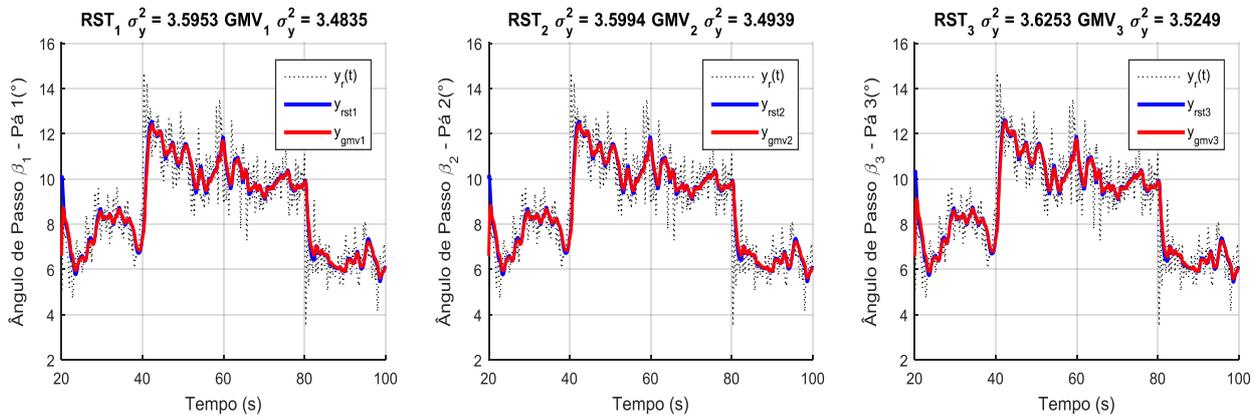


Figura 33: Ângulo de passo das pás da turbina - Variação abrupta da velocidade do vento.

Na Figura 34, estão ilustradas as variações que ocorreram na posição dos atuadores bem como os sinais de controle, i.e., os comandos das válvulas em cada um dos sistemas hidráulicos de atuação.

Ao fazer uma análise dos gráficos na Figura 34, é possível perceber que ambos os controladores, RST e GMV aplicados como RAP, são capazes de realizar o rastreamento de referência de maneira satisfatória. Há uma ligeira redução da atividade nos sistemas de atuação, quando o sistema é controlado pelo GMV. Tal fato é perceptível de maneira visual, principalmente, se observados os comandos das válvulas dos atuadores.

Se for comparado o desempenho do controlador RST com o do GMV, é possível notar que os valores das variâncias dos sinais de posição dos atuadores e o índice ISU dos sinais de controle (*C.V.*), obtidos com o controlador GMV, sinalizam a melhoria na regulação juntamente com a redução do consumo de energia do sistema de controle. Ou seja, o desempenho do controlador GMV foi melhor.

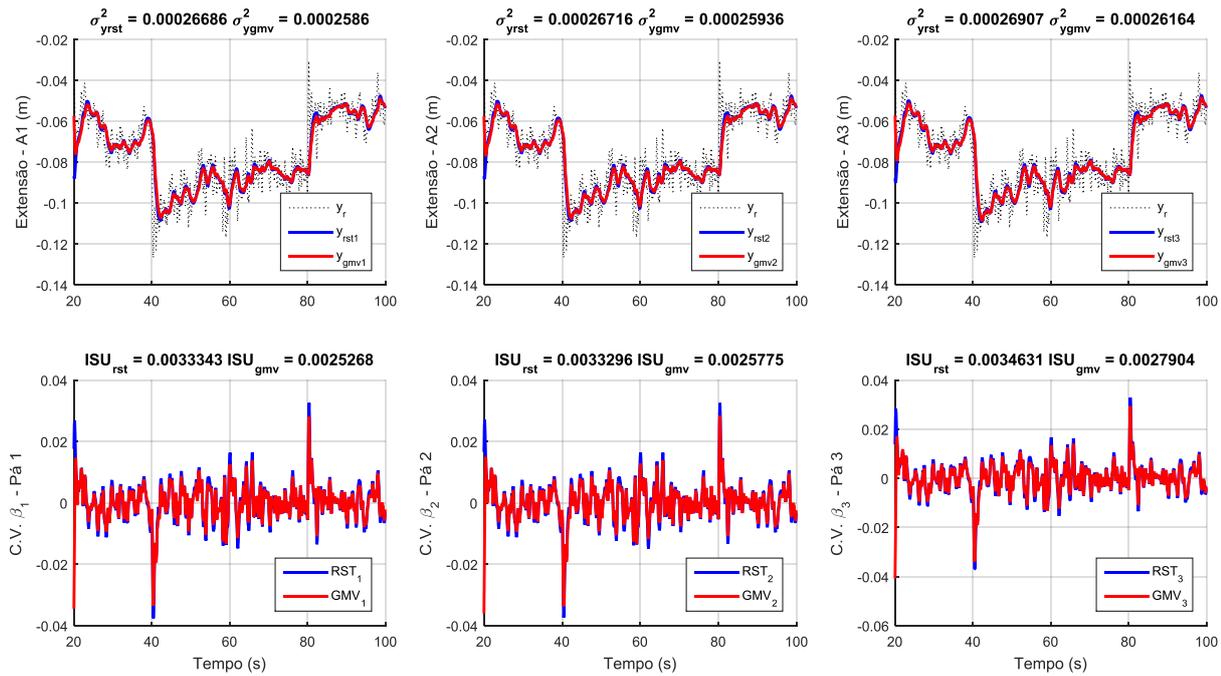


Figura 34: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Variação abrupta da velocidade do vento.

Para que se tivesse uma melhor avaliação do desempenho dos controladores. Foram computados os índices de desempenho, conforme as métricas descritas no início deste capítulo. Os valores dos índices são descritos na Tabela 7.

Percebe-se que, como dito anteriormente, o controlador GMV obteve um melhor desempenho. Contudo há algumas observações a serem feitas. Note que os índices de desempenho não têm uma diferença muito elevada e, no caso do ISE, o GMV chega a ter um desempenho menor do que o RST.

Era esperado que a discrepância entre os índices não fosse tão grande, pois, é válido lembrar que, o controlador GMV projetado, foi sintetizado por meio da Augmentação Estocástica. Ou seja, é o mesmo controlador. A AE se propõe a fazer apenas a augmentação estocástica do controlador determinístico, todavia, em essência, se obtém o mesmo controlador em termos da sensibilidade complementar.

Tabela 7: Índices de desempenho - Teste de Variação Abrupta.

Controlador	ISU	ISE	IS Φ	σ_{ϕ}^2	σ_{β}^2	ADC
RST	0,003376	1,62	1,9079	2,3805	3,6067	33,09 %
GMV	0,002631	4,9	1,496	1,8698	3,5008	27,7 %

Ainda assim, houve uma melhor adequação aos objetivos desta investigação, por parte do controlador GMV. Isto é constatado levando em consideração que a diferença entre o ISE do RST e GMV não é tão grande. Se forem comparados os índices ISU e $IS\Phi$, os quais quantificam quanto de energia é utilizada pelos controladores, conclui-se que o GMV consome menor quantidade de energia para mover o sistema. O ADC também comprova que a regulação feita pelo GMV é realizada de maneira mais econômica.

5.3 Rajada de Vento

O teste de rajada de vento foi realizado para verificar o desempenho dos controladores diante de outro evento comum de ocorrer em SCEE. As rajadas de vento, em geral, são capazes de levar o sistema de geração a seu limite de operação e exigem maior atividade do sistema de controle do ângulo de passo. Dependendo da rajada de vento a qual o SCEE é submetido, o sistema de proteção, supervisão e controle pode até interromper a operação da turbina.

Na Figura 35, é ilustrado o perfil eólico ao qual o sistema foi submetido. A partir do instante $t = 30s$, a velocidade do vento começa a aumentar até as proximidades da velocidade $U_{co} = 20$ m/s, a qual, quando atingida, faz-se necessário interromper a operação do sistema de geração por meio da estolagem das pás da turbina. Entre os instantes $t = 80s$ e $t = 100s$ a velocidade do vento fica em torno de 18 m/s, o que naturalmente provoca o aumento do nível de turbulência no perfil eólico.

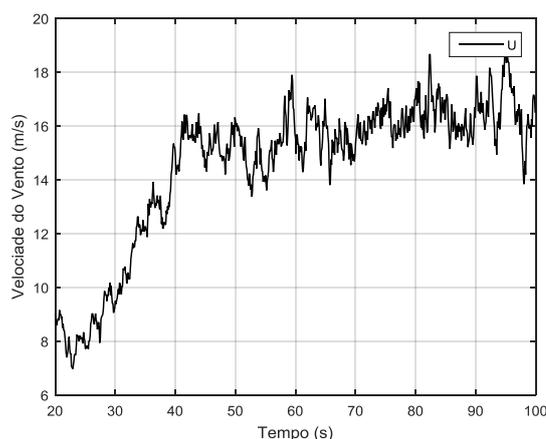


Figura 35: Velocidade do vento - Rajada de vento .

A partir da análise da Figura 36, percebe-se que a velocidade do rotor operou cerca de 0,1% acima de seu valor nominal, durante a rajada. Nos 20 segundos finais da

simulação, ocorreram maiores excursões na velocidade da turbina. Contudo o sistema ainda continuou com sua velocidade operando dentro do limite de $\pm 5\%$, exigido pelas normas do setor de geração.

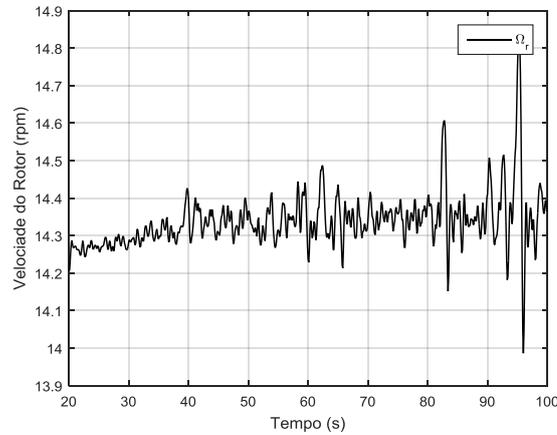


Figura 36: Velocidade do rotor da turbina - Rajada de vento.

Na Figura 37, estão ilustrados os ângulos de passo das pás da turbina. Nota-se que os controladores mantêm um rastreamento de referência satisfatório, diante da rajada de vento a qual o SCEE foi submetido. Como ocorreu nos testes apresentados anteriormente, a variância do ângulo de passo é menor quando o sistema é controlado pelo GMV. Entre os instantes de tempo, $t = 80s$ e $t = 100s$, os ângulos de passo das pás começam a excursionar de maneira mais acentuada, devido a velocidade do vento ser muito elevada.

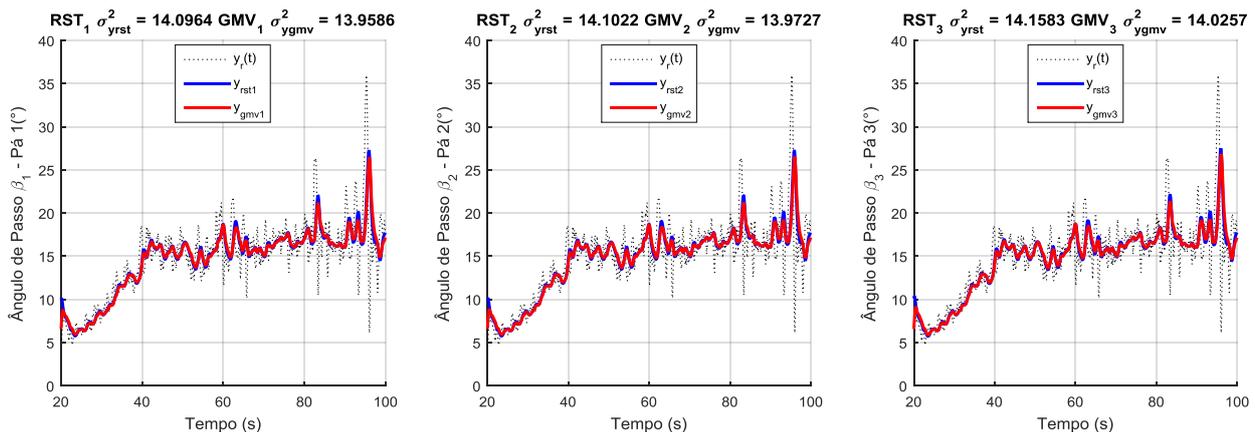


Figura 37: Ângulo de passo das pás da turbina - Rajada de vento.

Na Figura 38 são ilustrados os sinais de posição dos atuadores e o comando de válvula. O comportamento apresentado sob a ação dos controladores RST e GMV foi similar

ao que foi constatado nos testes anteriores. Os índices ISU e $\sigma_y^{2,7}$ são menores quando o sistema é regulado pelo controlador GMV, obtido por meio da AE do controlador RST.

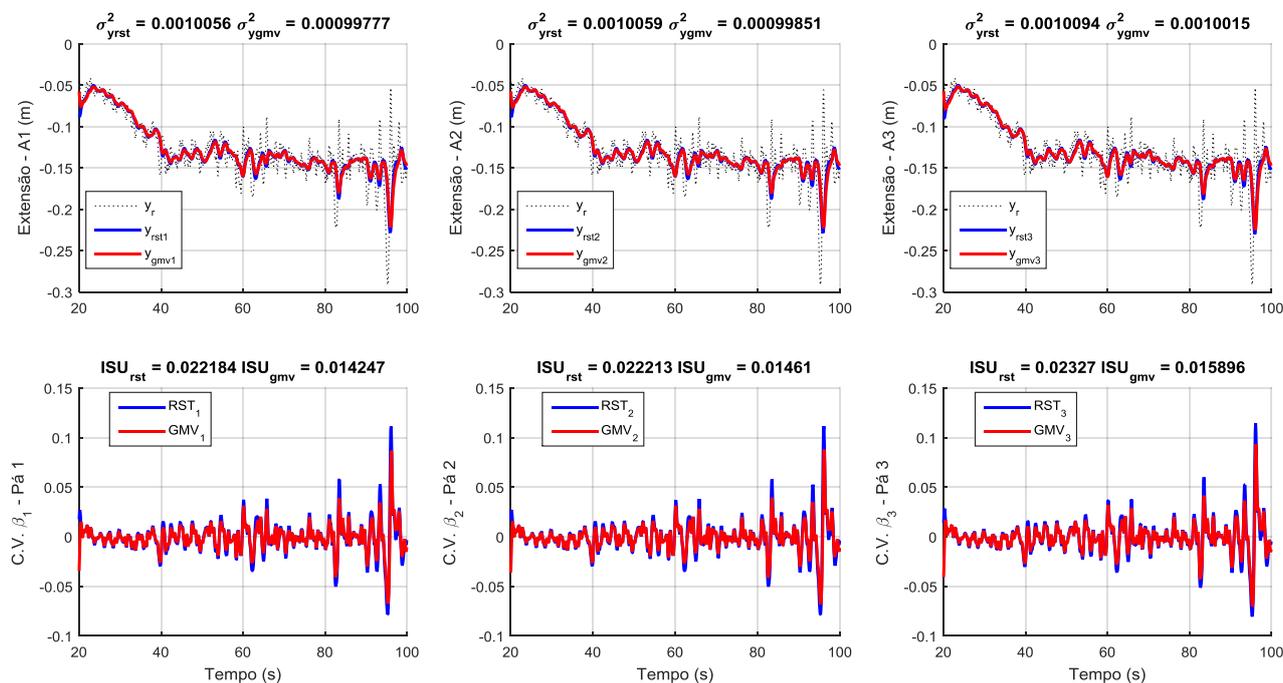


Figura 38: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Rajada de vento.

O desempenho dos controladores, durante o teste de rajada do vento, foi comparado e, na Tabela 8, são apresentados os resultados obtidos em termos de seus índices de desempenho.

Novamente, foi constatado que as discrepâncias não foram tão grandes entre os desempenhos dos controladores RST e GMV. Destaca-se o índice ADC , que foi praticamente igual. Por esses valores de ADC , percebe-se que, durante uma rajada de vento, a atividade do RAP é deveras aumentada.

Apesar de, o melhor índice ISE ser do controlador RST. Os índices ISU e $IS\Phi$ comprovam novamente que, a AE aplicada ao RAP-RST, fornece controladores que atuam de maneira mais econômica, sem comprometer tanto o desempenho. Ou seja, o GMV se manteve melhor com relação aos objetivos buscados nesta pesquisa.

Tabela 8: Índices de desempenho – Rajada de Vento.

Controlador	ISU	ISE	$IS\Phi$	σ_{ϕ}^2	σ_{β}^2	ADC
RST	0,0225	6,7843	12,0411	1,5035	14,1187	79,85 %
GMV	0,0149	17,5889	7,6847	0,9571	13,989	79,8 %

⁷ Variância da posição dos atuadores.

5.4 Acoplamento físico das pás

No quarto e último teste realizado no simulador do SCEE, buscou-se demonstrar a influência do acoplamento físico existente entre as pás da turbina.

Na Figura 39 é ilustrada a partida do SCEE. Neste teste é novamente comparado o comportamento do ângulo de passo das pás, sob a ação dos três controladores, PID, RST e GMV. A partida ocorreu de maneira normal com os controladores RST e GMV. Diferente do que ocorreu com o controlador PID.

A partida do SCEE, tendo o ângulo de passo controlado pelo PID, sofreu uma alteração. Na Pá 3, o ângulo de passo possui valor próximo de zero. Note que a variância do ângulo de passo nas Pás 1 e 2, controladas pelo PID, teve valores maiores do que os que foram obtidos anteriormente (ver Figura 29).

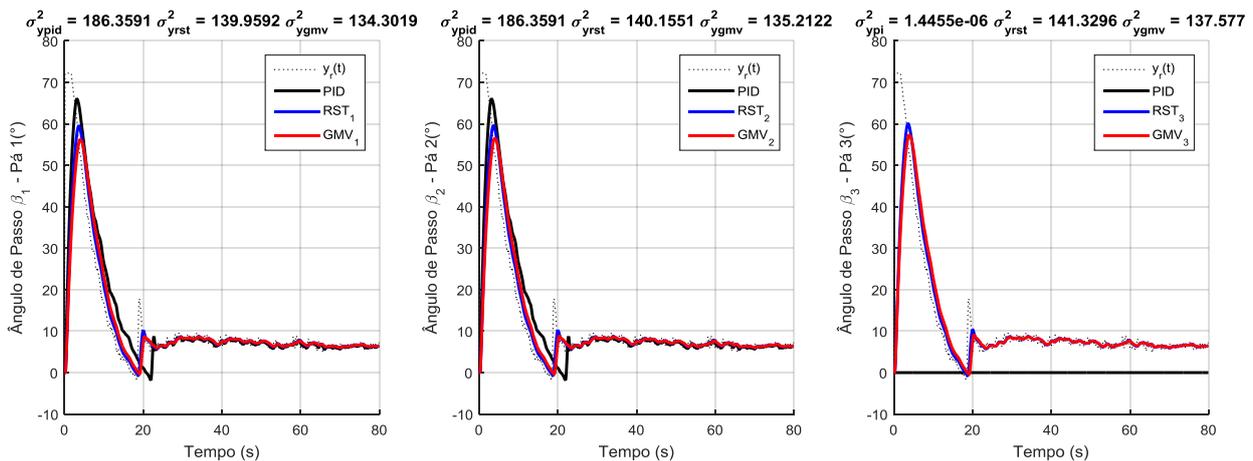


Figura 39: Ângulo de passo das pás da turbina - Acoplamento físico entre as pás.

Analisando-se a Figura 40 é possível compreender melhor o que aconteceu. Foi imposto, de maneira *ad hoc*, um sinal de comando de válvula do sistema de atuação da Pá 3, com um valor próximo de zero. Ou seja, o RAP 3, implementado neste teste, foi apenas um valor constante.

É possível perceber ainda, que existe uma defasagem em relação ao rastreamento da referência e maior esforço de controle exigido nos RAP 1 e 2, no caso PID.

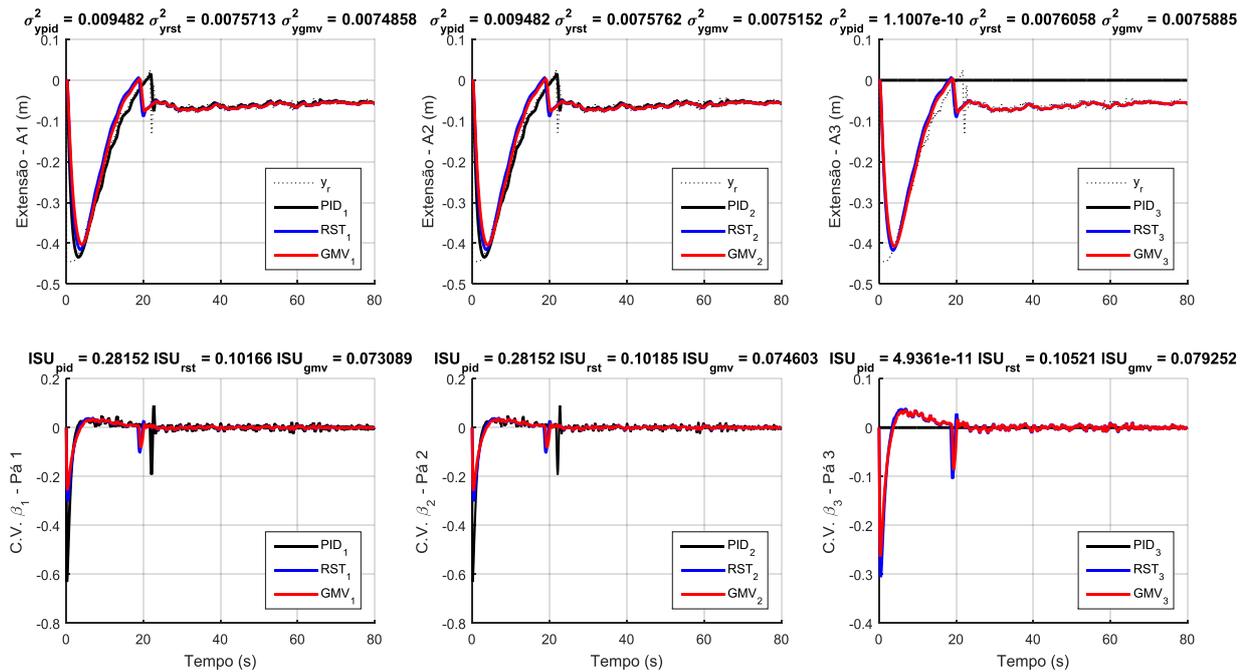


Figura 40: Extensão dos atuadores e comando de válvula - Acoplamento físico entre as pás.

Este teste foi realizado para comprovar que existe a necessidade de se tratar o problema de regulação do ângulo de passo de maneira multivariável nos sistemas que possuem controle individual dos atuadores. Esta é a abordagem encontrada em Vali et al. (2016), o qual aplicou o controlador LQR para regular o ângulos de passo das pás.

Apesar de ser constatada a necessidade de uma abordagem MIMO, optou-se, nesta dissertação, por tratar o problema de maneira SISO. Tal motivação justifica-se devido esta ser a primeira pesquisa em que o autor teve contato com os problemas do SCEE. Além de ser a primeira aplicação da AE sobre sistemas de geração eólica.

É válido observar que, há possibilidade de aplicação da AE sobre o LQR, a partir do trabalho de Silveira e Coelho (2011).

5.5 Conclusão do capítulo

Para finalizar este capítulo, é necessário fazer algumas observações e acrescentar as devidas conclusões baseadas na análise dos resultados.

Algo que pode ser questionado é: Do ponto de vista de um operador, iria valer a pena investir em treinamento de pessoal para se obter um ganho não tão expressivo (pensando a curto prazo)?

A resposta é sim, pois o que se propõe com a Augmentação Estocástica é, tão somente, embarca-la nos sistemas de automação industriais. A ideia é que o operador nem saberia da existência desta tecnologia dentro dos microcontroladores embarcados. Seria um segredo industrial. O produto seria um RST AE ou PID AE, onde AE seria a tecnologia proprietária do fabricante.

Pensando em longo prazo, é evidente que, com os controladores que passaram pela AE, foi possível diminuir a atividade das válvulas de comando. Isto aumentaria, de maneira significativa, a vida útil dos atuadores, reduzindo os gastos com manutenção.

Por fim, é necessário ressaltar que, se alguém considera algo ótimo, no caso determinístico, ainda há uma versão estocástica a ser explorada.

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação foram investigados os benefícios de se realizar a Augmentação Estocástica de controladores RST determinísticos, aplicados como Reguladores do Ângulo de Passo em um SCEE de Velocidade Fixa. O produto obtido com a AE foram os controladores GMV baseados no *loop-shaping* do controlador RST. A proposta de solução do problema em questão, foi tratada através de uma abordagem de projeto de controlador linear, preditiva e estocástica.

É válido ressaltar que a aplicação do conceito de AE, sobre sistemas de geração de energia eólicos, foi realizada pela primeira vez. Ao considerar que a AE está baseada no conceito de variância mínima, destaca-se que foi proposta uma abordagem diferente e inédita na solução dos problemas de controle em SCEE. Esta abordagem se opõe à conclusão de que os controladores baseados no regulador de variância mínima são não implementáveis em sistemas eólicos de geração, como encontrado em alguns trabalhos da literatura.

Os controladores aplicados ao controle do modelo não linear do SCEE foram implementados através dos filtros digitais do ambiente de simulação Matlab[®]/Simulink[®]. Isto pode gerar dúvidas relacionadas à aplicabilidade da técnica em ambiente industrial, tendo em vista que é necessário se trabalhar com algoritmos para serem embarcados nos *firmwares* dos microcontroladores.

No entanto, é válido observar que antes de se aplicar os controladores sobre o modelo não linear, foram realizados testes com o modelo linear identificado. Os testes com o modelo linear foram desenvolvidos através de algoritmos de controle que podem ser facilmente adaptados para implementação em microcontroladores utilizados pela indústria (ver Apêndice D).

Foi constatado que, os índices de desempenho do controlador RST foram satisfatórios. Contudo, dentro do que se tinha como objetivo nesta investigação, conclui-se que o GMV, resultante do procedimento de AE, obteve melhores índices. Comparando-se as métricas utilizadas para avaliar os controladores, o GMV se mostrou mais adequado ao compromisso entre desempenho e consumo energético.

Pensando em curto prazo, conclui-se que a melhoria de desempenho, no problema investigado, não é tão elevada. Mas algo que ficou evidente, foi existência de uma versão estocástica de controladores a ser explorada. No caso determinístico, existe um ponto mínimo para os índices de desempenho analisados. Porém, se o modelo, no qual o projeto do

controlador foi baseado, incluir parcela determinística e estocástica, o ponto mínimo dos índices de desempenho é modificado.

As principais contribuições da pesquisa apresentada nesta dissertação, são destacadas na seção a seguir.

6.1 Principais contribuições desta dissertação

- Este é o primeiro trabalho em que, o conceito de variância mínima juntamente com o controlador GMV, foram aplicados aos Sistemas de Conversão de Energia Eólica através de uma abordagem em que, de fato, somente especialistas no projeto de tais controladores, o poderiam fazer.
- Apesar de não ser tão grande a diferença. O controlador GMV foi capaz de reduzir o consumo energético nos sistemas de atuação.
- Com o emprego do controlador GMV resultante da AE, foi possível diminuir a atividade dos atuadores. Pensando em longo prazo, isto pode reduzir os custos relacionados à manutenção dos sistemas e aumento da vida útil dos equipamentos.
- Procedimento de projeto de controladores baseados em modelos que incluem parcela determinística e estocástica do processo. Resultando no aumento do desempenho dos controladores sintetizados.
- Mesmo sem o uso da tecnologia LIDAR, foi possível obter melhorias na operação do SCEE.

6.2 Publicações

Nesta seção são apresentados os trabalhos publicados ao longo do curso de mestrado e que tiveram relação direta e indireta com o conteúdo apresentado nesta dissertação.

6.2.1 Trabalhos relacionados diretamente com esta pesquisa

SILVEIRA, A. S. & SILVA, A. F., 2015. Hybrid Direct Self-Tuning and Fuzzy Adaptive Control Algorithm Bio-Inspired by Muscle-Brain Connection. Natal: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.

Neste artigo publicado no SBAI de 2015, foi realizado o primeiro contato com a teoria do controlador GMV. Os conceitos sobre o MVC, descritos na Seção 3.3 do Capítulo 3, foram baseados nesta publicação.

PINHEIRO, T. C. F., SILVA, A. F., SILVEIRA, A. S. & ARAÚJO, M. S., 2016. Stochastic Augmentation by Generalized Minimum Variance Control with RST Loop-Shaping. Vitória: XXI Congresso Brasileiro de Automática.

Tendo sua preparação iniciada dentro das atividades da disciplina de Controle Digital de Sistemas, cursada no PPGEE, este artigo foi a base para o procedimento da AE aplicado nesta dissertação. Esta publicação marcou o início dos estudos, no contexto do LACOS, sobre como acrescentar características estocásticas à controladores determinísticos.

6.2.2 Trabalhos relacionados indiretamente com esta pesquisa

Os trabalhos apresentados a seguir resultam de uma salutar parceria com os alunos e professores do Laboratório de Controle e Sistemas de Potência (LACSPOT) da UFPA. Com os conhecimentos obtidos na preparação destes trabalhos, foi adquirida uma importante experiência com sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Em todos os artigos publicados, o tema central é a Teoria de Controle sendo aplicada aos Sistemas Elétricos de Potência.

SILVA, A. F. et al., 2016. Análise Intervalar Aplicada ao Projeto de Controlador Robusto para Regulação da Velocidade de um Sistema de Geração em Escala Reduzida. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, 4(1), pp. 010116-1 - 010116-7.

SILVA, A. F. et al., 2015. Projeto e Avaliação Experimental de um Controlador Robusto Intervalar Otimizado para Regulação de Velocidade de um Sistema De Geração em Escala Reduzida. Natal: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.

CUNHA, L. B., ROCHA, E. M.; SILVA, A. F.; BARRA, W.; BARREIROS, J. A. L., 2016. Synthesis and Robustness Analysis of Damping Control Systems Subject to Parametric Uncertainties. Maresias: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling*.

DUARTE, P. W. B., SILVA, A. F., ROCHA, E. M. & BARRA, W., 2015. Desenvolvimento e Testes de um Simulador do Compensador Síncrono da Subestação de Vila do Conde para Estudos de Manutenção e de Estabilidade da Transmissão de Energia. São José dos Campos: The XI Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission - Clagtee 2015.

CUNHA, L. B., SILVA, A. F., BARREIROS, J. A. L., SILVEIRA, A. S., BARRA, W., 2015. *Projeto de Controlador Robusto via Programação Linear*. Natal: Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, Vol. 4, N. 1, 2016.

O autor está preparando um artigo para ser submetido à Revista Energy, da Elsevier. Onde serão publicados os resultados desta dissertação, relacionados especificamente à aplicação em SCEE.

6.3 Proposta para trabalhos futuros

Tendo em vista o prosseguimento dos estudos dentro do tema da Teoria de Controle Preditivo e Estocástico, aplicada tanto em processos industriais de maneira geral, quanto em sistemas de geração de energia eólica, são propostos a seguir alguns trabalhos a serem desenvolvidos futuramente:

- Considerando o vasto número de abordagens de projeto em que a parcela estocástica do modelo é negligenciada. Será investigado, a aplicação da Augmentação Estocástica numa gama maior de processos industriais. Tais como: sistemas robóticos, sistemas aeroespaciais, sistemas de telecomunicações, sistemas biomédicos e etc.
- Investigar a aplicação do controlador GMV, no contexto dos SCEE, sendo projetado sem herança do *shape* de controladores determinísticos.
- Aplicar a AE sobre o controle de SCEE com Velocidade Variável.
- Investigar o uso da tecnologia LIDAR em conjunto com a AE para melhoria da operação dos SCEE.
- Realizar o projeto de um Regulador do Ângulo de Passo por meio de uma abordagem de controle MIMO, com a técnica de controle LQR. E posterior AE deste controlador.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T., 2005. *Wind power in power systems*. 1ª Edição ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

AGUIRRE, L. A., 2014. *Introdução à Identificação de Sistemas, Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Prática*. 4ª Revista ed. Belo Horizonte: Editora UFMG.

ÅSTRÖM, K. J., 1970. *Introduction to Stochastic Control Theory*. s.l.:Academic Press Inc.

ÅSTRÖM, K. J. & HAGGLUND, T., 2006. *Advanced PID Control*. s.l.:ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society.

ÅSTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B., 1973. On self-tuning regulators. *Automatica*, Volume 9, p. 195–199.

ÅSTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B., 1996. *Computer-Controlled Systems Theory and Design*. 3ª ed. s.l.:Prentice Hall.

AYRES JUNIOR, F. A. C., 2014. *Estratégia de Controle de Ordem Fracionária Aplicadas ao Amortecimento das Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência*. Belém: Dissertação de Mestrado. UFPA..

BALDO, F., 2012. *Modeling of Load Interfaces for a Drive Train of a Wind Turbine*. Gothenburg: Master's Thesis in the Master programme Applied Mechanics. Chalmers University of Technology.

BARRA JUNIOR, W., BARREIROS, J. A. L., COSTA JUNIOR, C. T. & FERREIRA, A. M. D., 2005. Controle Fuzzy Aplicado à Melhoria da Estabilidade Dinâmica em Sistemas Elétricos de Potência. *Revista Controle & Automação*, 16(2).

BARRA, W., 2001. *Estratégias Neuro-Fuzzy Adaptativas aplicadas ao Controle de Sistemas de Potência*. Belém: Tese de Doutorado PPGEE - UFPA.

BHADRA, S. N., KASTHA, D. & BANERJEE, S., 2005. *Wind Electrical Systems*. 1ª Edição ed. Nova Delhi: Oxford University Press.

BIANCHI, F. D., BATTISTA, H. D. & MANTZ, R. J., 2007. *Wind turbine control systems : principles, modelling and gain scheduling design..* Alemanha: Springer.

BOSSANYI, E. A., 2003. Individual Blade Pitch Control for Load Reduction. *Wind Energy*, Issue 6, p. 119–128.

BOTASSO, C. L., CAMPAGNOLO, F., CROCE, A. & TIBALDI, C., 2013. Optimizationbased study of bend-twist coupled rotor blades for passive and integrated passive/active load alleviation. *Wind Energy*, Volume 16, pp. 1149-1166.

BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N. & BOSSANYI, E., 2001. *Handbook of wind energy*. ENGLAND: John Wiley & Sons, Ltd.

CASTRO, L. A. M., 2015. *PROJETO DE ESTABILIZADORES DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO CONTROLE ADAPTATIVO AUTO-AJUSTÁVEL*. Belém: Trabalho Acadêmico de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará.

CLARKE, D. W. & GAWTHROP, P. J., 1975. Self-tuning controller. *Proc. of the Institution of Electrical Engineers*, 122(9), p. 929–934.

COELHO, A. A. R., 1991. *Controle Adaptativo para Processos Multivariáveis: Aspectos Teóricos e Simulação..* Campinas: (Doutorado) – DCA/FEE/UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas.

COELHO, A. A. R. & COELHO, L. S., 2015. *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. 2ª Revista ed. Florianópolis: Ed. da UFSC.

COSTA, C. A., 2013. *Projeto e Avaliação Experimental de uma Estratégia Baseada em Análise Intervalar Aplicada ao Projeto de Estabilizador de Sistemas de Potência Robusto Implementado em um Sistema de Geração de 10kVA*. Belém: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará..

CUNHA, L. B. et al., 2016. *SYNTHESIS AND ROBUSTNESS ANALYSIS OF DAMPING CONTROL SYSTEMS SUBJECT TO PARAMETRIC UNCERTAINTIES*. Maresias: Proceedings of the 3rd International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling.

CUNHA, L. B. et al., 2015. *Projeto de Controlador Robusto via Programação Linear*. Natal: Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, Vol. 4, N. 1, 2016.

DOI, M. & MORI, Y., 2002. *A study on robust asymptotic tracking property for generalized minimum variance control*. s.l.:American Control Conference.

DUARTE, P. W. B., SILVA, A. F., ROCHA, E. M. & BARRA, W., 2015. *Desenvolvimento e Testes de um Simulador do Compensador Síncrono da Subestação de Vila do Conde para Estudos de Manutenção e de Estabilidade da Transmissão de Energia*. São José dos Campos: THE XI LATIN-AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2015.

ELNAGGAR, M., ABDEHL FATTAH, H. A. & ELSHAFEI, A. L., 2014. Maximum power tracking in WECS (Wind energy conversion systems) via numerical and stochastic approaches. *Energy*, 74(2014), pp. 651-661.

ELNAGGAR, M. M., FATTAH, H. A. A. & ELSHAFEI, A. L., 2013. *Stochastic Predictive Tracking Controller for Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion System*. Cairo: U2013 Proceedings of International Conference on Modelling, Identification & Control.

FOX, B. et al., 2007. *Wind power integration: connection and system operational aspects*. 1ª Edição ed. UK: The Institution of Engineering and Technology.

FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D. & EMAENI-NAENI, A., 2010. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 6ª ed. New Jersey: Pearson, Prentice Hall.

HAU, E., 2005. *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2ª ed. Berlin: Springer.

LAKS, J. H., PAO, L. Y. & WRIGHT, A. D., 2009. *Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future*. St. Louis: American Control Conference.

LJUNG, L., 2015. *System Identification Toolbox. User's Guide*. U.S.: The MathWorks, Inc.

LUO, N., VIDAL, Y. & ACHO, L., 2014. *Wind Turbine Control and Monitoring*. Londres: Springer.

MATHWORKS, T., 2016. *Simscape, Getting Started Guide*. U.S.: The MathWorks, Inc.

MILLER, S., 2017. *Wind Turbine Model*. [Online] Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25752-wind-turbine-model>

[Accessed 20 Março 2017].

MUNTEANU, I., BRACU, A. I., CUTULULIS, N. A. & CEANGA, E., 2008. *Optimal Control of Wind Energy Systems Towards a Global Approach*. Spain: Springer-Verlag London Limited.

NICHITA, C., LUCA, D., DAKYO, B. & CEANG, E., 2002. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(4), pp. 523-529.

OGATA, K., 2003. *Engenharia de Controle Moderno*. 4ª ed. São Paulo: Pearson - Prentice Hall.

PARDALOS, P. M. et al., 2013. *Handbook of Wind Power Systems*. Londres: Springer.

PINHEIRO, T. C. F., SILVA, A. F., SILVEIRA, A. S. & ARAÚJO, M. S., 2016. *STOCHASTIC AUGMENTATION BY GENERALIZED MINIMUM VARIANCE CONTROL WITH RST LOOP-SHAPING*. Vitória: XXI Congresso Brasileiro de Automática.

SCHOLBROCK, A. et al., 2016. *Lidar-Enhanced Wind Turbine Control: Past, Present, and Future*. Boston: American Control Conference.

SILVA, A. F., 2014. *Projeto e Avaliação Experimental de Controlador Robusto Intervalar para Regulação de Velocidade em um Sistema de Geração em Escala Reduzida*. Belém: Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará.

SILVA, A. F. et al., 2016. Análise Intervalar Aplicada ao Projeto de Controlador Robusto para Regulação da Velocidade de um Sistema de Geração em Escala Reduzida. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, 4(1), pp. 010116-1 - 010116-7.

SILVA, A. F. et al., 2015. *PROJETO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLADOR ROBUSTO INTERVALAR OTIMIZADO PARA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA*. Natal: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.

SILVEIRA, A. S., 2012. *CONTRIBUIÇÕES AO CONTROLE DE VARIÂNCIA MÍNIMA GENERALIZADO: ABORDAGEM DE PROJETO NO ESPAÇO DE ESTADOS*. Florianópolis: Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVEIRA, A. S., 2015. *CDS - CONTROLE DIGITAL DE SISTEMAS: UMA ABORDAGEM EM CONTROLE DE PROCESSOS*. Belém: Material de aula da Disciplina de Controle Digital do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará.

SILVEIRA, A. S. & COELHO, A. A. R., 2011. Generalised minimum variance control state space design. *IET Control Theory and Applications*, 5(15), p. 1709–1715.

SILVEIRA, A. S. & SILVA, A. F., 2015. *HYBRID DIRECT SELF-TUNING AND FUZZY ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM BIO-INSPIRED BY MUSCLE-BRAIN CONNECTION*. Natal: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.

SILVEIRA, A. et al., 2016. Generalized minimum variance control under long-range prediction horizon setups. *ISA Transactions*, Volume 62, p. 325–332.

SOLIMAN, M., 2013. *Model Predictive Control of DFIG-Based Wind Power Generation Systems*. Alberta: University of Calgary. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy.

STEVENS, B. L., LEWIS, F. L. & JOHNSON, E. N., 2016. *Aircraft Control and Simulation - Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems*. 3^a ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

THOMSEM, S. C., NIEMANN, H. & POULSEN, N. K., 2009. *Stochastic Wind Turbine Modeling for Individual Pitch Control*. Budapest: Proceedings of the European Control Conference 2009.

VALI, M., WINGERDEN, J. W. v. & KUHN, M., 2016. *Optimal Multivariable Individual Pitch Control for Load Reduction of Large Wind Turbines*. Boston: American Control Conference.

VEEN, G. v. d., 2013. *Identification of wind energy systems*. Netherlands: Ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Delft.

WELFONDER, E., NEIFER, R. & SPANNER, M., 1997. Development and experimental identification of dynamic models for wind turbines.. *Control Engineering Practice*, 5(1), pp. 63-73.

XIAO, S., GENG, H. & YANG, G., 2014. Non-linear pitch control of wind turbines for tower load reduction. *IET Renewable Power Generation*, Vol. 8(Iss. 7), p. 786–794.

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DE SCEE PROPOSTO PELA MATHWORKS®

Neste apêndice é apresentado o simulador de um SCEE desenvolvido por Miller (2017), engenheiro da MathWorks®. Este simulador foi utilizado como processo *benchmark*, sobre o qual foram aplicados os controladores propostos neste trabalho.

Com a ilustração da Figura A1, é possível ter uma visão geral do simulador do SCEE estudado nesta dissertação. A topologia do sistema de geração empregada, consiste num SCEE de Velocidade Fixa, baseado no Conceito Dinamarquês de turbinas eólicas. O simulador é composto de todos os subsistema presentes em um SCEE, i.e., subsistema aerodinâmico, subsistema de transmissão, subsistema eletromagnético e subsistema elétrico.

Cada subsistema é projetado por meio da ferramenta Simscape™, na qual é possível criar modelos não lineares de sistemas físicos. Os modelos criados no Simscape™ são desenvolvidos dentro do ambiente de simulação Simulink®. Os modelos dos subsistemas, presentes no simulador, foram projetados separadamente e, posteriormente, integrados por meio da conexão dos diagramas de blocos de cada um dos subsistema (MILLER, 2017).

O SCEE da Figura A1 foi desenvolvido seguindo a filosofia do Simscape™, a qual propõe que os modelos físicos sejam criados para possibilitar o desenvolvimento e testes de sistemas de controle (MATHWORKS, 2016).

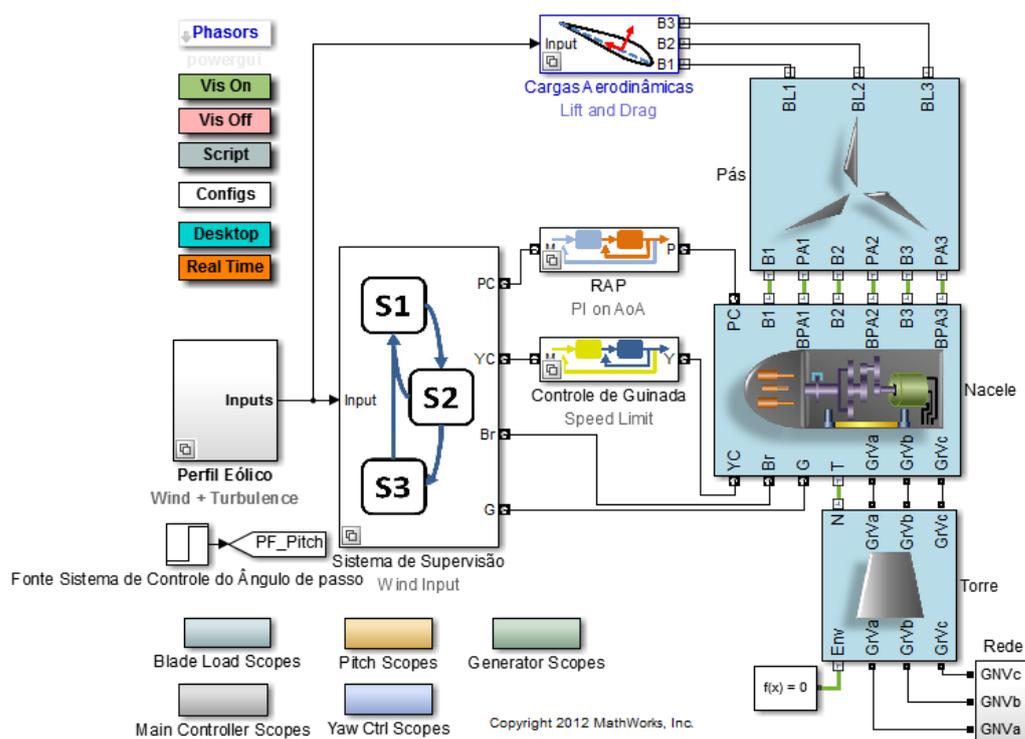


Figura A1: Simulador do SCEE. Fonte: MathWorks®.

Nas seções a seguir serão descritos cada um dos principais subsistemas que compõem o SCEE do simulador. Também serão descritos os parâmetros físicos dos subsistemas.

A.1 Perfil Eólico

Na Figura A2 é ilustrado o diagrama de blocos desenvolvido dentro do ambiente Simulink[®]. Este diagrama foi projetado com o intuito de fornecer um perfil eólico tendo um modelo da velocidade do vento não estacionária.

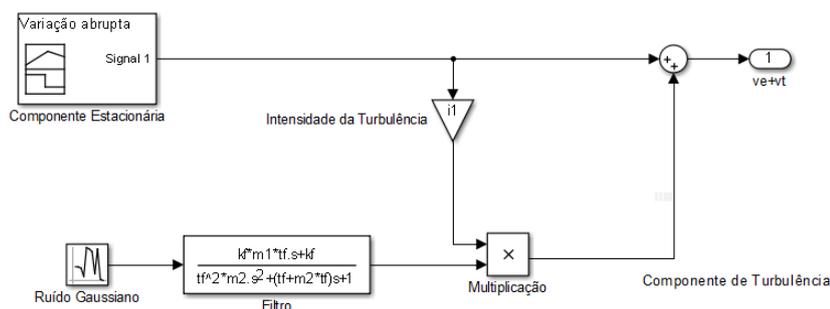


Figura A2: Modelo de velocidade do vento não estacionária. Fonte: MathWorks[®].

Os parâmetros físicos do modelo da Figura A2, utilizado nas simulações, são descritos na Tabela A1.

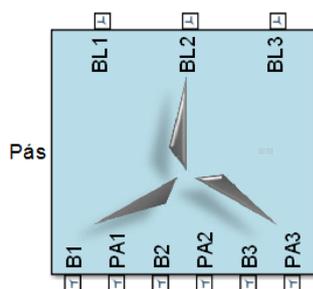
Tabela A1: Parâmetros físicos do perfil eólico.

Parâmetro	Valor
T_s	0,1s
T_f	5,8824
K_f	9,3736
I_t	16%
L_t	50
Média anual da velocidade do vento	8,5m/s

O perfil eólico gerado com o diagrama de blocos da Figura A2 acrescenta uma contribuição ao SCEE do simulador, o qual é disponibilizado com perfis eólicos sem a componente de turbulência da velocidade do vento.

A.2 Subsistema Aerodinâmico

O bloco ilustrado na Figura A3 representa o modelo das três pás da turbina eólica.



Copyright 2012 MathWorks, Inc.

Figura A3: Diagrama de blocos com o modelo das pás da turbina. Fonte: MathWorks®.

Na Figura A4 é ilustrado um dos diagramas com os blocos do Simscape™ que representam o modelo de uma das pás dentro do diagrama da Figura A3.

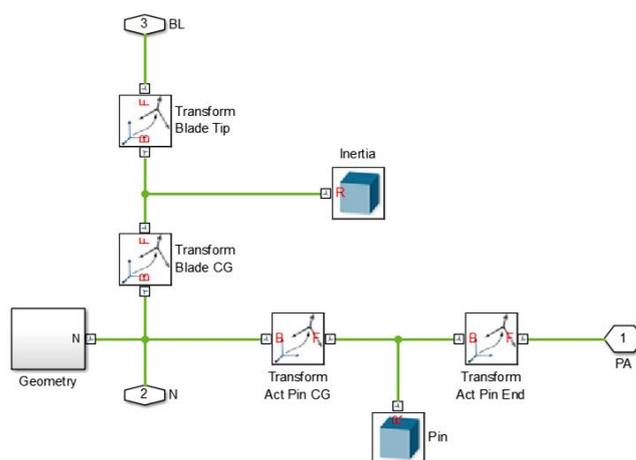


Figura A4: Modelo da pá. Fonte: MathWorks®.

Na Tabela A2 são apresentados os parâmetros físicos das pás da turbina eólica.

Tabela A2: Parâmetros físicos do perfil eólico.

Tipo	AL 40
Comprimento das pás	40 m
Material	Carbono/madeira/vidro/epoxy
Padrão de cor	RAL 7035
Polimento	Classe 2: (30-70%) - DS/ISO2813
Tipo de freio do rotor	Todas as Pás

Perfil das pás	FFA - W3, NACA 63.4
Flexão	20°
Corda	3,08 m

A.3 Nacele

Na Figura A5 é mostrado como é feita a conexão dos subsistemas da Nacele, no SCEE do simulador. Dentro da Nacele estão presentes o sistema de atuação hidráulico do ângulo de passo, o modelo do rotor da turbina, o subsistema de transmissão (caixa de engrenagens), o sistema de atuação para controle de guinada e o subsistema eletromagnético.

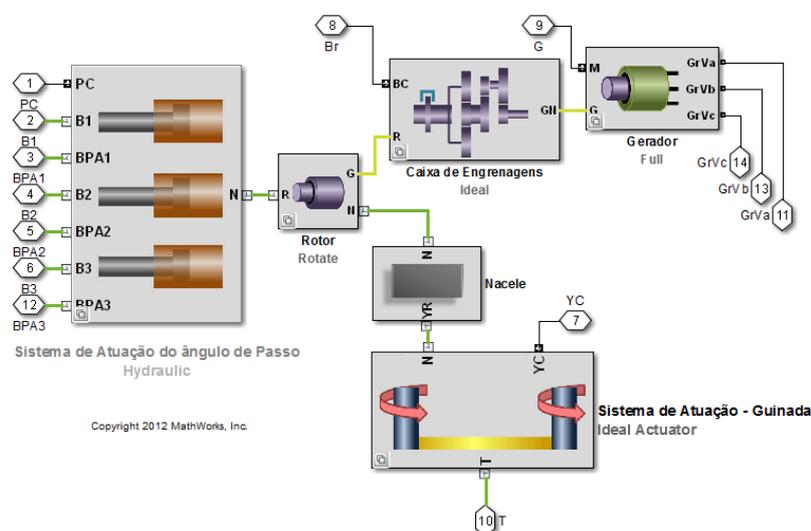


Figura A5: Nacele. Fonte: MathWorks®.

A.4 Sistema de Atuação Hidráulico

O sistema de atuação hidráulico do SCEE é responsável por regular o ângulo de passo das pás da turbina eólica, a partir dos sinais gerados pelo RAP. Este é o sistema sobre o qual as técnicas de controle foram aplicadas.

Na Figura A6 é ilustrado os blocos do Simscape™ que implementam o modelo físico dos Atuadores 1, 2 e 3.

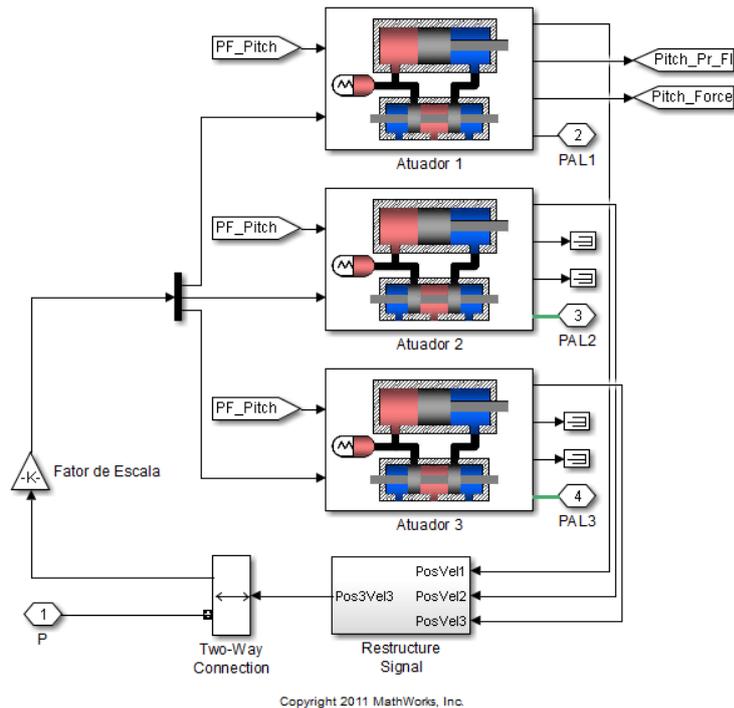


Figura A6: Modelo do controle individual do ângulo de passo. Fonte: MathWorks®.

Dentro de cada Atuador, ilustrado na Figura A6, está presente o diagrama de blocos da Figura A7, responsável por gerar a dinâmica dos modelos de atuadores hidráulicos criados com o Simscape™.

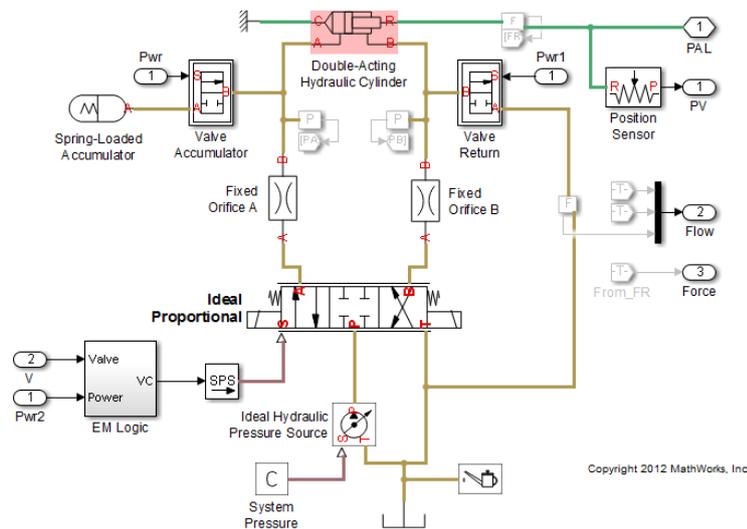


Figura A7: Atuador hidráulico. Fonte: MathWorks®.

Na Tabela A3 são mostrados os parâmetros físicos dos sistemas de atuação hidráulicos, responsáveis por modificar o ângulo de passo das pás da turbina.

Tabela A3: Parâmetros físicos do sistema de atuação hidráulico - ângulo de passo.

Parâmetro	Valor
Pressão hidráulica	2e7 Pa
Capacidade do acumulador	0,1 L
Pressão de pré-carga do acumulador	1,5e7 Pa
Pressão máxima do acumulador	2,5e7 Pa

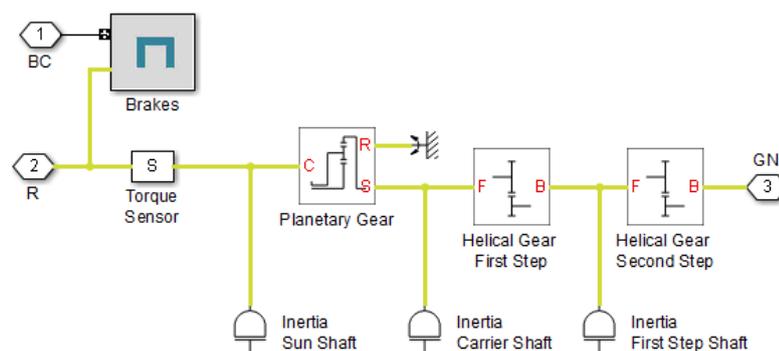
Na Tabela A4 são descritas as especificações de desempenho exigidas para os Reguladores do Ângulo de Passo.

Tabela A4: Especificações de desempenho para o RAP.

Parâmetro	Valor
Rastreamento do Ângulo de Passo	1°
Tempo de subida	3s
Tempo de assentamento	5s

A.5 Sistema de Transmissão

Na Figura A8 é ilustrado o modelo do sistema de transmissão mecânica, responsável por conectar o EVB ao EVA.



Copyright 2011 MathWorks, Inc.

Figura A8: Sistema de Transmissão mecânico. Fonte: MathWorks®.

Os parâmetros do sistema de transmissão mecânica, do SCEE em estudo, são descritos na Tabela A5.

Tabela A5: Parâmetros físicos do sistema de transmissão mecânico.

Tipo	1. step planet, 2. step helical
Material - Casa de engrenagens	Fundido
Razão de transformação	1:84.3
Potência Mecânica	1800 kW
Força de torção- ISO 6336	SF > 1.6
Durab. Superficial - ISO 6336	SH > 1.25
Scuffing safety acc. to DNV 41.	SS > 1.3
Vedação dos Eixos	Labyrinth
Reservatório de Óleo	Aproximadamente 250 l

A.6 Sistema Eletromagnético

O sistema eletromagnético é ilustrado por meio da Figura A9. Neste sistema são utilizados os modelos do SimPowerSystems, o qual é uma das bibliotecas de modelagem do Simscape™.

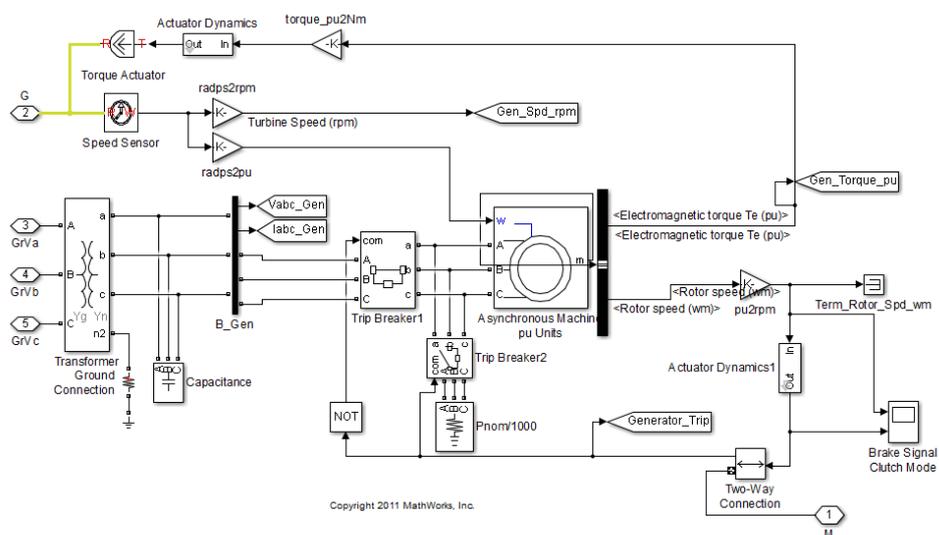


Figura A9: Sistema Eletromagnético. Fonte: MathWorks®.

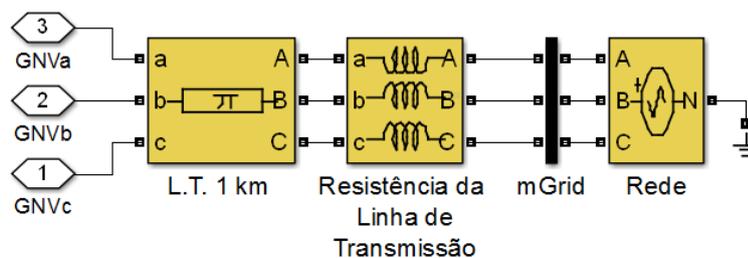
Os parâmetros físicos do gerador de indução, elemento principal do sistema eletromagnético, são apresentados na Tabela A6.

Tabela A6: Parâmetros físicos do gerador.

Parâmetro	Valor
Potência Ativa nominal	1650 kW
Potência Aparente	1808 kVA
Corrente Nominal	1740 A
Máx Potência Class F PFmax	1815 kW
Máx Corrente Class F IFmax	1914 A
Corrente à vazio	430 A
Número de polos P	6
Velocidade síncrona à vazio	1200 rpm
Velocidade nominal	1214 rpm
Escorregamento na Pot. nominal	0.0117
Tensão terminal	3 x 600 V
Frequência F	60 Hz

A.7 Sistema Elétrico

Por fim, é ilustrado na Figura A10 o modelo do sistema elétrico ao qual o SCEE é conectado.



Copyright 2011 MathWorks, Inc.

Figura A10: Sistema Elétrico. Fonte: MathWorks®.

Na Tabela A7 são apresentados os parâmetros da rede elétrica.

Tabela A7: Parâmetros físicos da rede elétrica.

Parâmetro	Valor
Tensão da Rede	25kV
Frequência	60Hz

APÊNDICE B - EQUIVALÊNCIA ENTRE A POSIÇÃO DOS ATUADORES E O ÂNGULO DE PASSO

Na Tabela B1 é descrito como se dá a proporção existente entre a posição do atuador hidráulico e o ângulo de passo.

Tabela B1: Equivalência entre a posição do atuador e o ângulo de passo.

Posição - Ângulo de Passo	
Extensão	Ângulo
-0,445	72,20373888
-0,444998513	72,202445
-0,444995539	72,19985808
-0,444980668	72,18693996
-0,444906316	72,12275612
-0,444534556	71,81138368
-0,444162795	71,51431631
-0,44367156	71,14067705
-0,443180326	70,78558564
-0,442573642	70,36891105
-0,441966959	69,97298769
-0,441196245	69,49552156
-0,44042553	69,04247567
-0,439440795	68,49375604
-0,438456059	67,97382627
-0,437187552	67,3398612
-0,435919044	66,74004368
-0,434268369	66,00239799
-0,432617695	65,30560949
-0,430441739	64,43909119
-0,428265783	63,62206993
-0,425442453	62,62306058
-0,422619124	61,6815391
-0,418836874	60,49441555
-0,415054623	59,37758765
-0,410045532	57,98690319
-0,40503644	56,67907943
-0,398310796	55,02888421
-0,391585152	53,47777236
-0,382415766	51,49153015
-0,37324638	49,62526907
-0,360602029	47,20832421
-0,347957678	44,93662276
-0,330237073	41,94450207
-0,312516468	39,12842605
-0,288104489	35,47081804

-0,26369251	32,011653
-0,232907469	27,8634411
-0,202122427	23,89618514
-0,163544339	19,11276174
-0,12496625	14,48007941
-0,086388162	9,95070221
-0,047810073	5,487142523
-0,009231985	1,057967795
-6,72E-15	7,55E-13
5,55E-17	-8,68E-15
0,014282401	-1,636864224
0,042847202	-4,915877365
0,082847202	-9,536458932
0,122847202	-14,21737966
0,162847202	-18,99014069
0,202847202	-23,89045542
0,242847202	-28,96105063
0,282847202	-34,25587226
0,322847202	-39,84701775
0,362847202	-45,83728377
0,402847202	-52,38552362
0,442847202	-59,76613325
0,466977919	-64,83371211
0,491108637	-70,63864656
0,5039773	-74,19500587
0,516845963	-78,25598134
0,523623997	-80,69515478
0,530402031	-83,44678219
0,535612919	-85,875577
0,539387496	-87,89342555
0,542184891	-89,60011605
0,544221097	-91,00966043
0,545719117	-92,17699869
0,546838348	-93,15114213
0,547704215	-93,98759204
0,548250768	-94,56521308
0,54879732	-95,19321775
0,549179627	-95,67071679
0,549561933	-96,18883673
0,54994424	-96,76016926
0,55021902	-97,21480287
0,550406058	-97,55217708
0,550593097	-97,91897471
0,550780135	-98,32458486
0,5509113	-98,64022277

<u>0,550999846</u>	<u>-98,87267642</u>
<u>0,551088392</u>	<u>-99,12548677</u>
<u>0,551149935</u>	<u>-99,31650447</u>
<u>0,551211479</u>	<u>-99,52371354</u>
<u>0,551273023</u>	<u>-99,75209993</u>
<u>0,551317523</u>	<u>-99,93487043</u>
<u>0,55134785</u>	<u>-100,0706655</u>

APÊNDICE C - FILTROS SIMULINK® : RV E RAP.

Neste Apêndice são apresentados os filtros digitais que foram aplicados para o sistema de controle do ângulo de passo. Os filtros foram implementados no Simulink®.

Na Figura C1 é ilustrado o bloco responsável regular a velocidade do sistema. Este, representa o controle da malha externa do sistema de controle do ângulo de passo

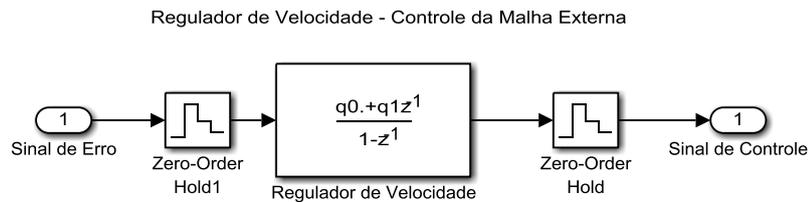


Figura C1: RV - Controlador PI.

Na Figura C2, por sua vez, é ilustrado o controlador RST sendo aplicado como RAP.

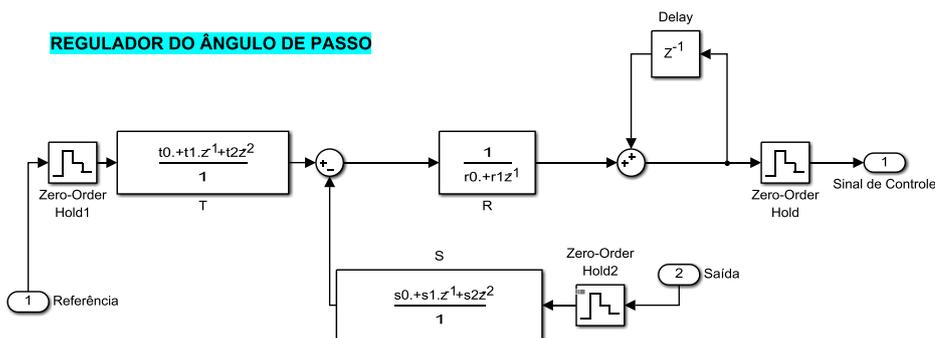


Figura C2: RAP - Controlador RST.

Na Figura C3 é ilustrado o diagrama de blocos do controlador GMV obtido por AE, sendo aplicado como RAP.

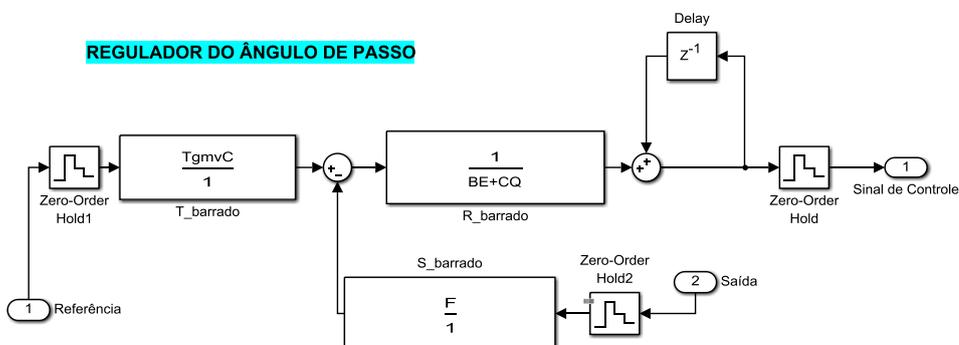


Figura C3: RAP AE- Controlador GMV.

APÊNDICE D - CÓDIGO PARA O PROJETO DOS CONTROLADORES E TESTES SOBRE O SISTEMA LINEAR.

Neste Apêndice é apresentado o código com o projeto do Regulador do Ângulo de Passo e teste sobre o modelo linear do sistema de atuação. O projeto e teste foi realizado no ambiente de programação do Matlab[®], por meio de um m-file. Na Tabela D1, apresenta-se o m-file referente ao projeto do RAP do sistema do Atuador 1. O mesmo algoritmo foi aplicado sobre os sistemas dos Atuadores 2 e 3, modificando apenas os parâmetros dos polinômios $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ e $C(z^{-1})$.

Tabela D1: M-file com projeto e teste do regulador do ângulo de passo - RAP1.

```
% Projeto do Regulador do Ângulo de Passo do Sistema Atuador 1
% Aluno: Anderson de França Silva
% Orientador: Prof. Dr. Antonio da Silva Silveira

clear all; close all; clc; format long;

% Planta Identificada - IDENT
Ts = 0.1; % Período de Amostragem

A1 = [1.0000000000000000 -0.8097 -0.1902];
a1 = A1(2); a2 = A1(3);

B1 = 1.0e-05*[0 0.1662 0.0633];
b0 = B1(2); b1 = B1(3);

C1 = [1.0000000000000000 0.5172 0.1152];
c1 = C1(2); c2 = C1(3);

% Normalização
SCF = 6.2500e-010; % Fator de escala.
NO = 7.0606*1e4; % Parâmetro que normaliza o sinal de comando.

% Sequencia de referencia
yr(1:10)=0; yr(11:1000+1)=1;

nit = length(yr)-1;

% Ruído
xr=rand(nit,1);
xr=2*xr -1;
variancia=0.000682;
```

```

xi=sqrt(variancia*3)*xr;
clear xr;

% Sequencia de perturbacao
v(1:round(nit/2))=0; v(round(nit/2)+1 : nit)=0.5*1;

% Projeto Controlador RST

% Polinômio característico de de malha fechada desejado IMC

% tau_mf = 1; %seconds
% zd = exp(-Ts/tau_mf);
% Az = [1 -zd];

% Planta de Segunda ordem superamortecida
Kp = 1; wn=3; zeta=1.5;

[Bz,Az]=c2dm([Kp*wn^2],[1 2*zeta*wn wn^2],Ts,'zoh');

% Passo a passo RST Incremental

% Passo 1 - Definir polinômio característico de malha fechada desejado
Hc = Az;

% Passo 2 - Polinômio observador
Ho = A1;

% Passo 3 - Calculo polinômio T(z^-1) e ganho de offset
toff1 = sum(Hc)/sum(B1);
T1 = toff1*Ho;

% Passo 4 Ordem dos polinômios R e S
% R - 1ª ordem
% S - 2ª ordem

% Passo 5 - Solução da Equação de Diophantine

Hmf = conv(Hc,Ho);

dA = conv([1 -1], A1);
a1_ = dA(2); a2_ = dA(3); a3_ = dA(4);

h1 = Hmf(2); h2 = Hmf(3); h3 = Hmf(4); h4 = Hmf(5);

r01 = 1; r11 = h4/a3_;

s01 = (h1-r01*a1_ -r11)/(b0+b1); s11 = (h2-r01*a2_ - r11*a1_)/(b0+b1); s21
= (h3-r01*a3_ -r11*a2_)/(b0+b1);

% s01 = (h1-a1)/(b0+b1); s11 = (h2-a2)/(b0+b1); s21 = h3/(b0+b1); %
posicional

t01 = T1(1); t11 = T1(2); t21 = T1(3);

% Projeto do GMV-B-RST

```

```

% Ganhos do GMV

e01 = s01;
f01 = s11+s01*c1-a1_*e01;
f11 = s01*c2+s21+s11*c1-a2_*e01;
f21 = s11*c2+s21*c1-a3_*e01;
f31 = s21*c2;
d = 1;

% Polinômios

E1 = [e01];
F1 = [f01 f11 f21 f31];
P1 = F1;
CR1 = conv(C1,[r01 r11]);
dCR1 = conv(CR1,[1 -1]);
BE1 = (b0+b1)*e01;
dBE1 = conv(BE1,[1 -1]);
Q1 = BE1+ CR1;
Tgmvl = conv(C1,T1);

S1 = [s01 s11 s21];
R1 = [r01 r11];

% Sequencia de referência
% yr(1:10)=0; yr(11:nit+1)=1;

% Condições iniciais

for k=1:3,
    y_gmv1(k)=0; u_gmv1(k)=0; du_gmv1(k)=0; phi2(k)=0; e_gmv1(k)=0;
    y_rst1(k)=0; du_rst1(k)=0; u_rst1(k)=0; e_rst1(k)=0; phi1(k) = 0;
end

for k=4:nit,

    % Simulação RST

    y_rst1(k) = -a1*y_rst1(k-1) -a2*y_rst1(k-2) +b0*u_rst1(k-1)
+b1*u_rst1(k-2)...
                +v(k) +a1*v(k-1) +a2*v(k-2)... % carga
                +xi(k) +c1*xi(k-1) +c2*xi(k-2); % ruído

% posicional
% u_rst1(k) = t0*yr(k) +t1*yr(k-1) +t2*yr(k-2)...
% -s0*y_rst(k) -s1*y_rst(k-1) -s2*y_rst(k-2);

% incremental
du_rst1(k) = (1/r01)*(t01*yr(k) +t11*yr(k-1) +t21*yr(k-2)...
                -s01*y_rst1(k) -s11*y_rst1(k-1) -s21*y_rst1(k-
2)...
                -r11*du_rst1(k-1));

u_rst1(k) = u_rst1(k-1) +du_rst1(k);
e_rst1(k) = yr(k) -y_rst1(k);

phi1(k)= s01*y_rst1(k)*SCF +s11*y_rst1(k-1)*SCF +s21*y_rst1(k-
2)*SCF...

```

```

-t01*yr(k) -t11*yr(k-1) -t21*yr(k-2)...
+r01*du_rst1(k)*SCF +r11*du_rst1(k-1)*SCF;

%   phil(k)= s01*y_rst1(k) +s11*y_rst1(k-1) +s21*y_rst1(k-2)...
%   -t01*yr(k) -t11*yr(k-1) -t21*yr(k-2)...
%   +r01*du_rst1(k) +r11*du_rst1(k-1);

% Simulação GMV

y_gmv1(k)=-a1*y_gmv1(k-1) -a2*y_gmv1(k-2) ...
+b0*u_gmv1(k-1) +b1*u_gmv1(k-2)...
+v(k) +a1*v(k-1) +a2*v(k-2)... % carga
+xi(k) +c1*xi(k-1) +c2*xi(k-2); % ruído

du_gmv1(k) = (1/(b0*e01+r01))*(t01*yr(k+d)+(t01*c1+t11)*yr(k+d-1)
+(t01*c2+t11*c1+t21)*yr(k+d-2)+(t11*c2+t21*c1)*yr(k+d-3) +(t21*c2)*yr(k+d-
4)...
-f01*y_gmv1(k) -f11*y_gmv1(k-1) -f21*y_gmv1(k-2) -
f31*y_gmv1(k-3)...
-(c1*r01+r11)*du_gmv1(k-1) -(c2*r01+r11*c1)*du_gmv1(k-2)
-(r11*c2)*du_gmv1(k-3));

u_gmv1(k) = u_gmv1(k-1) +du_gmv1(k);
e_gmv1(k) = yr(k)-y_gmv1(k);

phi2(k) = s01*y_gmv1(k)*SCF +s11*y_gmv1(k-1)*SCF +s21*y_gmv1(k-
2)*SCF...
-t01*yr(k) -t11*yr(k-1) -t21*yr(k-2)...
+r01*du_gmv1(k)*SCF +r11*du_gmv1(k-1)*SCF;
% phi2(k)= s01*y_gmv1(k) +s11*y_gmv1(k-1) +s21*y_gmv1(k-2)...
% -t01*yr(k) -t11*yr(k-1) -t21*yr(k-2)...
% +r01*du_gmv1(k) +r11*du_gmv1(k-1);

end

% Variâncias
var_y_gmv = var(y_gmv1);
var_phi_gmv = num2str(var(phi2));

var_y_rst = var(y_rst1);
var_phi_rst = num2str(var(phi1));

% "Integral" of Squared Control
u_gmv1 = ((u_gmv1)/NO)*1;
ISU_gmv = num2str((u_gmv1*u_gmv1')*Ts);

u_rst1 = ((u_rst1)/NO)*1;
ISU_rst = num2str((u_rst1*u_rst1')*Ts);

t=0:Ts:nit*Ts-Ts;
figure(1)
subplot(211),
plot(t,yr(1:nit),'k'); grid; hold;
stairs(t, y_rst1,'b', 'linewidth', 1.5)
stairs(t,y_gmv1(1:nit),'r', 'linewidth', 1.5);
title(['{RST \sigma^2_{\phi} = }' num2str(var_phi_rst) ' ' '{GMV
\sigma^2_{\phi} = }' num2str(var_phi_gmv)]);
ylabel('Extensão');
legend('yr(t)', 'y(t) RST1', 'y(t) GMV1');

```

```
subplot(212),
    stairs(t,u_rst1(1:nit),'b', 'linewidth', 1.5); grid; hold;
    stairs(t,u_gmv1(1:nit),'r', 'linewidth', 1.5);
    title(['ISU_R_S_T_1 = ' ISU_rst ' ' 'ISU_G_M_V_1 = ' ISU_gmv ]);
    xlabel('Tempo (s)');
    ylabel('Comando de Válvula');
    legend('u(t) RST1', 'u(t) GMV1');
```