

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Giovane Gonçalves Pereira

**CONTROLE DE VELOCIDADE DE TURBINAS HIDRÁULICAS:
ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS**

Florianópolis

2020

Giovane Gonçalves Pereira

**CONTROLE DE VELOCIDADE DE TURBINAS HIDRÁULICAS:
ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Mauricio V. Ferreira da Luz, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gonçalves Pereira, Giovane
CONTROLE DE VELOCIDADE DE TURBINAS HIDRÁULICAS: :
ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS / Giovane Gonçalves Pereira ;
orientador, . Mauricio Valencia Ferreira da Luz, 2020.
91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Regulador de velocidade. 3.
Turbina Bulbo. 4. Sistema de Regulação de Velocidade. 5.
Comissionamento. I. Valencia Ferreira da Luz, . Mauricio .
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Giovane Gonçalves Pereira

Controle de Velocidade de uma Turbina Hidráulica: Aspectos Teóricos e Práticos

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 22 de dezembro de 2020.



Documento assinado digitalmente

Jean Vianeí Leite

Data: 23/12/2020 08:47:25-0300

CPF: 003.474.909-80

Prof. Jean Vianeí Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Mauricio Valencia Ferreira da Luz

Data: 22/12/2020 22:53:26-0300

CPF: 960.926.969-91

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Walter Pereira Carpes Júnior

Data: 22/12/2020 21:15:24-0300

CPF: 572.566.599-20

Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Cristhian Marcelo Becker Cares

Data: 22/12/2020 19:29:25-0300

CPF: 013.010.419-12

Prof. Cristhian Marcelo Becker Cares, MSc.
Universidad de Santiago de Chile

Este trabalho é dedicado à minha mãe, ao meu filho e a minha esposa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a REIVAX, pela oportunidade de fazer parte de uma grande equipe, pelo material cedido para as pesquisas, aos meus colegas de trabalho pela intensa troca de experiências.

Ao Prof. Mauricio V. Ferreira da Luz pelo suporte que me foi oferecido na condução deste trabalho.

Agradeço, em especial, a minha esposa Élen Torres que sempre esteve do meu lado me apoiando, me dando força nos momentos mais difíceis. Creio que sem ela nada disso seria possível.

RESUMO

O foco deste trabalho é apresentar os principais componentes que fazem parte de um sistema de controle de velocidade de uma turbina hidráulica, os diversos ensaios realizados com o regulador de velocidade e os seus periféricos principalmente na etapa de comissionamento em usinas hidrelétricas, quando os equipamentos são liberados para serem operados. O principal objetivo do trabalho é realizar uma análise teórica dos ensaios realizados. Além disso, o trabalho apresenta resultados dos ensaios estáticos, dos ensaios dinâmicos a vazio, e dos ensaios com carga de um regulador digital de velocidade para unidade hidráulica. Esses resultados englobam, inclusive, os ensaios que não são obrigatórios por normas, mas que, entretanto, são realizados, frequentemente, a pedido dos clientes. Após essa etapa, apresentam-se os resultados obtidos durante um comissionamento de um regulador de velocidade para uma turbina do tipo bulbo. E, por fim, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados e que com os ensaios realizados foi possível testar vários quesitos dos reguladores e garantir a segurança, a conformidade e a funcionalidade dos equipamentos.

Palavras-chave: Reguladores de velocidade. Ensaios de comissionamento. Unidade hidráulica. Turbina bulbo.

ABSTRACT

The focus of this work is to present the main components that are part of a speed control system of a hydraulic turbine, the various tests performed with the speed regulator and its peripherals mainly in the commissioning stage in hydroelectric plants, when the equipment is released to be operated. The main objective of the work is to carry out a theoretical analysis of the tests performed. In addition, the work presents results of static tests, no-load dynamic tests and load tests of a digital speed regulator for hydraulic unit. These results include tests that are not required by standards, but, however, are often performed at the request of customers. After this step, the results obtained during commissioning of a speed regulator for a bulb turbine are presented. And, finally, it was concluded that the objectives of the work were achieved and that with the tests carried out it was possible to test various aspects of the regulators and guarantee the safety, compliance and functionality of the equipment.

Keywords: Speed regulators. Commissioning tests. Hydraulic unit. Bulb turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Turbina do Tipo Francis	20
Figura 2: Turbina do Tipo Pelton.....	21
Figura 3: Turbina do Tipo Kaplan	22
Figura 4: Turbina do Tipo Bulbo	22
Figura 5: Aplicação turbinas Queda versus Vazão	23
Figura 6: Unidade Hidráulica.....	25
Figura 7: Válvula Proporcional.....	26
Figura 8: Válvula Distribuidora	26
Figura 9: Atuador Hidráulico.....	27
Figura 10: Conjunto roda dentada – pick-up’s.....	27
Figura 11: Transformador de potencial TP’s	28
Figura 12: Transformador de corrente TC’s	28
Figura 13: Sistema de Regulação de Velocidade.....	29
Figura 14: Regulador de Velocidade Isócrono.....	30
Figura 15: Resposta do RV Isócrono a variação da carga	31
Figura 16: Efeito coluna d’água.....	32
Figura 17: Regulador de Velocidade com Estatismo Permanente	32
Figura 18: Característica de queda de velocidade.....	32
Figura 19: RV com realimentação permanente e transitória.....	33
Figura 20: Regulador de Velocidade PID.....	34
Figura 21: Regulador de Velocidade PID realizado com estatismo temporário e bloco acelerométrico.....	34
Figura 22: Diagrama de blocos da saída de controle	38
Figura 23: Abertura e fechamento dos atuadores.....	39
Figura 24: Diagrama de blocos da malha de controle.....	40
Figura 25: Controlador inserido em malha fechada.....	40
Figura 26: PID Clássico.....	41
Figura 27: Resposta ao degrau com variação do Kp	42
Figura 28: Resposta ao degrau com Kp fixo e variação do Ki	43
Figura 29: Controlador derivativo na realimentação do sistema.....	44
Figura 30: Controlador de posição dos atuadores.....	45
Figura 31: Sobressinal (overshoot)	46
Figura 32: Partida gradual.....	48
Figura 33: Partida automática	49
Figura 34: Malha de Velocidade.....	50
Figura 35: Primeiro sincronismo	52
Figura 36: Rejeição de carga 100% de Potência.....	53
Figura 37: Levantamento da curva abertura - potência.....	54
Figura 38: Tomada de carga	54
Figura 39: Malha de Potência	55
Figura 40: Abertura e Fechamento do Distribuidor	58
Figura 41: Abertura e fechamento das pás.....	59
Figura 42: Dinâmica da válvula distribuidora do distribuidor	60
Figura 43: Dinâmica da válvula distribuidora do Kaplan.	61
Figura 44: Dinâmica do distribuidor: degrau 5%.....	62
Figura 45: Dinâmica do Kaplan: degrau 5%.....	63
Figura 46: Regime do Distribuidor	64
Figura 47: Regime do Kaplan.	65
Figura 48: Partida automática.	66
Figura 49: Parada automática.....	66
Figura 50: Ajuste da malha de velocidade.	67

Figura 51: Ajuste da malha de velocidade: Comutação Pick-Up's – TP.	68
Figura 52: Ajuste da malha de velocidade: Comutação TP – Pick-Up's.	69
Figura 53: Estabilidade em regime permanente Pick-up's.....	70
Figura 54: Estabilidade em regime permanente TP.	71
Figura 55: Comutação de canal a vazio.	72
Figura 56: Comutação entre o modo normal e manutenção.....	73
Figura 57: Atuação da sobre velocidade elétrico.	74
Figura 58: Atuação sobre velocidade mecânico.....	74
Figura 59: Sincronismo Automático: Controle de Potência.....	75
Figura 60: Rejeição de carga com 25% de potência.	76
Figura 61: Rejeição de carga com 50% de potência.	77
Figura 62: Rejeição de carga com 75% de potência.	78
Figura 63: Rejeição de carga com 100% de potência.	79
Figura 64: Ajuste da dinâmica do controle de Potência.....	80
Figura 65: Ajuste da dinâmica do controle de Abertura.	81
Figura 66: Tomada e Retirada de carga em controle de Potência.....	82
Figura 67: Comutação do modo de controle Potência – Abertura.	82
Figura 68: Comutação de canal em Carga.	83
Figura 69: Estabilidade em regime permanente Controle de abertura.	84
Figura 70: Estabilidade em regime permanente Controle de Potência.	85
Figura 71: Atuação 86EH.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ajustes de transdução da Válvula Distribuidora.....	37
Tabela 2: Ajustes de transdução dos atuadores.....	37
Tabela 3: Tempos e taxas máximas de abertura e fechamento dos atuadores	39
Tabela 4: Características da unidade geradora.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIN – Sistema Interligado

UHE – Usinas Hidrelétricas

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

CGH – Centrais Geradoras Hidrelétricas

RV – Regulador de Velocidade

UH – Unidade Hidráulica

PUH – Painel de Unidade Hidráulica

MS – Máquina Síncrona

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PID – Proporcional Integral e Derivativo

PI – Proporcional Integral

PD – Proporcional Derivativo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	USINA HIDROELÉTRICA.....	17
2.1.	TIPOS DE USINAS.....	17
2.1.1.	CLASSIFICAÇÃO.....	17
2.2.	ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	18
3.	TURBINAS HIDRÁULICAS.....	20
3.1.	CLASSIFICAÇÃO.....	20
3.2.	TIPOS DE TURBINA.....	20
3.2.1.	TURBINA TIPO FRANCIS.....	20
3.2.2.	TURBINA DO TIPO PELTON.....	21
3.2.3.	TURBINA DO TIPO KAPLAN.....	22
3.2.4.	TURBINA DO TIPO BULBO.....	22
3.3.	APLICAÇÃO EM FUNÇÃO DA QUEDA.....	23
4.	USINA HIDROELÉTRICA DE JIRAU.....	24
5.	SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE.....	25
5.1.	UNIDADE HIDRÁULICA.....	25
5.2.	VÁLVULA PROPORCIONAL.....	26
5.3.	VÁLVULA DISTRIBUIDORA.....	26
5.4.	ATUADOR HIDRÁULICO.....	27
5.5.	SENSOR DE VELOCIDADE – PICK-UP’S.....	27
5.6.	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL - TP.....	28
5.7.	TRANSFORMADOR DE CORRENTE - TC.....	28
6.	REGULADOR DE VELOCIDADE.....	29
6.1.	REGULADOR DE VELOCIDADE ISÓCRONO.....	30
6.2.	REGULADOR DE VELOCIDADE COM ESTATISMO PERMANENTE.....	31
6.3.	REGULADOR DE VELOCIDADE COM ESTATISMO TRANSITÓRIO.....	33
6.4.	REGULADOR DE VELOCIDADE PID.....	33
7.	COMISSONAMENTO.....	36
8.	ENSAIOS ESTÁTICOS.....	37
8.1.	MOVIMENTAÇÃO DOS ATUADORES.....	37
8.2.	AJUSTE DAS TRANSDUÇÕES.....	37
8.3.	AJUSTE DA SAÍDA DE CONTROLE.....	38
8.4.	ABERTURA E FECHAMENTO DOS ATUADORES EM TAXA MÁXIMA.....	38
8.5.	AJUSTES DOS CONTROLADORES DE POSIÇÃO.....	40
8.5.1.	AJUSTE DA MALHA DE CONTROLE DA VÁLVULA DISTRIBUIDORA.....	45
•	Ajuste do ganho proporcional Kp	45

•	Ajuste do ganho integral Ki	45
•	Ajuste dos limitadores do integrador: L_s e L_i	46
•	Ajuste do bloco de avanço-atraso: T_1 e T_2	46
8.5.2.	Ajuste da malha de controle do distribuidor	46
9.	ENSAIOS DINÂMICOS A VAZIO	47
9.1.	AJUSTE TRANSDUÇÃO	47
9.2.	PARTIDA GRADUAL 0 A 100%.....	47
9.3.	PARTIDA AUTOMÁTICA.....	49
9.4.	AJUSTE DA MALHA DE VELOCIDADE	50
•	Ajuste bt : Ganho Proporcional.....	50
•	Ajuste Td : Ganho Integral	50
•	Ajuste Tn : Acelerômetro	50
10.	ENSAIOS EM CARGA	52
10.1.	PRIMEIRO SINCRONISMO	52
10.2.	AJUSTE DA TRANSDUÇÃO DE POTÊNCIA	52
10.3.	REJEIÇÕES DE CARGA.....	53
10.4.	CURVA ABERTURA – POTÊNCIA.....	53
10.5.	RAMPAS DE POTÊNCIA	54
10.6.	AJUSTES DA MALHA DE POTÊNCIA.....	55
10.7.	ISOLAÇÃO SIMULADA.....	55
•	Ajuste bt : Ganho Proporcional.....	56
•	Ajuste Td : Ganho Integral	56
•	Ajuste Tn : Acelerômetro	56
11.	RESULTADOS PRÁTICOS.....	57
11.1.	ENSAIOS ESTÁTICOS	58
•	Abertura e fechamento dos atuadores	58
•	Ajustes da dinâmica das válvulas distribuidoras	60
•	Ajustes da dinâmica dos atuadores.....	62
•	Regime dos atuadores.....	64
11.2.	ENSAIOS DINÂMICOS À VAZIO	66
•	Partida e parada automáticas	66
•	Ajuste da malha de velocidade.....	67
•	Comutação Pick-Up's – TP.....	68
•	Comutação TP – Pick-Up's.....	69
•	Controle de velocidade em regime permanente	70

•	Comutação de canal	72
•	Comutação entre o modo normal e manutenção	73
•	Sobre velocidade elétrico	74
•	Sobre velocidade mecânico	74
11.3.	ENSAIOS DINÂMICOS EM CARGA	75
•	Sincronismo automático em controle de Potência	75
•	Rejeições de carga	76
•	Dinâmica controle de Potência.....	80
•	Tomada e Retirada de carga	82
•	Comutação do modo de controle.....	82
•	Comutação de Canal em Carga	83
•	Estabilidade em regime permanente.....	84
•	Atuação 86E/H	86
12.	CONCLUSÃO	87
13.	BIBLIOGRAFIA.....	88
14.	ANEXO A – SUBMÓDULO 3.6 do ONS: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.	91

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro é composto por diversas fontes de geração de energia, entre elas a mais popular e ainda responsável pela maior parte da energia consumida no país é a geração de energia hidrelétrica.

A frequência do Sistema Interligado Nacional (SIN) na grande parte é ditada pela velocidade de rotação das máquinas síncronas as quais são acionadas (movimentadas) pelas máquinas motrizes (as turbinas) que convertem a energia potencial/cinética em torque mecânico ao eixo na máquina síncrona.

Para manter o sistema estável com frequência constante é necessário que toda potência gerada seja consumida, isto é, o sistema esteja em equilíbrio.

Para manter esse equilíbrio e a frequência desejada faz-se o uso de reguladores de velocidade e potência. Tal equipamento controla através da abertura e fechamento de atuadores mecânicos – hidráulicos (distribuidor, injetores e roda Kaplan) a vazão/pressão de água que passa pela turbina.

A abertura e o fechamento dos atuadores são realizados através do movimento da válvula proporcional, que controla a vazão e a pressão do óleo hidráulico nas câmaras possibilitando a movimentação dos mesmos.

E, finalmente, o controle dessas válvulas é feito através do regulador de velocidade, que com sinais de ordem pequena e realimentação da grandeza que será controlada (malha fechada) consegue de forma precisa fazer o controle da velocidade e da potência de uma máquina síncrona.

É inegável a importância do regulador de velocidade para o SIN. Por isso, o foco desse trabalho é apresentar os principais componentes que fazem parte de um sistema de controle de velocidade de uma turbina hidráulica, os diversos ensaios realizados com o regulador de velocidade e os seus periféricos principalmente na etapa de comissionamento em usinas hidrelétricas, quando os equipamentos são liberados para serem operados.

Este trabalho é dividido em capítulos, sendo este primeiro capítulo a introdução. Em seguida, os capítulos apresentam revisões sucintas sobre usinas hidroelétricas, turbinas hidráulicas, a usina hidroelétrica de Jirau, o sistema de regulação de velocidade, o regulador de velocidade, o conceito de comissionamento, os ensaios estáticos, os ensaios dinâmicos a vazio, os ensaios em carga, e os resultados. Por fim, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. USINA HIDROELÉTRICA

As usinas hidroelétricas são grandes obras que visam aproveitar desníveis de rios para a geração de energia. No Brasil, pouco mais de 90% da energia gerada provém de usinas hidroelétricas.

O maior potencial hidrográfico encontra-se instalado na bacia do Paraná, onde encontram-se os rios Paranapanema, Iguaçu e Tietê.

Uma das maiores hidroelétricas do mundo, a Itaipu, com capacidade de geração de 14.000 MW de potência, perde apenas para a Usina de Três Gargantas, na China, com capacidade de 22.000 MW de potência (a maior do mundo).

No Brasil, além de Itaipu ganham destaque as usinas de Tucuruí, no Rio Tocantins, que após sua modernização chegou à marca de 8.370 MW de potência instalada, e de Belo Monte, no Rio Xingu, que será a segunda maior após a operação total com capacidade de 11.000 MW.

Nesse cenário de grandes usinas hidroelétricas ganham destaque as PCH's (pequenas centrais hidroelétricas) e as CGH's (Centrais Geradoras Hidrelétricas) que em muitos casos não têm grandes reservatórios, pois operam a fio d'água e já compõem uma parcela significativa dentro da geração hidrelétrica.

2.1. TIPOS DE USINAS

2.1.1. CLASSIFICAÇÃO

- Quanto a queda:
 - ✓ **Baixa:** Quedas de até 50 m.
 - ✓ **Média:** Quedas entre 50 e 250 m.
 - ✓ **Alta:** Quedas acima de 250 m.

- Quanto a potência:
 - ✓ **Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH's):** São usinas com capacidade instalada menor ou igual a 1 MW.
 - ✓ **Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH's):** São usinas com capacidade instalada entre 1 MW e 30 MW, com área de reservatório inferior a 3 km².
 - ✓ **Usinas Hidroelétricas (UHE's):** São usinas com capacidade instalada maior que 30 MW.

- Tipo de reservatório:
 - ✓ **Com acumulação ou armazenamento:** É o tipo mais comum, utiliza uma barragem para armazenar água em reservatórios possibilitando a geração até mesmo em períodos de maior estiagem.
 - ✓ **Reversíveis:** São usinas que possuem turbinas/ bombas e normalmente possuem reservatórios a montante e outro de menores dimensões a jusante da casa de força. Geralmente a água é bombeada para o reservatório a montante nos períodos de baixo consumo com o intuito de armazenar água para posterior geração, normalmente em períodos de alto consumo.
 - ✓ **Fio d'água:** Usinas hidroelétricas a fio d'água são aquelas que não dispõem de um reservatório ou lago, ou tem, mas em dimensões menores. Ou seja, são usinas

que não tem estoque de água para períodos de estiagem, interrompendo a geração nessas épocas.

2.2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

- **Reservatório, lago:** É onde fica armazenada toda água proveniente de um excesso hídrico e ou desvio do rio para que a água acumulada seja utilizada até mesmo em períodos de seca. As PCHs geralmente são a fio d'água, tendo como consequência a concepção da barragem simplificada, dispensando, na maioria das vezes, o uso de comportas e um reservatório de dimensões menores.
- **Barragem:** Estrutura construída com o objetivo de reter a água para fins de geração, cria artificialmente um desnível local.
- **Vertedouro:** Estrutura construída com objetivo de permitir escoar o excesso de água acumulada no reservatório em casos de cheia, controlando assim o nível do reservatório.
- **Tomada d'água:** Estrutura destinada a captar a água para o conduto forçado ou túnel de adução.
- **Comporta, Válvula de Adução (PCH's):** Dispositivos mecânicos que visam interromper vazões hidráulicas em qualquer conduto livre ou forçado de cuja estrutura o conduto independe para sua continuidade física e operacional, as comportas e válvulas de adução não fazem o controle de vazão na turbina.
- **Túnel de Adução (PCH's):** São estruturas responsáveis por conduzir a água até o conduto forçado em arranjos de derivação, bastante comum em PCH's.
- **Chaminé de Equilíbrio (PCH's):** Tem a finalidade de estabilizar e amortecer as variações de pressão resultantes de variação parcial ou total da vazão turbinada nas situações de partida, variações de carga ou rejeição de carga da unidade geradora.
- **Conduto Forçado:** Liga a tomada d'água à casa de força funcionando sob pressão.
- **Casa de Força:** Abriga os equipamentos elétricos e mecânicos. O arranjo típico da casa de força é condicionado pelo tipo da turbina e do gerador.
- **Turbina:** São usados dois tipos de turbinas, as de reação e as de ação. Na turbina de reação 'o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética e de pressão da água, em escoamento através das partes girantes' e as de ação transformam somente a energia cinética da água.
- **Gerador:** O gerador converte a energia mecânica produzida pela turbina em energia elétrica, sendo composto da parte fixa, o estator, e da parte rotativa, o rotor. O estator deve ser ancorado no concreto da casa de força, para poder resistir ao momento de torção.

- **Canal Fuga:** Localizado à jusante do tubo de sucção, entre a casa de força e o rio, é o canal através do qual a vazão turbinada retorna para o rio.
- **Subestação Elevadora:** Nas centrais hidrelétricas, as subestações elevadoras cumprem a importante função de ligar o gerador, através de seu transformador elevador ao sistema de transmissão. Este objetivo é alcançado pela conveniente comutação ou manobra de disjuntores e chaves seccionadoras, acoplando e desacoplando o gerador a barramentos e ou transformadores.
- **Equipamentos auxiliares:** Também desempenham funções importantes no processo de geração como por exemplo pontes rolantes ou guindastes pórticos que servem como meio de transporte; montagem e desmontagem dos equipamentos e até mesmo içamento de comportas; o sistema de abastecimento d'água para refrigeração com uso de filtros grossos que retém partículas flutuantes; para as instalações contra incêndio e para água potável que necessita de tratamento; a rede de drenagem e esgoto; rede de distribuição de ar comprimido, contendo compressores e tomadas distribuídas pela casa de força; instalações para a purificação de óleo dos transformadores e óleo hidráulico, onde em cada uma são instaladas bombas estacionárias e móveis; purificadores e tanques de óleo sujo e limpo; ventilação e ar condicionado, pois os geradores têm temperaturas elevadas mesmo depois de refrigerados e irradiam calor.

3. TURBINAS HIDRÁULICAS

Turbinas hidráulicas são equipamentos projetados para converter energia hidráulica (fluxo de água, energia cinética) em energia mecânica (velocidade de rotação e torque). Essa energia mecânica é usada para movimentar os geradores (conversores de energia de rotação em energia elétrica).

3.1. CLASSIFICAÇÃO

- Turbinas de ação ou impulso: Normalmente são usadas em quedas muito grandes onde a pressão na tubulação cai até a pressão atmosférica logo que a água sai do dispositivo de controle. Na saída do dispositivo de controle, a energia cinética aumenta e logo se choca com as pás da turbina, perdendo assim, intensidade e movimentando a turbina. Como exemplo de turbina de impulso é a roda Pelton.
- Turbinas de reação: A energia de pressão cai desde a entrada do distribuidor até a saída do receptor, aumentando no difusor. O difusor é essencial nesses tipos de turbinas, são classificadas em dois tipos: de escoamento radial ou misto, e de escoamento axial. Como exemplos de escoamentos radiais são as turbinas Francis, para escoamentos axiais, as turbinas Kaplan e Bulbo são bons exemplos.

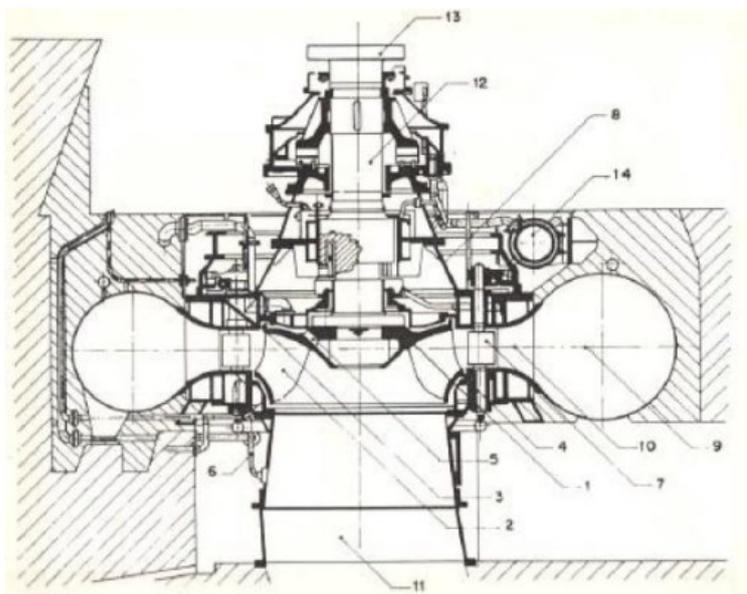
3.2. TIPOS DE TURBINA

3.2.1. TURBINA TIPO FRANCIS

As turbinas do tipo Francis, mostradas na Figura 1, são máquinas projetadas com rotor simples para eixo vertical ou horizontal.

Este modelo de turbina é o que permite sua instalação em maior faixa de aplicação relacionado à queda/vazão. Elas são adequadas para operar entre quedas de 10 m até 600 m e vazões elevadas.

Figura 1: Turbina do Tipo Francis.



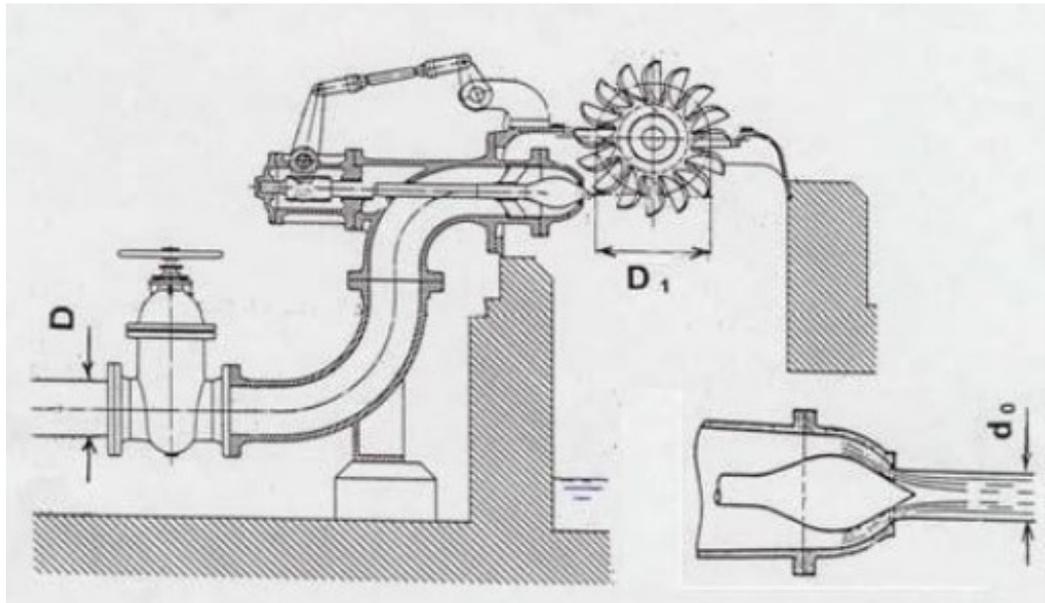
Fonte: Souza (1983, p. 134).

3.2.2. TURBINA DO TIPO PELTON

As turbinas do tipo Pelton, mostrada na Figura 2, com diâmetro D , caracterizam-se por um rotor com pás em formato de conchas e por uma tubulação de adução que alimenta um ou mais injetores.

A posição do eixo pode ser vertical ou horizontal. Este tipo de turbina é projetado para operar em altas quedas e baixas vazões, entre 200 m até 1.100 m. É mais comum em países de topografia montanhosa, nas quais oferece quedas altas.

Figura 2: Turbina do Tipo Pelton.

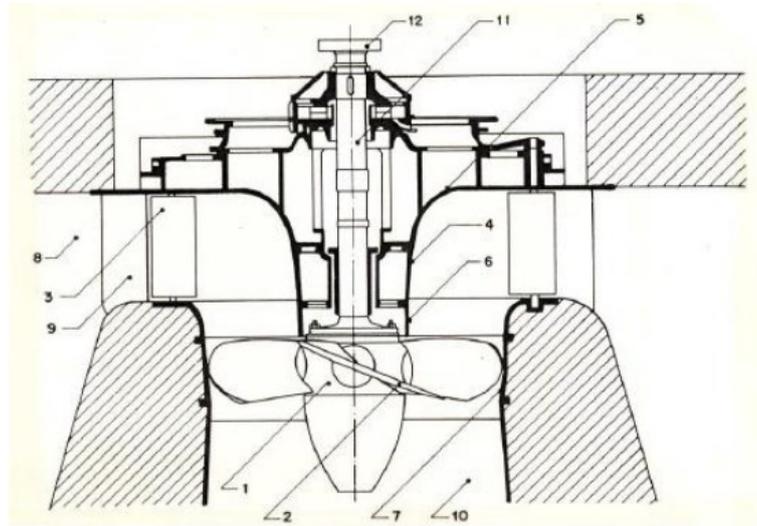


Fonte: Eletrobrás (2000).

3.2.3. TURBINA DO TIPO KAPLAN

A Figura 3, apresenta um exemplo da turbina tipo Kaplan. São máquinas de eixo vertical ou horizontal projetadas com rotor Kaplan que possui pás móveis, permitindo sua regulação conjugada com a vazão do distribuidor. Este tipo de turbina opera em uma ampla faixa de vazões, alcançando melhor performance na curva de rendimento com cargas parciais. Indicadas para operar em baixas quedas, até 60 m, e rotações específicas acima de 350 m.

Figura 3: Turbina do Tipo Kaplan.

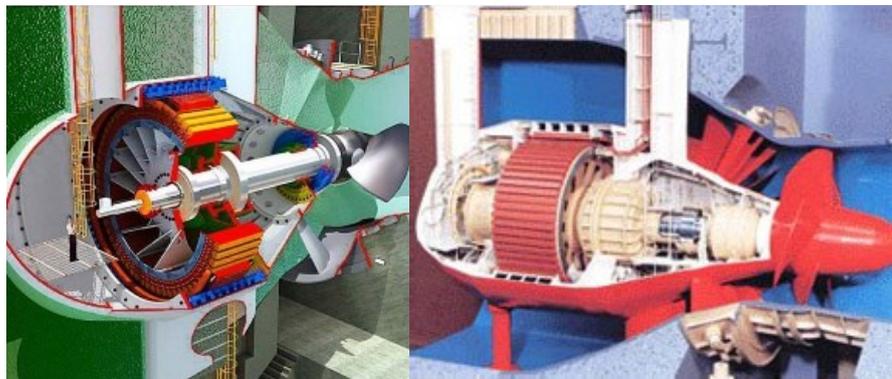


Fonte: Souza (1983, p. 135).

3.2.4. TURBINA DO TIPO BULBO

As turbinas do tipo Bulbo, representada na Figura 4, apresentam-se como uma solução compacta da turbina Kaplan, podendo ser utilizada para pequenas quedas. O rotor possui pás orientáveis, e o gerador montado na mesma linha da turbina na posição horizontal e envolto por um bulbo que o protege do fluxo normal da água, permite a geração de energia em pequenas quedas (fio d'água), com médias e grandes vazões e queda abaixo de 20 m.

Figura 4: Turbina do Tipo Bulbo

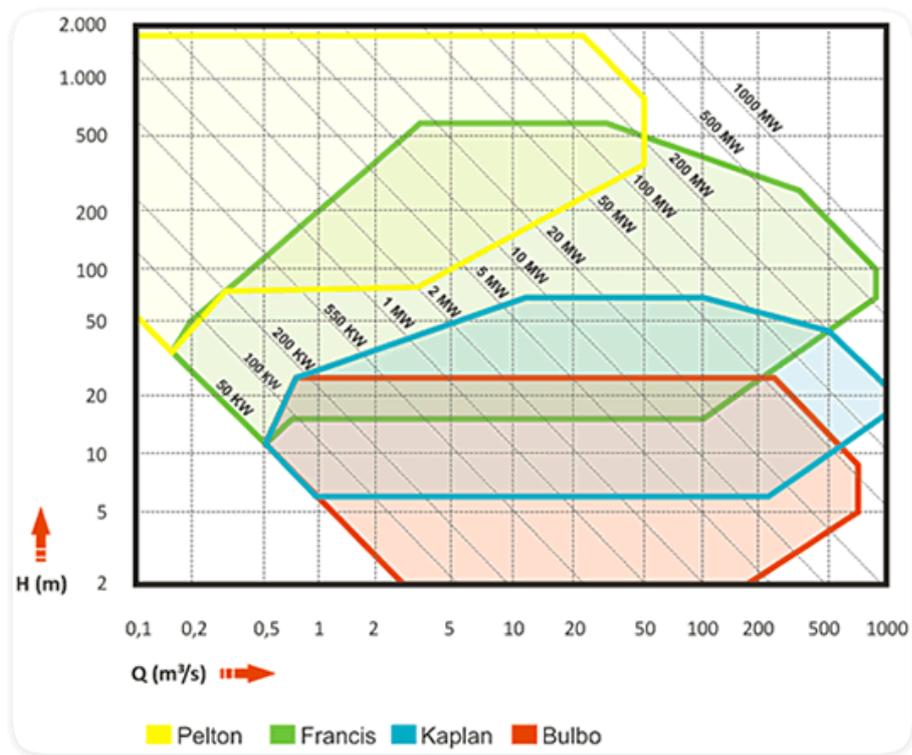


Fonte: Hacker.

3.3. APLICAÇÃO EM FUNÇÃO DA QUEDA

A Figura 5 apresenta as diversas faixas de operação das turbinas em função da queda H medida em metros e vazão Q medida em m³/s.

Figura 5: Aplicação turbinas Queda versus Vazão.



Fonte: Hacker.

4. USINA HIDROELÉTRICA DE JIRAU

A UHE Jirau foi implantada no local denominado Ilha do Padre, a 120 quilômetros medidos ao longo do Rio Madeira da cidade de Porto Velho, capital do estado de Rondônia. A Usina tem capacidade instalada de 3.750 MW. A energia gerada é suficiente para atender ao consumo de mais de 40 milhões de pessoas, o que representa 3,7% de toda a energia hidrelétrica gerada no Brasil, consolidando-se como a 4ª maior usina do país, incluindo Itaipu.

O projeto caracteriza-se pela disposição de duas casas de força. A primeira com 28 unidades geradoras, do tipo bulbo, acoplada à tomada d'água, localizada no braço direito do Rio Madeira. Na margem esquerda, localizam-se mais 22 unidades geradoras, também do tipo bulbo, tendo como vértice a extremidade sul da Ilha do Padre. Cada uma das casas de força apresenta duas áreas equipadas para montagem e manutenção das 50 unidades geradoras, com 75 MW de potência unitária (as turbinas do tipo bulbo mais potentes do mundo). Com investimento em tecnologia, foi possível alcançar 98,94% de disponibilidade acumulada. Isso significa maior capacidade para transformar a força do Rio Madeira em energia elétrica. O desempenho é superior ao previsto no edital de concessão da Aneel, que é de 93%. A barragem principal, do tipo enrocamento com núcleo asfáltico, está disposta segundo um eixo retilíneo ligando a extremidade sul da Ilha do Padre à parede direita da Casa de Força da Margem Esquerda.

A UHE Jirau opera com nível d'água entre as cotas 82,5 m e 90,0 m. A área do reservatório é variável, com 361,6 Km² em seu nível d'água máximo normal e área inundada entre 21 Km² e 207,7 Km². Sua garantia física é de 2.212,6 MW médios e está fornecendo energia para o Sistema Interligado Nacional (SIN) desde o dia 06 de setembro de 2013, quando a primeira unidade geradora entrou em operação comercial. A finalização da entrada em operação comercial das 50 unidades geradoras foi dia 16 de dezembro de 2016.

5. SISTEMA DE REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

A frequência do SIN é regulada através do ajuste da velocidade do eixo dos geradores, onde a frequência tem uma dependência direta da velocidade do conjunto turbina /gerador. Para que seja obtida a frequência de 60 Hz do sistema, as máquinas síncronas (geradores) devem estar girando em sua velocidade nominal (velocidade síncrona), o que varia de projeto para projeto. Além do controle de frequência, no caso do gerador a vazio (sem carga), o sistema de regulação faz o controle da potência convertida e fornecida ao sistema (em carga). Para fazer estes controles, utilizam-se reguladores automáticos de velocidade (RV's). O princípio de funcionamento é aumentar a vazão ou mudar a direção do fluxo hidráulico na turbina quando a carga elétrica aumenta, pois desta forma existe mais energia mecânica sendo fornecida ao eixo do gerador para compensar o aumento da potência elétrica requisitada. No caso inverso, a potência mecânica fornecida ao eixo é reduzida quando a carga elétrica diminui, evitando o disparo do grupo gerador. Para que o controle de Frequência/ Potência seja feito com precisão e segurança, alguns equipamentos são utilizados em conjunto, como o regulador automático de velocidade.

5.1. UNIDADE HIDRÁULICA

É um conjunto de equipamentos responsáveis pela pressurização do sistema de acionamento óleo - hidráulico.

Como pode ser observado na Figura 6, a unidade hidráulica é composta por bombas, normalmente bombas de engrenagem, válvulas direcionais, válvulas proporcionais, válvulas distribuidoras, filtros de óleo e instrumentos do tipo termômetros, manômetros, pressostatos, identificadores de umidade no óleo, medidores de nível, acumuladores de ar-óleo e etc.

Figura 6: Unidade Hidráulica.

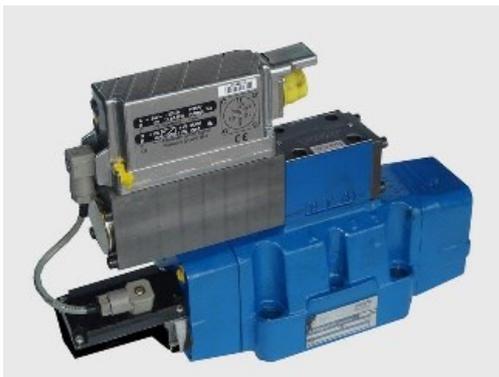


Fonte: Reivax.

5.2. VÁLVULA PROPORCIONAL

A válvula proporcional, mostrada na Figura 7, é responsável por fazer o controle de forma direta ou indireta da abertura e fechamento dos atuadores. É comandada eletricamente por um sinal relativamente pequeno normalmente de 4 – 20 mA proveniente do regulador de velocidade. Seu sinal de repouso normalmente é 12 mA, isto é, nem abre nem fecha o atuador. Se receber um sinal acima de 12 mA, a válvula vai para posição de abertura, sendo que em 20 mA a válvula abre o atuador em máxima velocidade. Já abaixo de 12 mA, a válvula vai para posição de fechamento e em 4 mA ela fecha o atuador em máxima velocidade.

Figura 7: Válvula Proporcional.

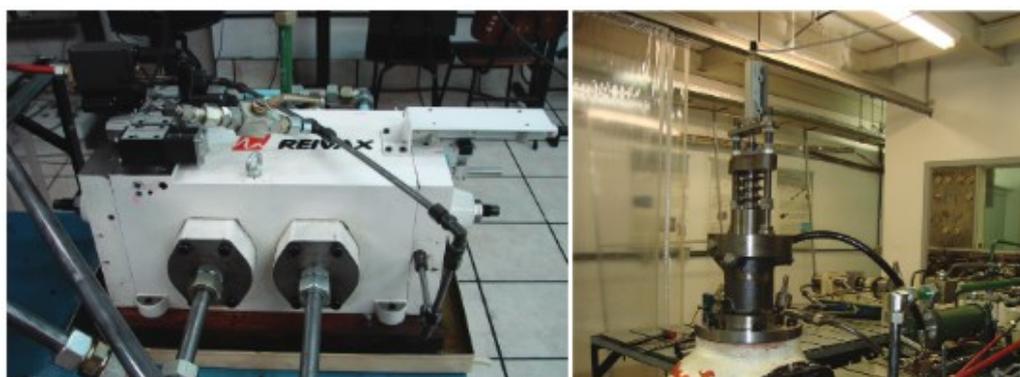


Fonte: Reivax.

5.3. VÁLVULA DISTRIBUIDORA

A válvula distribuidora, mostrada na Figura 8, amplifica a pressão e vazão de óleo para os atuadores hidráulicos. É pilotada hidráulicamente pela válvula proporcional.

Figura 8: Válvula Distribuidora.



Fonte: Reivax.

5.4. ATUADOR HIDRÁULICO

O atuador hidráulico, mostrado na Figura 9, é o dispositivo responsável pela movimentação do anel do distribuidor, bicos injetores e pás.

Figura 9: Atuador Hidráulico.



Fonte: Reivax.

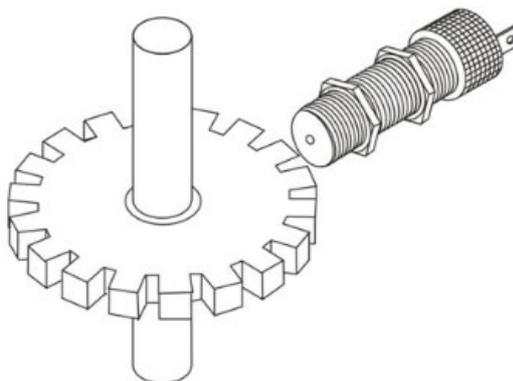
5.5. SENSOR DE VELOCIDADE – PICK-UP'S

A medição de frequência através dos pick-up's é composta por uma roda dentada com um certo número de dentes (depende do porte da turbina) e um sensor do tipo indutivo, como ilustrado na Figura 10, que envia um trem de pulsos diretamente proporcional a velocidade de rotação do eixo.

No capítulo Ensaios Dinâmicos a Vazio será mencionada a equação que calcula a frequência nominal dos pick-up's.

Essa medição de frequência através dos pick-up's é utilizada basicamente na partida da turbina já que o remanente é baixo e impossibilita a medição de frequência via TP's. Uma variação desse conjunto utiliza dois sensores com 90° de defasagem entre si, no intuito de possuir uma redundância e também identificar o sentido de giro do eixo.

Figura 10: Conjunto roda dentada – pick-up's.



Fonte: Reivax.

5.6. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL - TP

Os TP's apresentados na Figura 11 são transformadores de potencial. Rebaixam a tensão terminal do gerador e a tensão da linha para valores compatíveis com os instrumentos de medição. Em reguladores de velocidade, tem como função medir a frequência do gerador e a tensão terminal para cálculo da potência gerada.

Figura 11: Transformador de potencial TP's.



Fonte: Reivax.

5.7. TRANSFORMADOR DE CORRENTE - TC

A Figura 12 apresenta os TC's, transformadores de corrente. Rebaixam a corrente terminal do gerador para valores compatíveis com os instrumentos de medição. Para os reguladores de velocidade são empregados para medição da corrente terminal do gerador para juntamente com a tensão terminal calcular a potência gerada.

Figura 12: Transformador de corrente TC's.



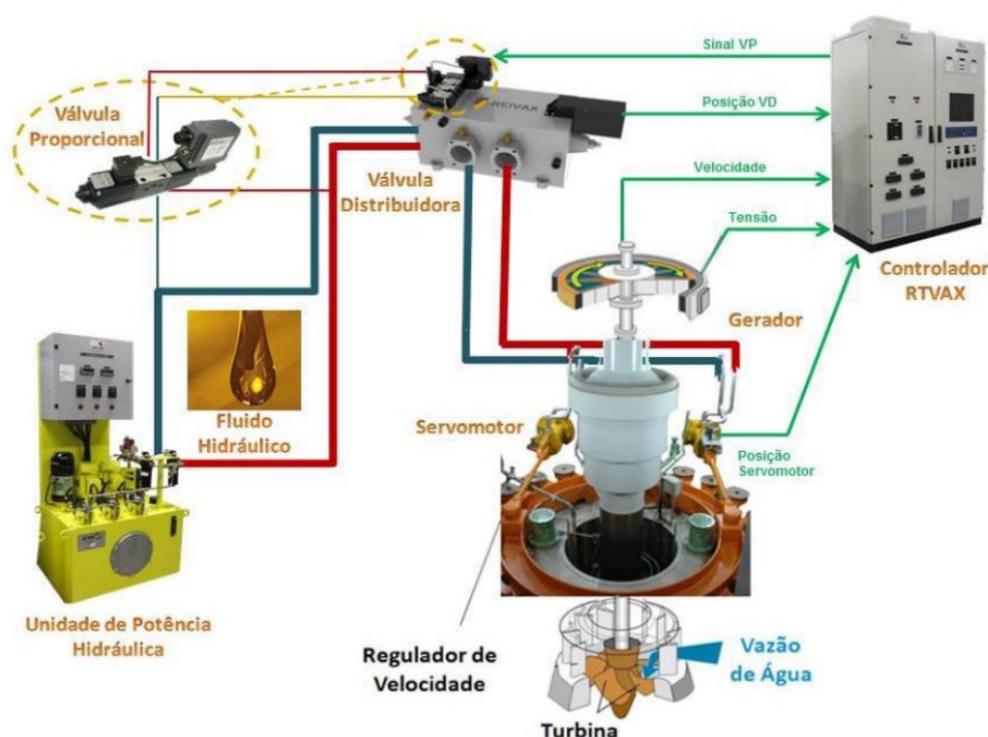
Fonte: Reivax.

6. REGULADOR DE VELOCIDADE

Como já foi mencionado, controle da frequência no sistema de geração é um dos fatores mais importantes para a qualidade da produção de energia elétrica. Tal controle é efetuado pelo Regulador de Velocidade - RV.

A regulação da velocidade é a ação pela qual a grandeza a ser regulada (velocidade) é constantemente medida e comparada com a grandeza de referência e, então, influenciada através de um sistema de controle no sentido de igualá-las. Assim, o RV é a combinação de dispositivos que detectam quaisquer desvios da velocidade da turbina e os converte numa correta vazão de entrada da água. A Figura 13 apresenta um sistema básico de regulação de velocidade e potência de uma turbina hidráulica.

Figura 13: Sistema de Regulação de Velocidade.



Fonte: Reivax.

Além da função básica do controle da velocidade, o RV deve executar as seguintes operações:

- Promover uma partida suave e estável sem apresentar sobre sinal;
- Permitir executar a sincronização da unidade ao sistema no menor tempo possível;
- Fazer o controle de forma estável da potência gerada, mantendo o conjunto turbina/gerador dentro de seus limites de operação;
- Efetuar o fechamento imediato do distribuidor em caso de rejeição brusca de carga, sem comprometer as instalações da usina.

O regulador de velocidade é o responsável por manter o grupo gerador em rotação nominal e constante a fim de que a frequência da tensão gerada nos terminais do gerador seja

mantida em seu valor nominal até o sincronismo da unidade. Para conseguir isso, o regulador de velocidade controla a vazão de água que passará pela turbina hidráulica.

Como a potência gerada é função direta da vazão da turbina, o regulador de velocidade desempenha também papel fundamental no controle da potência ativa quando o grupo gerador está operando em paralelo com a rede (sincronizado).

A seguir os principais tipos de reguladores suas principais características.

6.1. REGULADOR DE VELOCIDADE ISÓCRONO

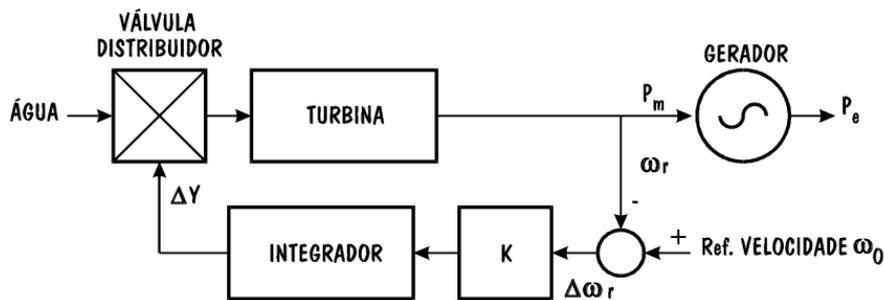
A palavra isócrona, significa velocidade constante.

Assim, o regulador de velocidade isócrona quando operando em regime permanente, tem como característica principal manter a velocidade de rotação constante, ou seja, a frequência do gerador constante é igual a frequência de referência. Porém apresenta péssimas características de estabilidade em regime transitório.

Sua principal aplicação é em sistemas isolados, onde não seja necessário o controle de potência. Suas características o tornam inadequado para aplicações no sistema interligado, podendo acarretar problemas de estabilidade.

A Figura 14 apresenta um modelo de um regulador de velocidade isócrona.

Figura 14: Regulador de Velocidade Isócrona.



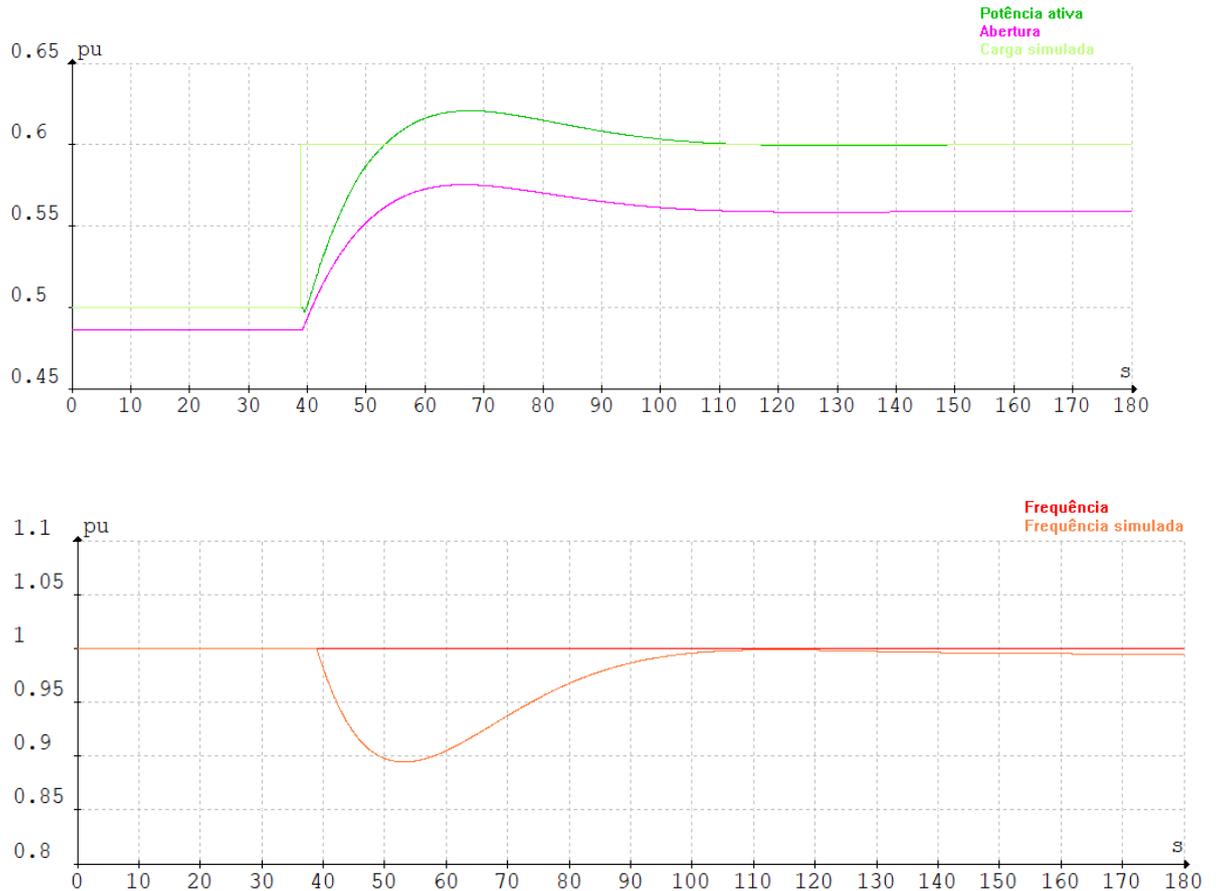
Fonte: Reivax.

Em função do integrador, o sistema só atingirá o regime permanente quando o erro de velocidade for igual a zero, característica dos integradores.

Quando ocorre um acréscimo de carga fornecida pela unidade, ou seja, um aumento no torque mecânico, a frequência tende a diminuir. Tal efeito pode ser visto na Figura 15.

Por ação do regulador de velocidade, há um aumento na abertura do atuador a fim de aumentar a vazão na turbina e fornecer um torque maior ao eixo do gerador, ou seja, haverá um aumento na potência mecânica fornecida ao eixo do gerador que será convertida em potência elétrica pelo gerador para compensar a diminuição da frequência até o reestabelecimento em seu valor de referência. E para um decréscimo de carga acontece exatamente o oposto do que está descrito acima.

Figura 15: Resposta do RV Isócrono a variação da carga.



Fonte: Reivax.

6.2. REGULADOR DE VELOCIDADE COM ESTATISMO PERMANENTE

Estatismo permanente é denominado como a relação percentual entre a variação da velocidade e a variação de potência ativa de uma unidade geradora.

Característica essa que os reguladores de velocidade devem possuir para que haja uma divisão de carga estável entre unidades geradoras que operam em paralelo (sistema interligado).

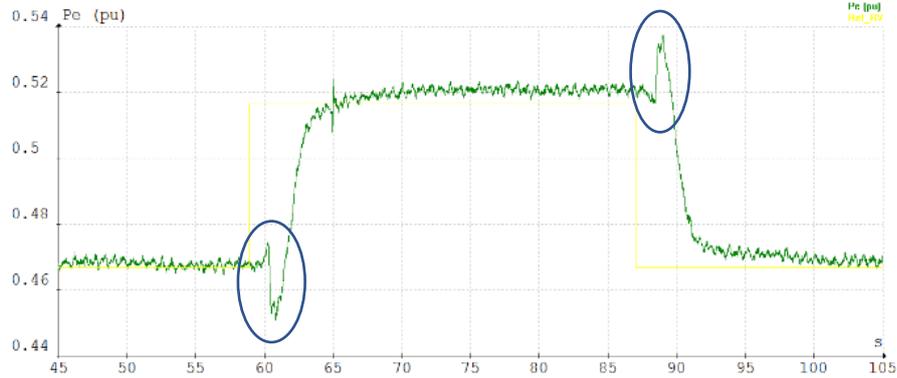
Este tipo de regulador é bem simples pois se resume a um ganho proporcional P onde:

$$P = \frac{1}{e_p} \quad (1)$$

como pode ser visto na Figura 17. Como o valor de ajuste do estatismo é pequeno, não se consegue uma resposta estável uma vez que a cada variação de carga e consequente variação de velocidade o regulador responde de forma intensa provocando um efeito chamado coluna d'água (Figura 16), que atua inicialmente em sentido contrário a variação propriamente dita levando a um comportamento oscilatório (instável) ou com a estabilidade comprometida. Um aumento de e_p melhora a questão da estabilidade, mas causa uma diferença entre a frequência a vazio e aquela a plena carga.

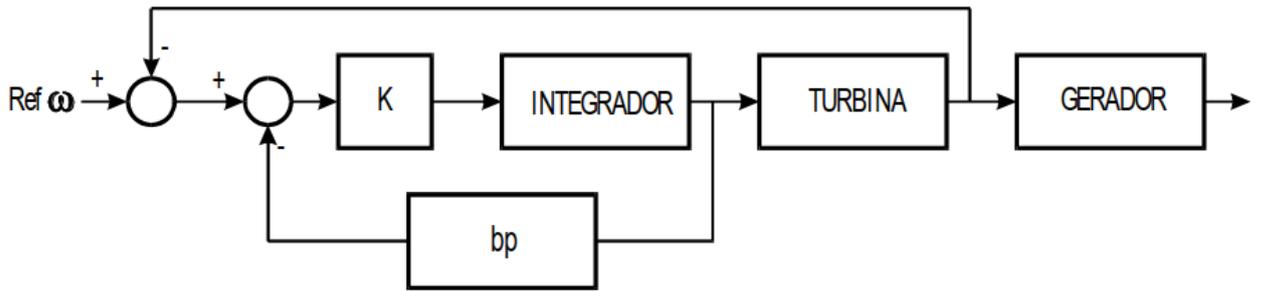
Quanto mais elevado for o estatismo permanente, tanto mais fixas se tornam as condições de operação da unidade geradora.

Figura 16: Efeito coluna d'água.



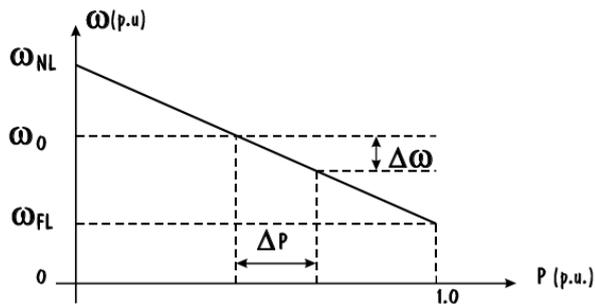
Fonte: Reivax.

Figura 17: Regulador de Velocidade com Estatismo Permanente.



Fonte: Reivax.

Figura 18: Característica de queda de velocidade.



Fonte: Reivax.

Através da Figura 18 define-se que e_p é o valor de Δf necessário para potência variar 100%.

$$(Ref.P_e - P_e) * e_p = \Delta f \tag{2}$$

$$Erro Potência = \Delta P = \frac{\Delta f}{e_p} \tag{3}$$

Para uma variação de 1% na frequência do sistema com $e_p = 5\%$, a unidade geradora terá uma variação de potência $\Delta P = 20\%$.

A escolha do tipo de regulador dependerá invariavelmente do regime de operação previsto para a central hidroelétrica, se irá operar em regime interligado a um grande sistema ou a um sistema isolado. O regulador que é proposto neste presente trabalho detecta de forma automática o ilhamento da central geradora, chaveando o valor do estatismo entre um valor para sistema interligado tipicamente 5% e um valor de estatismo para sistemas isolados tipicamente 1% (valores estes adotados aqui no Brasil).

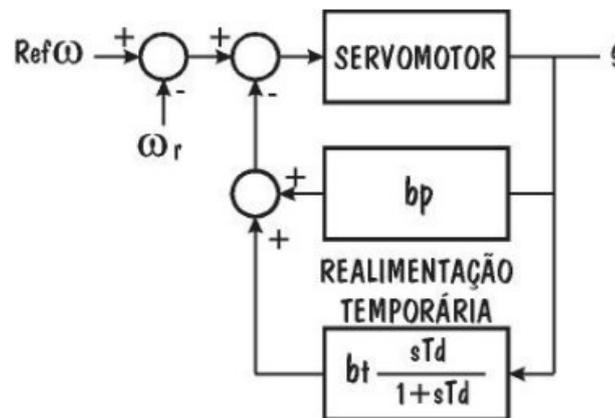
6.3. REGULADOR DE VELOCIDADE COM ESTATISMO TRANSITÓRIO

Para um bom desempenho dinâmico, o regulador de estatismo permanente (Figura 17) dificilmente atenderá os requisitos do sistema. De fato, dependendo das características da máquina e das características da carga, pode-se ter um sistema instável para determinados valores de estatismo permanente.

Para garantir uma operação de forma estável, é introduzido ao regulador de estatismo permanente uma realimentação com uma parcela transitória. Este é o estatismo transitório b_t como mostra a Figura 19.

Um exemplo de aplicação para a componente transitória é o efeito da coluna de água no conduto forçado, que é um efeito transitório e se dá com o movimento do servo atuador, desaparecendo logo em seguida. Para amenizar esse efeito e se obter uma boa estabilização, se insere ao regulador de estatismo permanente uma componente transitória que também desaparece após um determinado tempo proporcional a (T_w).

Figura 19: RV com realimentação permanente e transitória.



Fonte: Reivax.

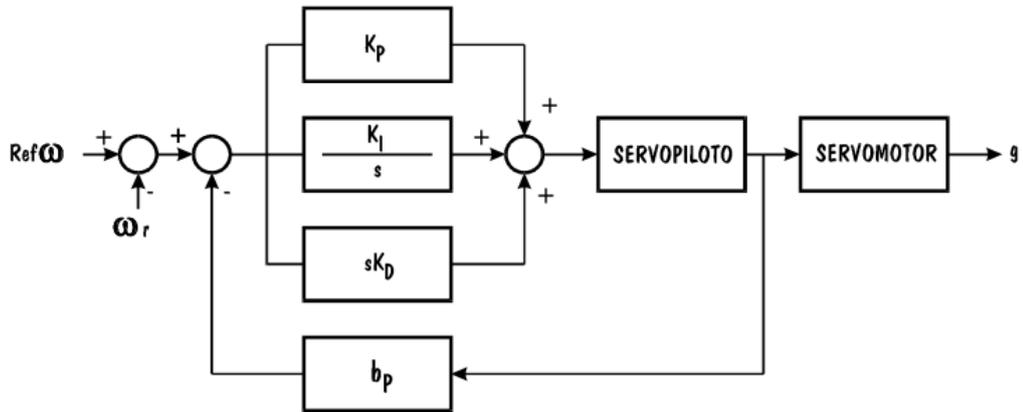
6.4. REGULADOR DE VELOCIDADE PID

Um dos mais populares controladores, o PID (Figura 20) é muito utilizado no controle de diversas variáveis como posição, velocidade entre outras.

Esses controladores possibilitam que se tenha uma resposta rápida e redução de ganho transitório e aumento do ganho em regime permanente (ação transitória e ação estática). A ação derivativa (aumento de ganho transitório) em geral não é usada, pois na maioria das vezes causa oscilações excessivas no sinal de controle e nos primeiros estágios do atuador.

A ação derivativa gera uma parcela do sinal do controle do erro com característica antecipativa, que detecta a aceleração do sinal de frequência.

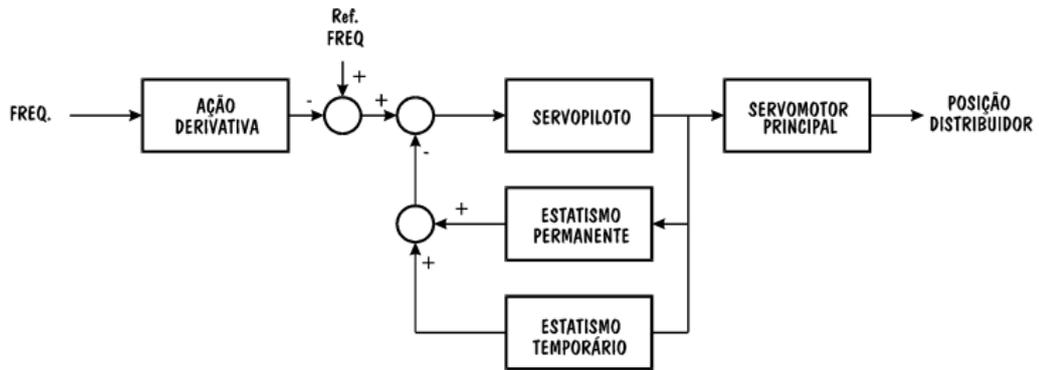
Figura 20: Regulador de Velocidade PID.



Fonte: Reivax.

Com o ganho derivativo igual a zero, o regulador se torna PI. Existem outras formas de realizar um regulador PID ou PI, além da apresentada na Figura 20. Uma das comumente utilizadas é a da Figura 21, que representa um regulador com estatismo temporário.

Figura 21: Regulador de Velocidade PID realizado com estatismo temporário e bloco acelerométrico.



Fonte: Reivax.

Onde os ganhos do regulador PID estão assim relacionados:

$$K_p = \frac{T_d + T_n}{T_d} * \frac{1}{b_t} \quad (4)$$

$$K_i = \frac{1}{b_t * T_d} \quad (5)$$

$$K_d = \frac{T_n}{b_t} \quad (6)$$

b_t → estatismo transitório

T_d → é uma proporção do tempo de reação da água (T_w)

T_n → constante acelerométrica

Com isso, o regulador com estatismo transitório é um regulador proporcional – integral (PI) e proporcional, integral e derivativo (PID) se dispuser da ação acelerométrica. O ajuste dos ganhos depende fundamentalmente da geometria do conduto forçado, do momento de inércia da massa girante e das características da carga.

Na parcela proporcional, o sinal de erro gerado é proporcional ao desvio de velocidade. Um regulador com o componente Proporcional e Integral, tem ótima sensibilidade de resposta ao erro.

7. COMISSIONAMENTO

O comissionamento é uma das etapas mais importantes de um projeto, como por exemplo de uma hidroelétrica, seja implantação (usinas novas) ou seja usinas a serem modernizadas.

Trata-se de uma etapa muito crítica onde o fabricante de cada equipamento sai da bancada ou laboratório para executar ensaios funcionais em seus equipamentos em campo, a fim de consolidar o seu bom funcionamento, passando para a mão dos operadores equipamentos confiáveis e que irão executar as funções de forma satisfatória, principal objetivo do comissionamento.

Além de um conjunto de técnicas mencionadas em normas, todos os ensaios devem ser executados com a máxima segurança possível, para evitar danos aos equipamentos, e o mais importante, para as pessoas que participam direta ou indiretamente do procedimento.

Com o sistema de regulação de velocidade não é diferente, são executados vários ensaios e ajustes para que o sistema opere de forma satisfatória. Tais ensaios devem estar descritos no manual de comissionamento. Além da parte técnica existe uma parte bastante burocrática, porém não menos importante como reuniões para alinhar procedimentos, treinamentos e integrações, reuniões de abertura, de fechamento e de entrega do equipamento.

Este trabalho, relata uma sequência de ensaios executados durante o comissionamento de um Regulador de Velocidade.

8. ENSAIOS ESTÁTICOS

Ensaio estáticos são ensaios onde o conjunto turbina/gerador permanecem estáticos, ou seja, não haverá movimento de rotação do eixo, para que isso seja possível as comportas a montante e a jusante ou válvulas de adução devem permanecer fechadas e a caixa espiral e conduto forçado devem estar drenados. Mesmo com os procedimentos mencionados anteriormente, é necessário muito cuidado para que não haja movimentos indevidos no eixo da turbina.

Durante esta etapa, trabalha-se com o controlador em malha aberta para movimentação em máxima velocidade dos atuadores e ajustes dos transdutores e de suas respectivas transduções, e em seguida, controle de posição de válvulas e atuadores para o Sistema de Regulação de Velocidade.

8.1. MOVIMENTAÇÃO DOS ATUADORES

Para a movimentação das válvulas e atuadores é necessário conhecer o sinal necessário que o atuador eletro-hidráulico (válvula proporcional) deverá receber para que ele possa movimentar-se. Tal ensaio se faz necessário para conhecer os limites de abertura e fechamento das válvulas e atuadores.

8.2. AJUSTE DAS TRANSDUÇÕES

Após a movimentação das válvulas e atuadores se faz necessário fornecer ao Regulador de Velocidade informações sobre os valores de abertura e fechamento dos mesmos. Para que isso seja possível, deve-se saturar o sinal de controle, em malha aberta, de modo que as válvulas ou atuadores fechem por completo e em máxima velocidade. Nesse instante cada transdutor (devidamente fixado e ajustado) de sua respectiva válvula ou atuador, fornecerá ao RV um sinal que indicará que está completamente fechado. Com isso se faz necessário atribuir o valor 0% (ou -100% para válvulas distribuidoras e proporcionais) ao sinal que está sendo enviado pelos transdutores.

Na sequência, deve-se saturar o sinal de controle de modo que ocorra a abertura dos atuadores e válvulas em máxima velocidade. Quando completamente abertos seus transdutores fornecerão ao RV um sinal que indicará que estão completamente abertos a este sinal atribui-se 100%.

As Tabelas 1 e 2 mostram como é feito o ajuste de transdução dos atuadores.

Tabela 1: Ajustes de transdução da Válvula Distribuidora.

Sinal de Controle	Valor prático fornecido pelo transdutor	Valor ajustado
4 mA	4,5 mA	-100%
20 mA	19,5 mA	100%

Tabela 2: Ajustes de transdução dos atuadores.

Sinal de Controle	Valor prático fornecido pelo transdutor	Valor ajustado
4 mA	4,5 mA	0%
20 mA	19,5 mA	100%

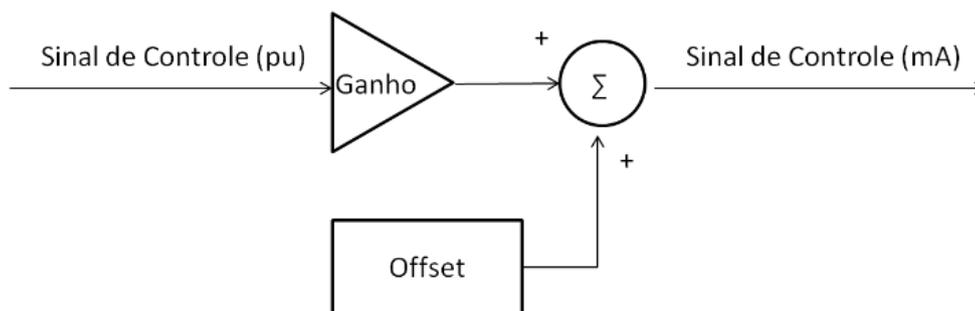
8.3. AJUSTE DA SAÍDA DE CONTROLE

No RV em questão faz-se necessário condicionar o sinal de controle do RV em pu (por unidade) em grandezas necessárias para movimentar as válvulas e atuadores.

Normalmente os atuadores eletro-hidráulicos (válvulas proporcionais) são comandados através de um sinal em corrente de 4 a 20 mA.

A Figura 22 apresenta o sistema que converte o sinal de controle (± 1 pu) em um sinal físico para a válvula proporcional.

Figura 22: Diagrama de blocos da saída de controle.



Fonte: Reivax.

Para o cálculo do ganho e do offset necessários para conversão usa-se um sistema composto por duas equações do tipo:

$$y = \text{ganho} * x + \text{offset} \quad (7)$$

onde a primeira considera um comando de fechamento em máxima velocidade 4 mA (variável y) onde o valor do sinal de controle será -1pu (variável x) e a segunda equação considera-se um comando de abertura em máxima velocidade 20 mA (variável y) com sinal de controle em 1pu (variável x). Com isso temos:

$$4mA = \text{ganho} * (-1) + \text{offset}$$

$$20mA = \text{ganho} * (+1) + \text{offset}$$

Resolvendo o sistema de duas equações e duas variáveis obtém-se um **ganho** = 8 mA e **offset** = 12 mA. Quando o controle for -1pu a saída analógica de controle do RV fornecerá à válvula proporcional 4 mA e fechará seus atuadores na máxima velocidade, quando o controle 1pu a saída analógica fornecerá à válvula proporcional 20 mA e abrirá seus atuadores na máxima velocidade.

Já com 12 mA a válvula permanece em repouso e não abre nem fecha.

8.4. ABERTURA E FECHAMENTO DOS ATUADORES EM TAXA MÁXIMA

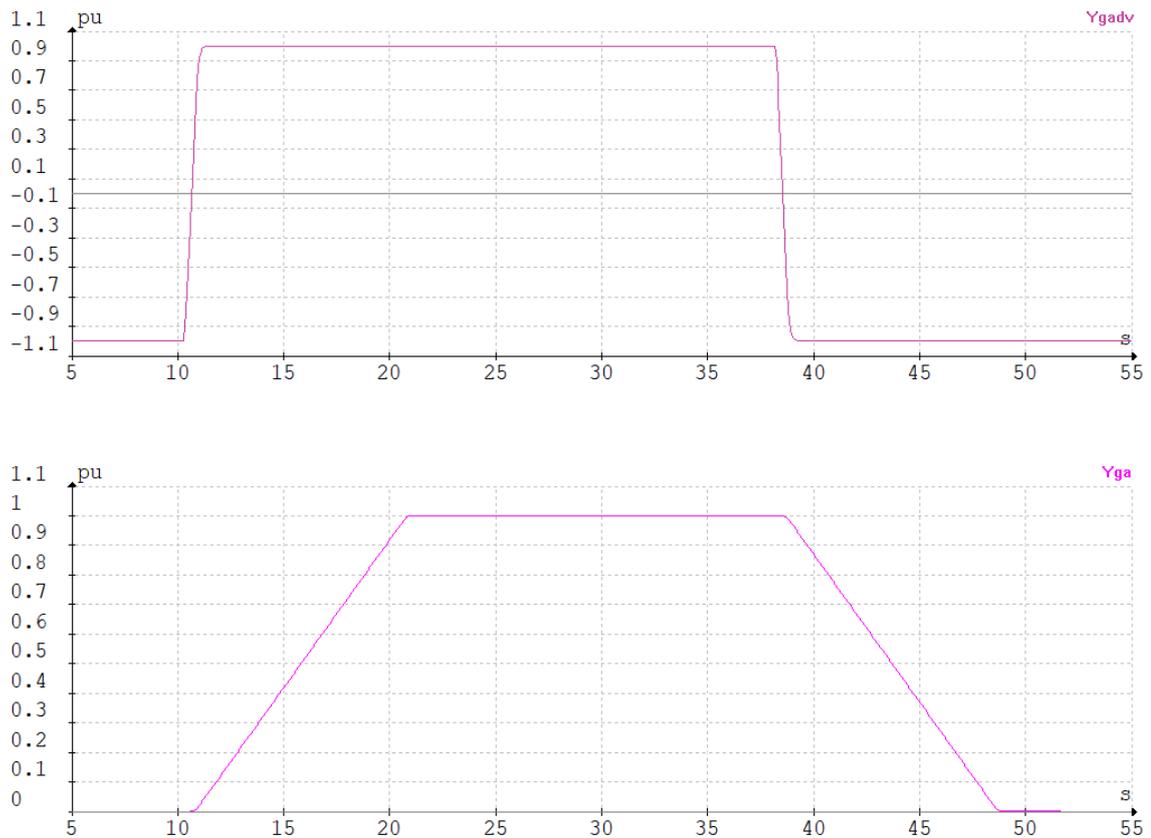
Este ensaio é de fundamental importância e serve para confirmar se o tempo de abertura e principalmente o tempo de fechamento estão dentro dos valores estabelecidos em projeto. Um distribuidor que fecha rápido é excelente para o conjunto turbina/ gerador, pois evita sobre velocidades elevadas, porém para o conduto forçado é bastante prejudicial, pois elevará a pressão do mesmo de forma considerável podendo até romper. Já um distribuidor que fecha de forma mais lenta, pode provocar sobre velocidades elevadas, podendo danificar o conjunto turbina/ gerador por efeitos de forças centrífugas podendo gerar desprendimentos de peças girantes no interior do conjunto, ou ainda sobreaquecer seus mancais.

Para realizar o ensaio de abertura e fechamento da válvula distribuidora é necessário zerar o ganho da saída de controle calculado acima e estipular o sinal de controle através do offset. Para abrir o atuador na velocidade máxima, o sinal de controle deve estar em 20 mA e para fechamento em máxima velocidade, o sinal de controle deve estar em 4 mA.

Da medição do tempo de abertura e fechamento, pode-se saber as taxas máximas de abertura e fechamento que a válvula distribuidora é capaz de realizar.

A Figura 23 apresenta uma simulação dos tempos de abertura e de fechamento de uma válvula distribuidora e de um distribuidor genérico.

Figura 23: Abertura e fechamento dos atuadores.



Fonte: Reivax.

Tabela 3: Tempos e taxas máximas de abertura e fechamento dos atuadores.

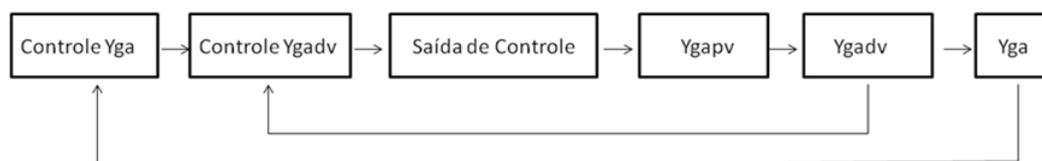
YgadV – Posição da Válvula Distribuidora			
Tempo de abertura	1 s	Taxa máxima	1 pu/s
Tempo de fechamento	1 s	Taxa máxima	1 pu/s
Yga – Posição do Distribuidor			
Tempo de abertura	10 s	Taxa máxima	0,1 pu/s
Tempo de fechamento	10 s	Taxa máxima	0,1 pu/s

8.5. AJUSTES DOS CONTROLADORES DE POSIÇÃO

Após os ajustes de transdução, cálculo do ganho e offset da malha de controle e conhecendo os tempos e taxas máximas, o próximo passo é ajustar as malhas de controle da válvula distribuidora e do distribuidor.

A malha dos posicionadores tem a arquitetura apresentada na Figura 24, onde Y_{ga} é a posição do distribuidor, Y_{gadv} é a posição da válvula distribuidora e Y_{gapv} é a posição da válvula proporcional.

Figura 24: Diagrama de blocos da malha de controle.



Fonte: Reivax.

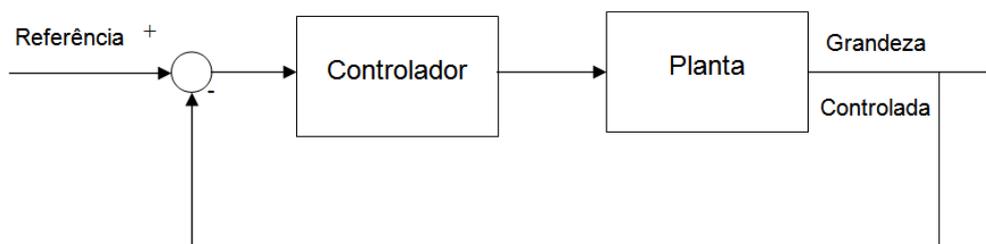
Observando a arquitetura da Figura 24, nota-se dois laços (malhas) de controle bem definidos: um interno referente ao controle da válvula distribuidora (Y_{gadv}) e outro externo que é referente ao distribuidor (Y_{ga}), onde Y_{gadv} e Y_{ga} são controladores do tipo PID.

O projeto de um sistema de controle começa por um estudo que objetiva determinar que o desempenho, tanto do ponto de vista estático quanto dinâmico, é da grandeza que se deseja controlar.

Para se atingir estes desempenhos, é necessária a inserção de um controlador com capacidade de modificar tanto a característica transitória como a de regime permanente da planta, que é alvo do controle. Um dos controladores que possui esta capacidade é o PID (proporcional, integral e derivativo).

A utilização de um controlador deste tipo é tal que o seu ajuste possibilita ao sistema de controle o cumprimento das especificações transitórias e estáticas. Este procedimento de inserir o controlador em um esquema de controle de malha fechada é chamado de compensação e, geralmente é implementado colocando-se o controlador em série com a planta conforme pode ser visto na Figura 25.

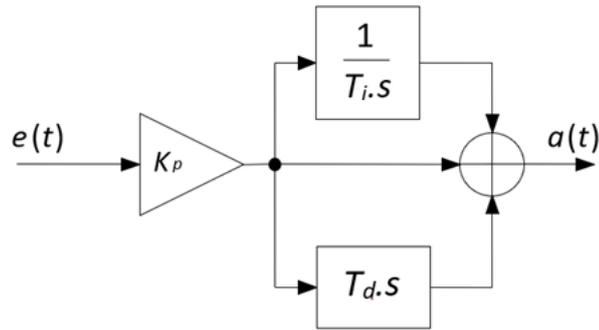
Figura 25: Controlador inserido em malha fechada.



Fonte: Reivax.

As ações proporcionais, integrais, proporcionais-derivativas, proporcionais-integrais e proporcionais-integrais-derivativas são as ações de controle mais populares no mundo. Podem ser encontradas em controladores de tensão, velocidade, posição, pressão, temperatura, entre outros. Tais controladores processam o sinal de erro para gerar o sinal de regulação ou de controle. O diagrama de blocos representado pela Figura 26 ilustra a arquitetura típica de um controlador PID.

Figura 26: PID Clássico.



Fonte: Reivax.

Na Figura 26, $e(t)$ é o sinal de erro e $a(t)$ o sinal de controle. Os parâmetros de ajuste do controlador são o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d . Matematicamente, o sinal de controle do controlador PID é obtido como:

$$a(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

ou, no domínio S :

$$A(S) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \cdot E(S) \quad (9)$$

- **Ganho Proporcional**

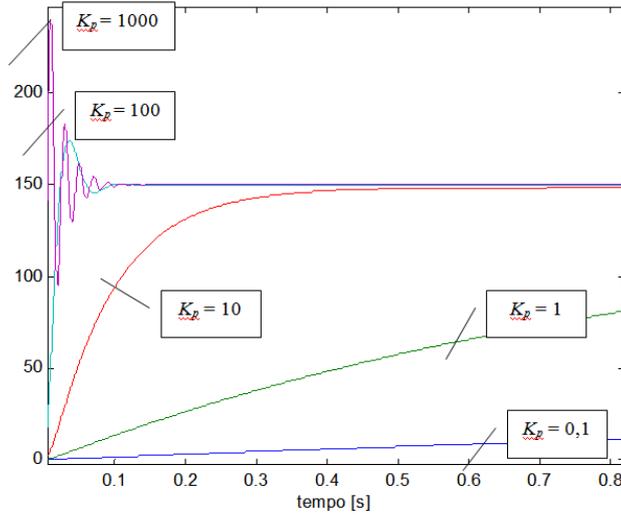
Os controladores puramente proporcionais geram o sinal de controle pela amplificação do sinal de erro. Matematicamente tem-se:

$$a(t) = K_p \cdot e(t) \quad (10)$$

Para uma referência constante, o erro do sistema será menor (mas nunca zero) quanto maior for K_p , o que, na grande maioria dos casos, acarreta problemas de estabilidade. Na ocorrência de distúrbios que atuem direta ou indiretamente na grandeza controlada, verifica-se o mesmo comportamento. A resposta do sistema, contudo, com o aumento de K_p , tende a ficar mais oscilatória como mostra as curvas da Figura 27.

O ganho K_p é então calculado para garantir um erro máximo de regime permanente e para garantir razoável rejeição aos distúrbios.

Figura 27: Resposta ao degrau com variação do K_p .



Fonte: Reivax.

- **Ganho Integral**

Os controladores de ação integral apresentam a vantagem de levar a zero o erro para uma referência constante, ou seja, em regime permanente a variável controlada sempre atinge o valor estabelecido como referência.

Para melhorar a resposta transitória, esta ação costuma ser utilizada em conjunto com a ação proporcional, resultando no controlador proporcional-integral (PI). Matematicamente tem-se:

$$a(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt \quad (11)$$

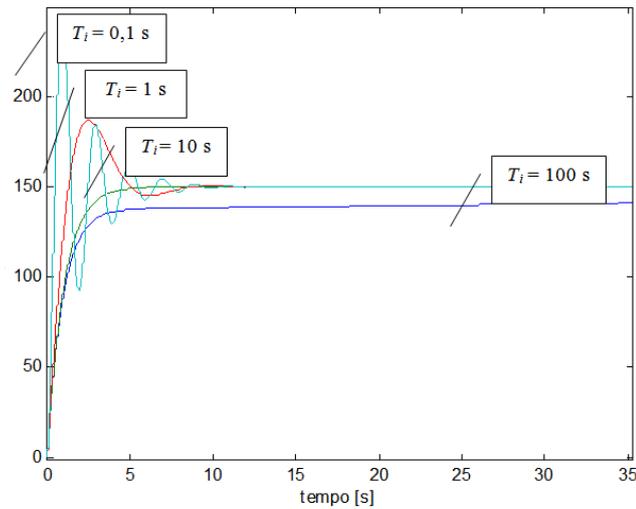
onde K_i é o ganho integral.

Também é comum definir o controlador por meio da seguinte equação:

$$a(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (12)$$

onde T_i é o tempo integral ou reset time. Neste tipo de implementação, o aumento do ganho integral pode ser conseguido com o aumento do ganho proporcional.

Figura 28: Resposta ao degrau com K_p fixo e variação do K_i .



Fonte: Reivax.

Segundo a bibliografia, observa-se que, para sistemas com amortecimento muito baixo (resposta transitória muito oscilatória), o ajuste do controlador leva a ganhos integrais baixos. A Figura 28 mostra esse comportamento oscilatório para ganhos altos. Normalmente, para se lidar com a resposta transitória lenta decorrente da ação PI, trabalha-se com baixos valores de ganho integral. Não é possível, com o uso da ação PI, obter uma resposta transitória melhor do que aquela que seria obtida com ação puramente proporcional, ou seja: a melhor resposta transitória obtida com a ação P é melhor do que a melhor resposta transitória obtida com a ação PI.

Nota:

O comportamento do controlador PI pode ser aproximado por um compensador de atraso de fase. Neste compensador, além de um ganho proporcional são usados como parâmetros uma constante de tempo de atraso e outra de avanço, sendo que para operação como atraso de fase a constante de tempo de atraso deve ser maior que a de avanço.

- **Ganho Derivativo**

Os controladores de ação proporcional derivativa (figura 29) produzem um sinal de controle de alta sensibilidade. Por isso apresentam a vantagem de "perceber" rapidamente a variação do erro, podendo desta forma, estabelecer uma ação corretiva transitória de alta velocidade antes que a magnitude do erro fique muito grande. Isto indica que esta ação não atua em regime permanente, não podendo assim ser usada sozinha. Geralmente é utilizada em conjunto com a ação proporcional, originando o controlador PD. Matematicamente ela é descrita como:

$$a(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

onde K_d é o ganho derivativo. A implementação como uma cascata de ação proporcional e derivativa também é usada. Neste caso o sinal de controle é obtido como:

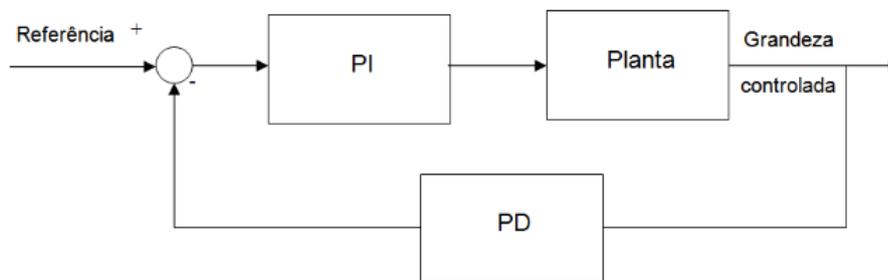
$$a(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

onde T_d é o tempo derivativo ou rate time.

Devido à alta sensibilidade da operação de derivação, o controlador PD é muitas vezes inserido no caminho de realimentação do sistema de controle, conforme mostrado na Figura 29. Neste tipo de configuração somente a grandeza controlada é derivada. Isto faz com que a variação do degrau de referência não provoque uma amplitude de saída intensa do controlador como ocorre quando o termo derivativo está no caminho direto do sistema de controle.

Outro benefício trazido pelo controlador derivativo é o aumento da estabilidade do sistema de controle.

Figura 29: Controlador derivativo na realimentação do sistema.



Fonte: Reivax.

O comportamento do controlador PD pode ser aproximado por um compensador de avanço de fase. Os parâmetros de ajuste do compensador de avanço são os mesmos que o de atraso, com a diferença que neste caso a constante de tempo de avanço deve ser maior que a de atraso.

Nota:

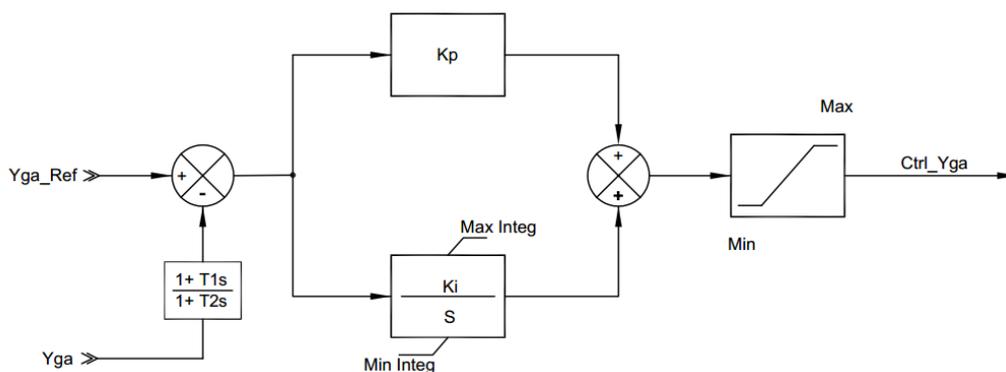
Compensador de ATRASO: Diminui o ganho proporcional no transitório e não interfere no regime permanente.

Compensador de AVANÇO: Possui o comportamento de um controlador derivativo.

8.5.1. AJUSTE DA MALHA DE CONTROLE DA VÁLVULA DISTRIBUIDORA

Os comentários a respeito dos ajustes da malha Figura 30 valem tanto para a malha da válvula distribuidora quanto para o distribuidor, a menos do LimMín e LimMáx que têm ajustes diferentes para as duas malhas.

Figura 30: Controlador de posição dos atuadores.



Fonte: Reivax.

- **Ajuste do ganho proporcional K_p**

Para encontrar o K_p adequado para a malha de posicionamento deve-se zerar o K_i , deixar os Limitadores (Max Integ, Min Integ, LimMáx e LimMín) totalmente abertos em 1 e -1, e deixar T1 com ajuste igual a T2 anulando a atuação desses na malha.

Começamos com um valor para K_p em torno de 0,1 e Y_{gadv} em torno de 0,5 pu e aplicando degraus de 3% na posição (desde que não exista a saturação do sinal de controle, pois nesse caso devemos reduzir o percentual do degrau), percebendo sempre se ainda existe a estabilidade do sinal. Aumenta-se até encontrar um valor de K_p com o qual causamos uma oscilação. Esse é o valor de K_p crítico e dividindo por 2 esse valor tem-se o K_p ideal.

- **Ajuste do ganho integral K_i**

Encontrado o valor de K_p deve-se ir aumentando o valor de K_i para eliminar o erro em regime permanente.

Deve-se partir de K_i nulo e aumentá-lo até que o erro em regime permanente seja nulo. O valor indicado é:

$$K_i \cong \frac{K_p}{5} \quad (15)$$

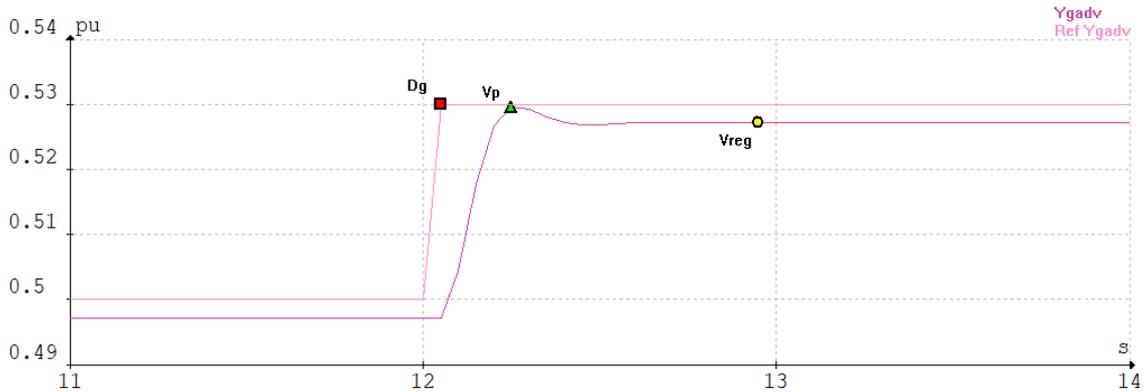
Apesar de o integrador eliminar o erro em regime, ele causa sobressinal (Figura 31), por isso aumenta-se até conseguir um tempo curto para a estabilidade da posição sem erro em regime, um sobressinal em índice aceitável e sem undershoot.

O sobressinal de qualquer sinal pode ser calculado da seguinte maneira:

$$Overshoot\% = \frac{V_p - V_{reg}}{D_g} \quad (16)$$

Onde, V_p é valor máximo de sobrepassagem, V_{reg} é o valor do sinal em regime permanente e D_g é o valor do degrau, conforme está representado na Figura 31.

Figura 31: Sobressinal (overshoot).



Fonte: Reivax.

- **Ajuste dos limitadores do integrador: L_s e L_i**

Como mencionado no item anterior, o efeito colateral do uso do integrador é o sobressinal, que pode ser atenuado ao ajustar os parâmetros L_i e L_s para limitar esse efeito.

Deve-se limitar o integrador até que o erro em regime seja diferente de zero. Nesse ponto, o integrador está tão limitado que o valor de saída que estava assegurando o erro nulo em regime permanente, está fora da faixa ajustada para L_i e L_s . Encontrado esses limites, deve-se multiplicar esses valores por 1,5 e assim os limites L_i e L_s finais estarão ajustados.

- **Ajuste do bloco de avanço-atraso: T_1 e T_2**

O bloco de avanço-atraso presente na realimentação da posição do atuador é ajustado como bloco de avanço de fase ($T_1 > T_2$). Ao usar o bloco de avanço o controle de posição passa a ter uma ação derivativa, podendo diminuir o sobressinal.

Deve-se ajustar $T_2=0,01$ e ir aumentando T_1 para diminuir o sobressinal. Note que o avanço ajustado deve ser tal que a relação $\frac{T_1}{T_2} \leq 5$ seja obedecida, pois ajustes acima da razão de 5 aumentam consideravelmente o ruído do sinal de controle.

8.5.2. Ajuste da malha de controle do distribuidor

Os parâmetros a serem ajustados para o distribuidor bem como o procedimento são os mesmos, aplicados para ajuste da válvula distribuidora, porém, como se trata de um atuador de dinâmica mais lenta, conseqüentemente os valores serão outros.

9. ENSAIOS DINÂMICOS A VAZIO

9.1. AJUSTE TRANSDUÇÃO

O primeiro passo a ser cumprido no comissionamento a vazio é o ajuste da transdução dos pick-ups e da frequência calculado pelo TP. Para isso é necessário conhecer a frequência nominal da máquina em hertz, a velocidade em rpm, e o número de dentes da roda dentada. Para calcular a frequência nominal dos pick-ups, que não necessariamente será 60 Hz, usa-se a seguinte equação:

$$F_{nominal\ pick\ up} = \frac{rpm * numero\ dentes}{frequência\ máquina} \quad (17)$$

No caso em discussão os dados utilizados para simulação são os seguintes:

- Frequência máquina: 60 Hz
- Velocidade: 300 rpm
- Número de dentes da roda dentada: 12
- Fazendo os cálculos:

$$F_{nominal\ pick\ up} = \frac{300 * 12}{60} = 60\text{ Hz}$$

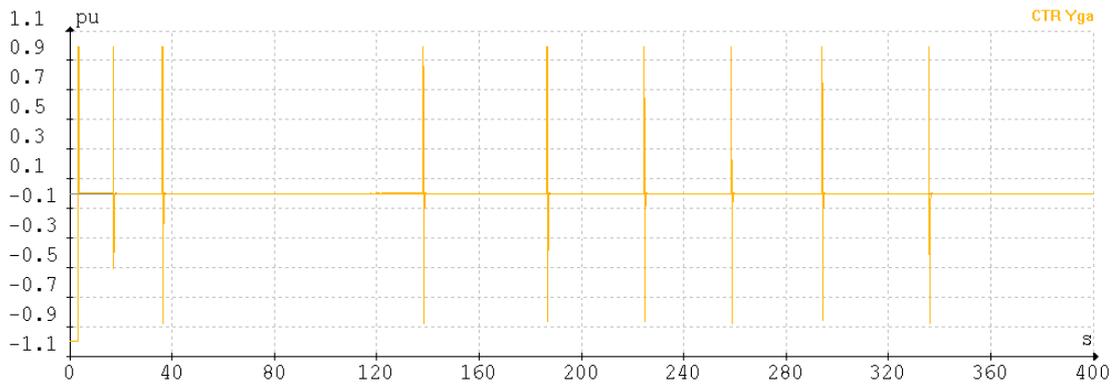
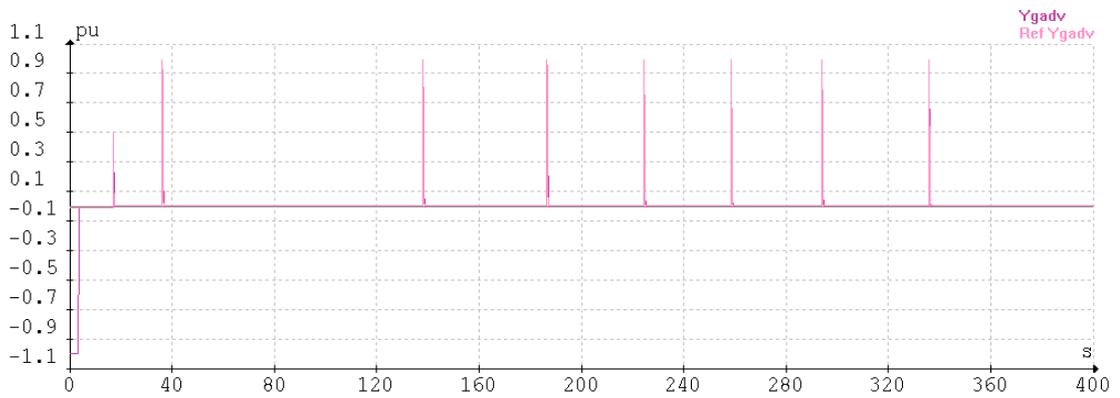
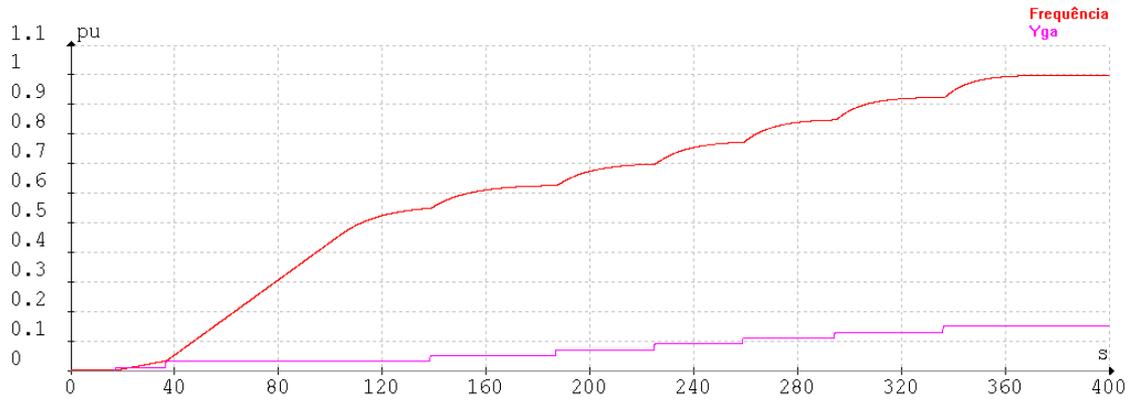
Com isso a frequência nominal dos Pick-Up's é 60 Hz

9.2. PARTIDA GRADUAL 0 A 100%

A partida gradual (Figura 32) tem o objetivo de verificar a integridade da turbina e seus acessórios.

Nesse ensaio, controla-se a abertura do distribuidor, abrindo de 1 em 1% até que a turbina atinja a rotação nominal, e verificando todos os sinais que são fornecidos ao regulador e a abertura do distribuidor necessária para manter a turbina rodando a vazio. Esse ponto será usado para configuração da partida em automático e para o ponto de potência zero.

Figura 32: Partida gradual.

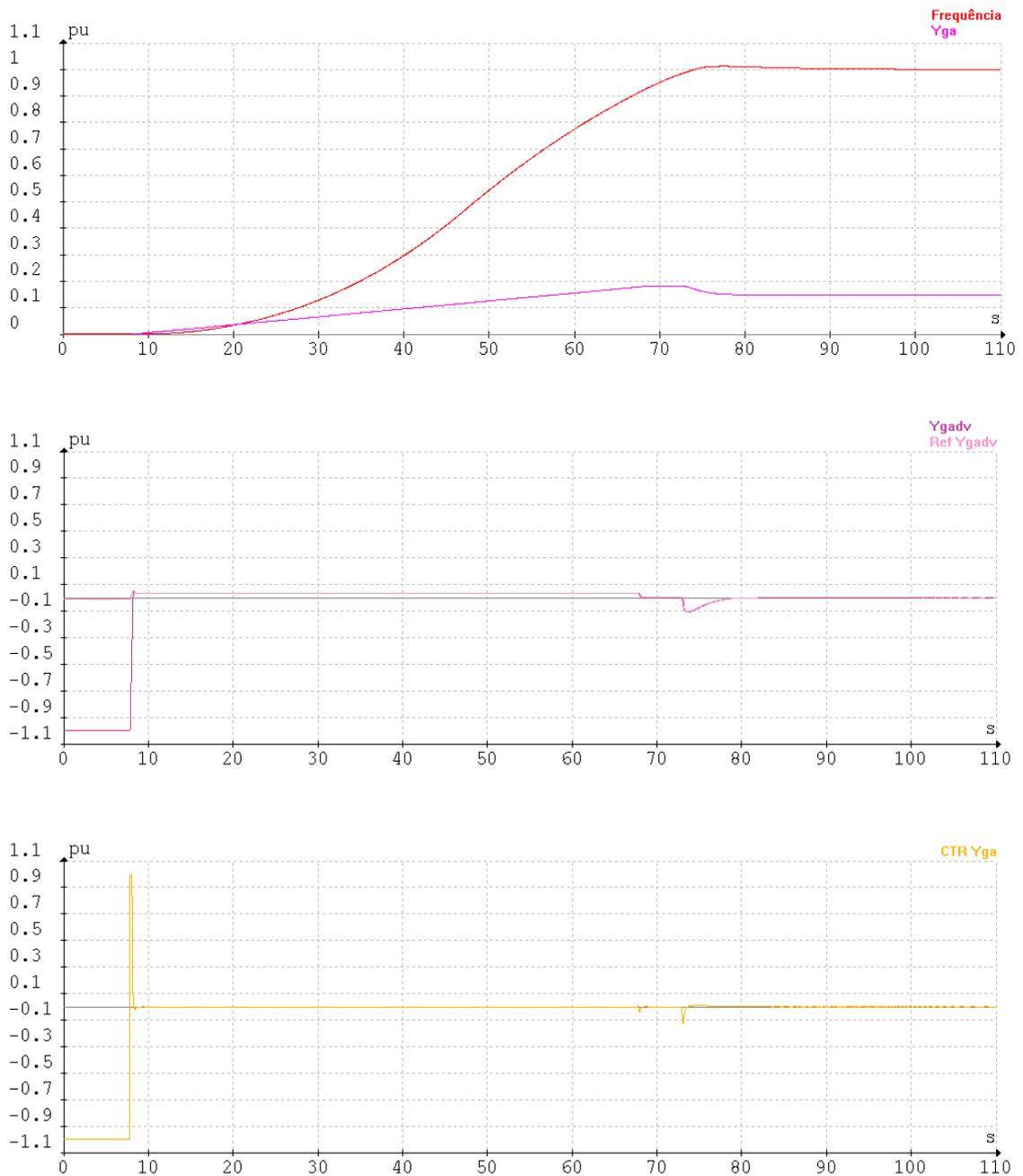


Fonte: Reivax.

9.3. PARTIDA AUTOMÁTICA

Logo após a partida gradual, conhecendo as transduções e a abertura a vazão já é possível partir a turbina em automático (Figura 33).

Figura 33: Partida automática.



Fonte: Reivax.

Observação: Em alguns casos a partida é mais lenta ainda para reduzir esforços de torção no acoplamento turbina gerador, e para que peixes e outros animais, que possam ter entrado pela comporta jusante e se alojado no interior da turbina, possam sair antes de a máquina acelerar.

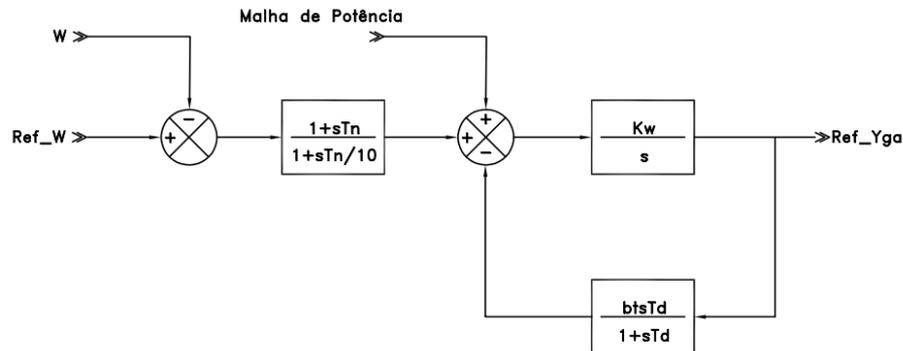
9.4. AJUSTE DA MALHA DE VELOCIDADE

Levar em conta T_w para uma estimativa inicial dos parâmetros.

- **Ajuste bt : Ganho Proporcional**

A malha de velocidade (Figura 34) pode ser vista como um controlador PID.

Figura 34: Malha de Velocidade.



Fonte: Reivax.

O procedimento de ajuste da malha de velocidade é similar ao da malha de posição. O primeiro passo a se fazer em um controle PID é sempre ajustar o ganho proporcional, no caso da malha de velocidade esse ganho é igual:

$$K_p = \frac{1}{bt} \quad (18)$$

Diferente do caso dos posicionadores, que o ganho proporcional era ajustado como metade do ganho crítico, neste caso da velocidade não há como fazer a velocidade oscilar.

Algumas considerações sobre o ganho proporcional:

- Undershoot do Atuador

O ganho proporcional deve ser o máximo valor que ainda não leve o distribuidor a ter undershoot.

- Máximo Ganho Proporcional

Além do ponto mencionado acima, tem-se que o máximo ganho proporcional aplicável é aquele que leva o distribuidor a se movimentar na máxima taxa. Ganhos proporcionais acima desse valor não devem ser utilizados, pois estes só levarão o servo virtual a valores mais altos e não resultará em uma resposta mais rápida, isto porque o distribuidor já está oferecendo sua máxima taxa de movimentação.

Levando em conta estes dois pontos, foi escolhido bt de 0,95, que nos dá um ganho proporcional de 1,05. Com ganhos acima deste valor percebe-se undershoot no atuador.

- **Ajuste T_d : Ganho Integral**

Ajustado o ganho proporcional através do parâmetro bt o próximo passo é ajustar o ganho integral através do parâmetro T_d .

Para este ajuste deve-se diminuir T_d (aumentar ganho integral) até que comece a existir undershoot na velocidade.

- **Ajuste T_n : Acelerômetro**

O último ajuste a ser feito na malha de velocidade a vazio é o acelerômetro. No caminho do erro de frequência existe um bloco de avanço de fase que tem ganho transitório fixo em 10,

e que a resposta em frequência deste bloco pode ser ajustada através do parâmetro T_n . Algumas considerações sobre o acelerômetro:

- Oscilação do Atuador

O ajuste do T_n não deve ser maior do que o valor que leve o atuador a oscilar. Devem-se utilizar valores menores para o acelerômetro.

- Amplificação de Ruídos

Como o acelerômetro é um bloco de avanço de fase, ele é também um filtro passa – altas frequências. Ao aumentar T_n a banda passante deste filtro é aumentada. Por consequência clara tem-se que ao aumentar T_n os ruídos serão amplificados.

Então se evita utilizar valores de T_n maiores de 1,5 s. Além disso quando a medição de frequência for feita pelos Pick-Up's orienta-se a zerar o acelerômetro, pois os sinais desses transdutores têm uma relação sinal ruído baixa.

10. ENSAIOS EM CARGA

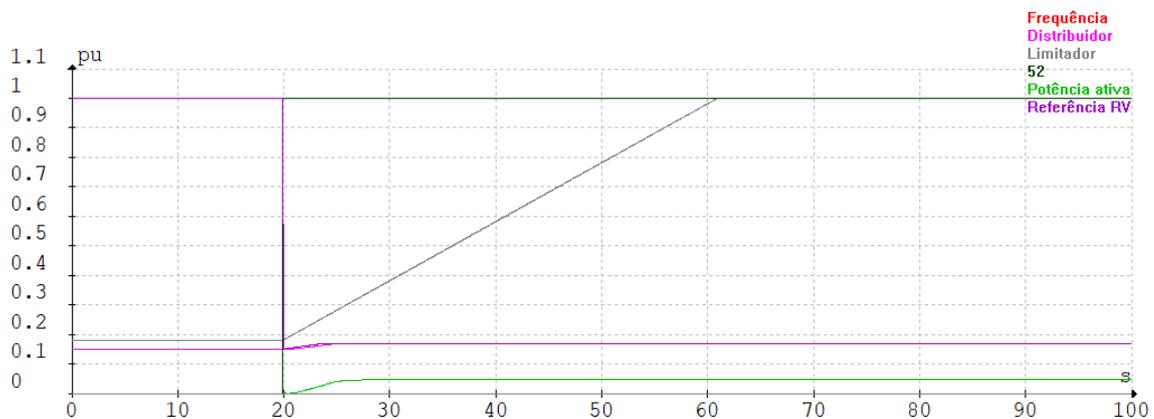
Nesta seção será apresentado o procedimento de comissionamento em carga do regulador de velocidade. Conforme foi feita nas etapas passadas do comissionamento, aqui será apresentado passo a passo como o procedimento foi feito.

10.1. PRIMEIRO SINCRONISMO

Em uma situação real de comissionamento devem ser checadas as condições da instalação que podem estar pendentes nesta etapa do comissionamento, como a verificação dos circuitos de TC, estados do 52, e daí parte-se para o primeiro sincronismo. Neste ponto o modo de controle a ser utilizado deve ser o modo de controle de posição (abertura), pois a transdução de potência ainda não foi verificada.

Checadas todas as condições mostradas acima o primeiro sincronismo (Figura 35) pode ser executado.

Figura 35: Primeiro sincronismo.



Fonte: Reivax.

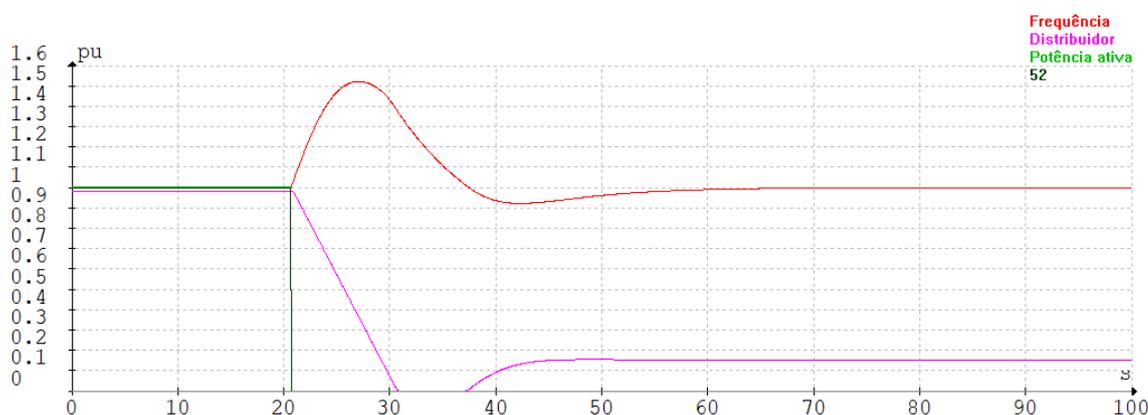
10.2. AJUSTE DA TRANSDUÇÃO DE POTÊNCIA

Com a máquina sincronizada, deve-se ajustar a transdução de potência, comparando o sinal calculado pelo regulador com outro dispositivo que calcule potência (relé de proteção, medidor de energia e outros). Deve-se atentar para as relações de TP's e TC's pois é através dessas que é calculada a potência gerada.

10.3. REJEIÇÕES DE CARGA

Após conhecer a transdução de potência devem ser feitas rejeições de carga de 25%, 50%, 75% e 100% de Potência e 100% de abertura (quando possível). A sobre pressão no conduto e sobre velocidade na rejeição de máxima potência e máxima abertura (quando possível) são fatores críticos da segurança da máquina e da usina. A Figura 36 apresenta o exemplo de uma rejeição de carga.

Figura 36: Rejeição de carga 100% de Potência.



Fonte: Reivax.

Durante as rejeições é possível verificar a relação sobre velocidade da máquina e sobre pressão do conduto. Essas duas grandezas devem ser controladas para que não danifiquem a máquina no caso da sobre velocidade, ou ainda o conduto no caso da sobre pressão, esse controle é feito através da taxa máxima de fechamento do distribuidor.

Um fechamento rápido se obtém uma sobre velocidade baixa, porém uma sobre pressão alta será prejudicial ao conduto, e um fechamento lento se obtém uma sobre pressão baixa, porém uma sobre velocidade alta poderá vir a danificar o conjunto turbina - gerador, e seus periféricos.

10.4. CURVA ABERTURA – POTÊNCIA

A curva abertura-potência (Figura 37) tem a função de dizer ao servo virtual qual deve ser a posição do atuador para alcançar a potência escrita na referência de potência nas tomadas de carga.

Para levantar esta curva, o regulador deve estar em modo de controle de abertura. Devem ser levantados 10 pares de posição do atuador – potência. O primeiro ponto de potência é referente à potência nula. A abertura desse par é a posição em vazio, que é a posição que garante 1 pu de velocidade em vazio.

Um ponto importante a ser notado: ao mudar a referência de abertura deve-se esperar a abertura e a potência chegarem nos novos valores.

Figura 37: Levantamento da curva abertura – potência.



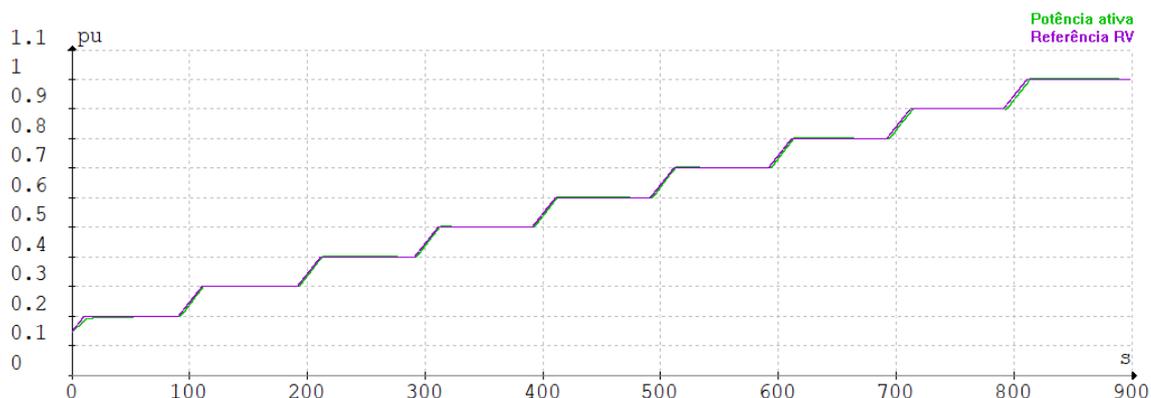
Fonte: Reivax.

10.5. RAMPAS DE POTÊNCIA

Este ensaio (Figura 38) é necessário para comprovar se a curva abertura – potência e a compensação de nível estão ajustadas corretamente. Deve proceder da seguinte maneira:

- Regulador deve estar em controle de potência (os parâmetros da malha em carga devem estar iguais aos ajustados em vazio, pois neste ponto do comissionamento o ensaio de isolamento simulada ainda não foi feito);
- A existência de grandes sobressinais de potência é indício que a curva de potência ou a compensação de nível estão erradas.

Figura 38: Tomada de carga.



Fonte: Reivax.

10.6. AJUSTES DA MALHA DE POTÊNCIA

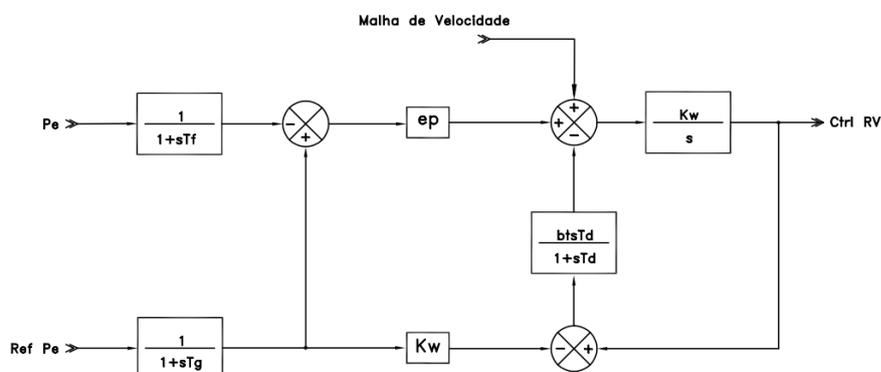
Para ajustar a malha em carga (Figura 39) do regulador de velocidade, o ensaio de isolamento simulada deve ser feito. É importante ressaltar que o ajuste da malha em carga deve ser feito pelo ensaio de isolamento simulada e não pelo degrau em potência. Isto é verdade porque a variação de referência de potência é feita em rampas, e a Curva Abertura - Potência é a responsável para resolver este problema. A malha em carga do RV tem como objetivo zerar o erro do regulador, que é um erro composto de frequência e potência que é apresentado na equação:

$$Erro = \Delta W + \Delta P * e_p \quad (19)$$

As constantes de tempo T_g e T_f devem ser ajustados em 1,0 s.

A zona morta de frequência pode ser ajustada conforme a necessidade, e o parâmetro ZM deve ser ajustado como a faixa de frequência (em pu) onde se necessite que o regulador fique sem ação.

Figura 39: Malha de Potência.



Fonte: Reivax.

10.7. ISOLAÇÃO SIMULADA

Existem três parâmetros que precisam previamente ser ajustados: en , $2H$ e ZM . en deve ser sempre igual a zero, $2H$ deve ser o valor encontrado através das rejeições de carga e ZM deve ser igual a zero também. Com estes parâmetros ajustados, parte-se para o ajuste da malha de controle em carga (Figura 39).

O parâmetro K_W é ajustado em vazio, com valor de 80. Os parâmetros bt , T_d e T_n inicialmente serão ajustados com os respectivos valores na malha em vazio.

Ajustando a malha em carga com ensaio de isolamento simulado é esperado que:

- A Frequência tenha comportamento estável;
- O pico de frequência não ultrapasse os limites impostos pelas proteções de sub-frequência. Estes valores são geralmente 90% da velocidade nominal;
- O tempo de estabilização seja conforme a norma que regulamenta a usina, no caso do Brasil esse tempo tem que ser menor do que 60 s;
- O tempo de resposta seja conforme a norma que regulamenta a usina, no caso do Brasil esse tempo tem que ser menor do que 9 s;
- Tempo de estabilização é o tempo necessário para a velocidade da unidade permanecer acima de 95% e abaixo 105% do valor final;
- Tempo de resposta é o tempo para a velocidade da unidade atingir 90% do valor final.

A norma que regulamenta o controle primário de velocidade no Brasil é o Sub-módulo 3.6 do ONS – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão – revisão 1.1 de 18/09/2010. Os valores apresentados de tempo de estabilização e repostas estão na seção 7.4 – quadro 5 – itens 4 e 5 do módulo. Vide ANEXO A.

Para facilitar a verificação da dinâmica da malha de potência retorna-se aos ajustes iniciais $bt=1$, $T_d=20$ e $T_n=0$. O procedimento de ajuste se faz da mesma maneira que o procedimento à vazio, mas agora a frequência a ser observada é a “Frequência Simulada”.

Como o efeito da coluna de água – parâmetro T_w - é responsável pela mudança da resposta da máquina entre os cenários vazio e carga, este parâmetro é proporcional à abertura do atuador, assim este ensaio deverá ser sempre feito mais próximo da máxima potência ativa da máquina.

Para isso levou-se o conjunto turbina – gerador para 50% de potência e a isolação simulada foi habilitada. Aplicou-se degraus de 10% na carga simulada (perceba que não é degrau na referência de potência) e os seguintes sinais devem ser observados: a frequência simulada, potência gerada e a posição do atuador.

- **Ajuste bt : Ganho Proporcional**

O ajuste é similar ao cenário em vazio. Deve-se ir diminuindo bt (aumentando o ganho proporcional) até que haja undershoot na posição do atuador. A seguir estão apresentados os registros dos ensaios de isolação simulada variando o parâmetro bt .

- **Ajuste T_d : Ganho Integral**

Para ajustar o parâmetro T_d procede-se similarmente ao ajuste em vazio. Deve diminuir T_d , aumentando o ganho integral (K_i), até que haja undershoot na frequência simulada ou que o atuador atinja sua posição máxima. Abaixo estão apresentados os ensaios variando o parâmetro T_d .

$$K_i = \frac{1}{bt * T_d} \quad (20)$$

- **Ajuste T_n : Acelerômetro**

O último ajuste a ser feito é o parâmetro T_n responsável pelo acelerômetro. Novamente, este ajuste é feito de maneira similar ao ajuste em vazio, deve-se aumentar T_n até que o atuador comece a oscilar, além disso o atuador não deve saturar.

11.RESULTADOS PRÁTICOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante o comissionamento da Unidade Geradora 41 da Usina Hidroelétrica de Jirau. O equipamento em comissionamento é um regulador de velocidade:

Modelo: RVX Power

Fabricante: Reivax Automação e Controle S/A

Características:

- Duplo Canal;
- Transdutores de posição (distribuidor e Kaplan) redundantes;
- Medição de velocidade: dois sensores indutivos e TP's;
- Tipos de Controle:
 - Isócrono;
 - Estatismo permanente e transitório;
 - PID;
- Modos de controle:
 - Frequência (máquina a vazio);
 - Potência Ativa;
 - Abertura;
- Operação:
 - Isolada;
 - Interligada.

A Tabela 4 resume os dados nominais da máquina síncrona pertinentes ao comissionamento do Regulador de Velocidade:

Descrição	Simb.	Unidade	Valor
Potência aparente nominal	S_N	MVA	83,334
Potência ativa nominal	P_N	MW	75,0
Tensão nominal ($\pm 5\%$)	U_N	V	13.800
Corrente nominal do estator	I_N	A	3.486
Fator de potência indutivo nominal	$\cos \emptyset$		0,9
Fator de potência capacitivo nominal	$\cos \emptyset$		0,95
Frequência nominal	F_N	Hz	60
Velocidade nominal	V_N	rpm	94,7
Máxima velocidade de disparo		rpm	280
Queda líquida nominal		m	15,2

Tabela 4: Características da unidade geradora.

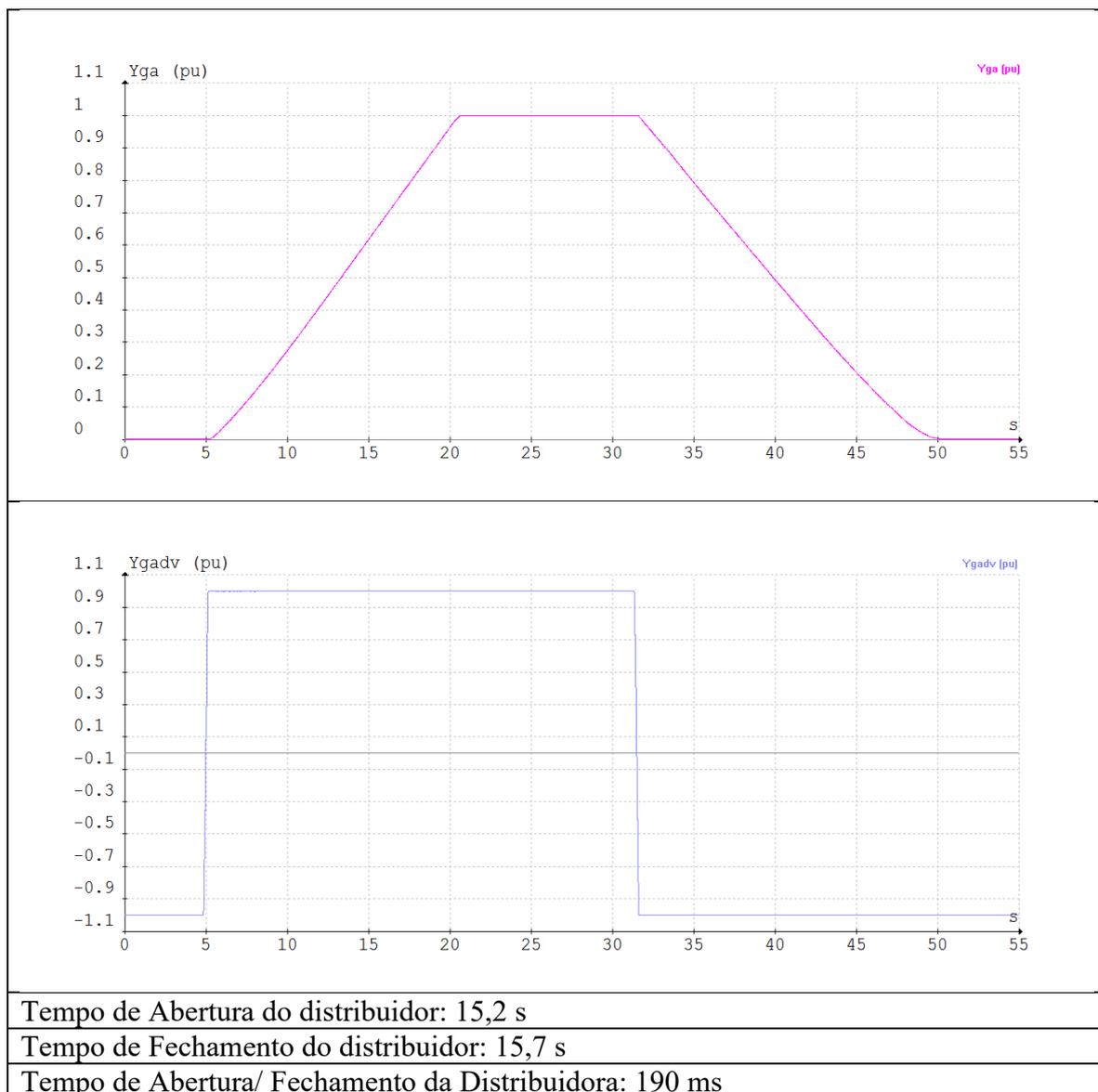
11.1. ENSAIOS ESTÁTICOS

Conforme descrito no item 8 os ensaios estáticos são realizados com o conjunto turbina/gerador estáticos.

- **Abertura e fechamento dos atuadores**

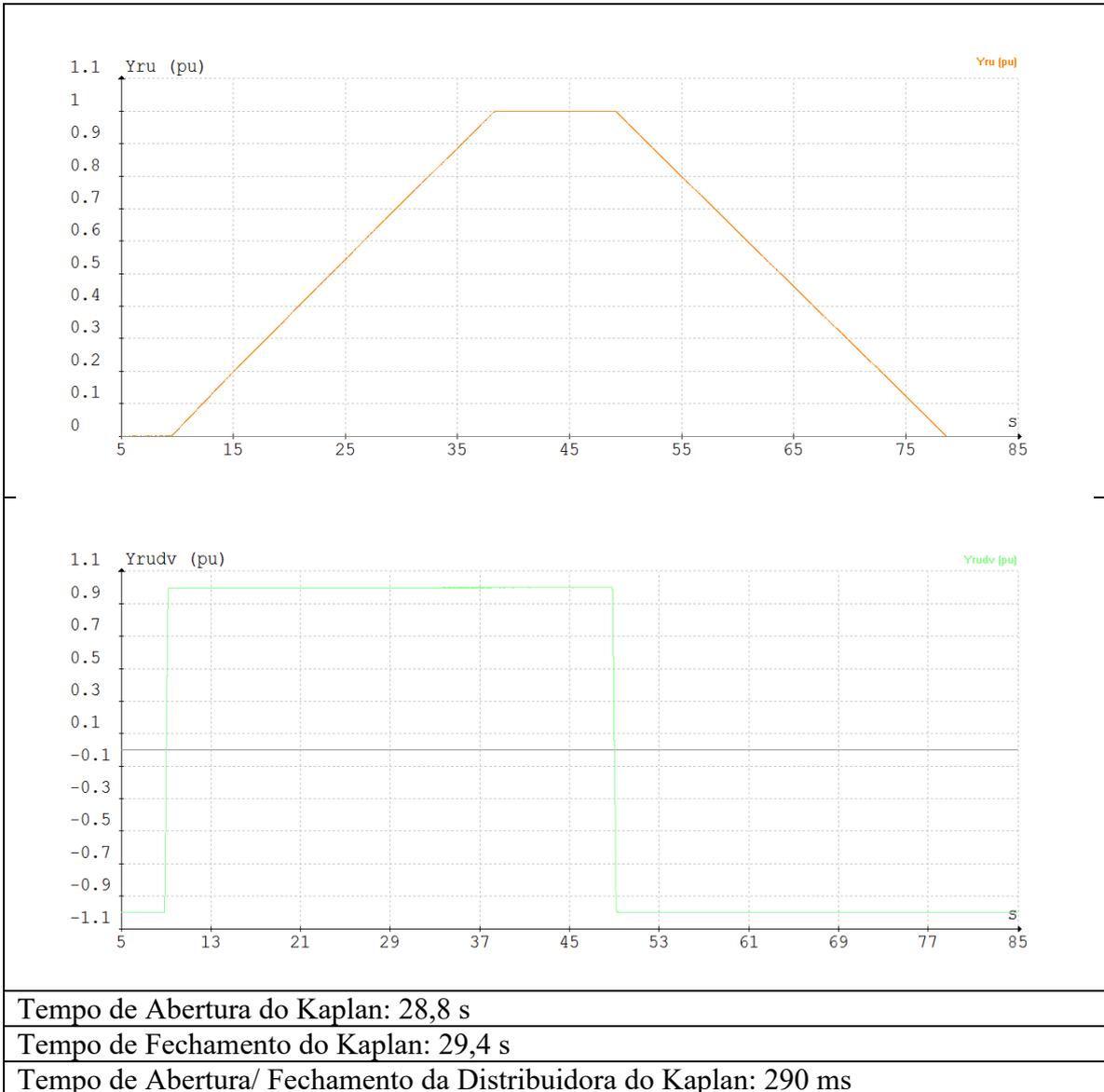
As Figuras 40 e 41 apresentam as medições do tempo de abertura e de fechamento dos atuadores em taxa máxima, isto é, sem a influência do controlador, conforme mencionado no item 8.4.

Figura 40: Abertura e Fechamento do Distribuidor.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 41: Abertura e fechamento das pás.

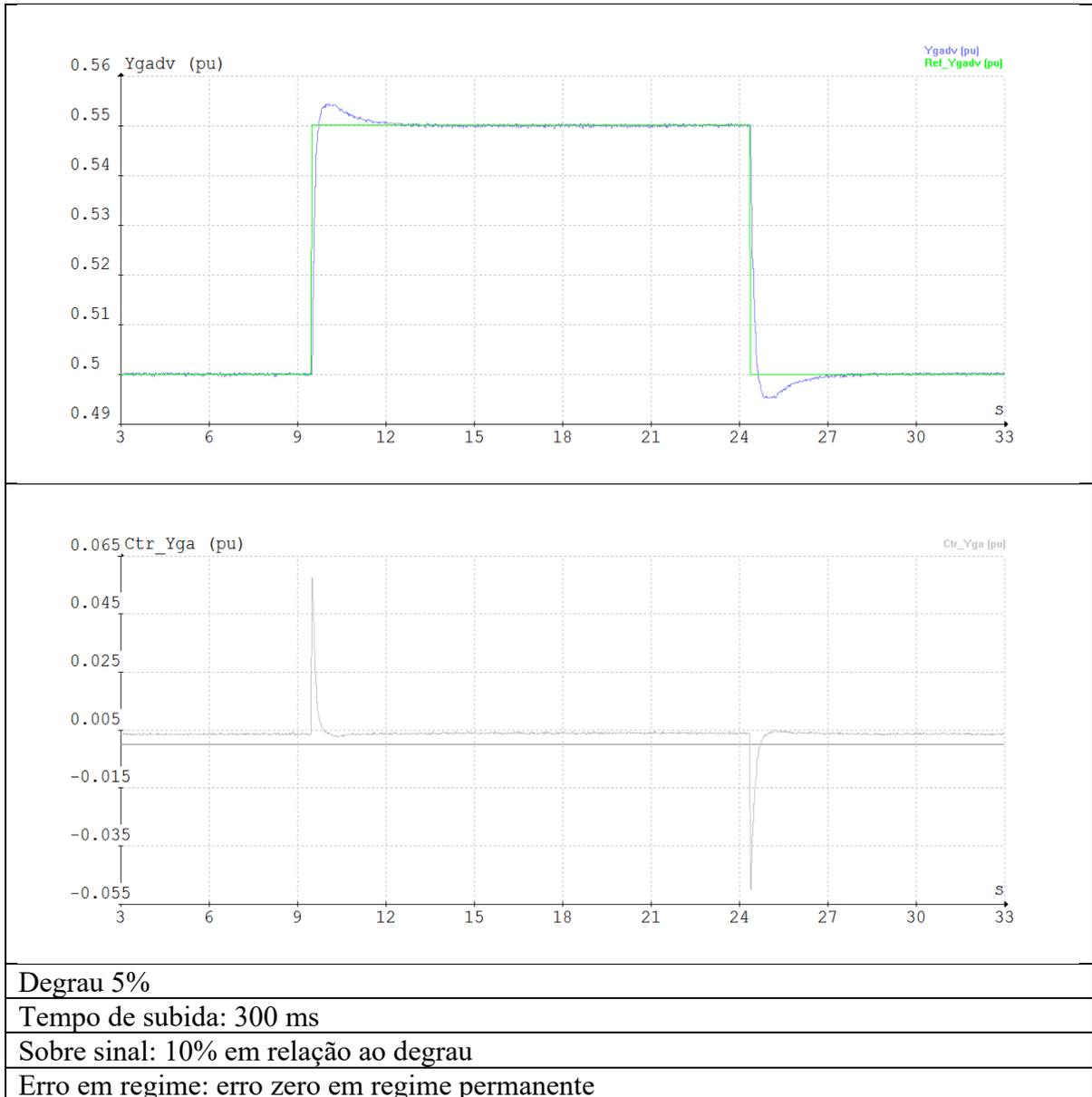


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Ajustes da dinâmica das válvulas distribuidoras**

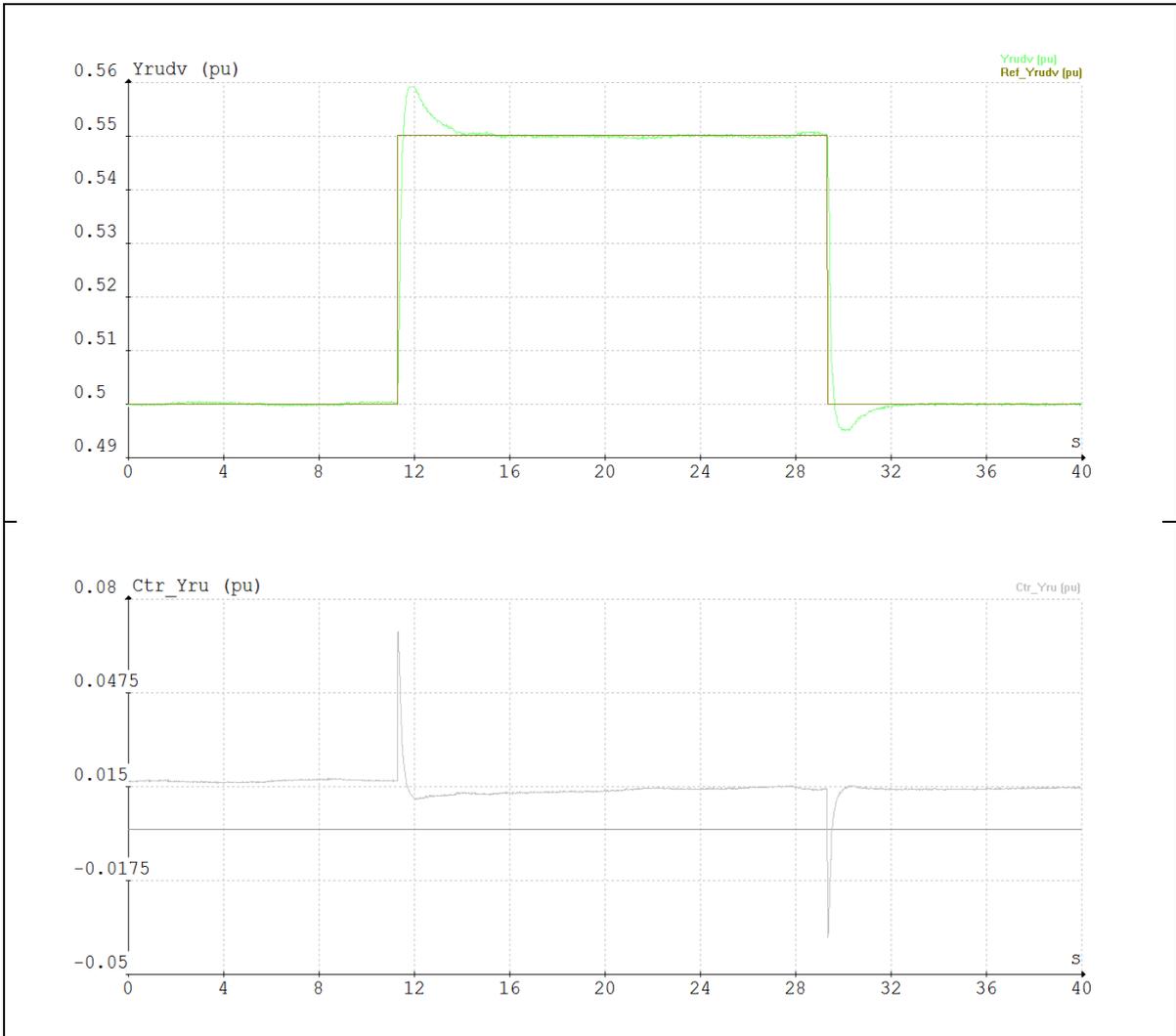
As Figuras 42 e 43 demonstram o resultado dos ajustes da dinâmica dos controladores das válvulas distribuidoras. Esses ajustes foram realizados conforme o procedimento descrito no item 8.5.1.

Figura 42: Dinâmica da válvula distribuidora do distribuidor.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 43: Dinâmica da válvula distribuidora do Kaplan.



Degrau 5%

Tempo de subida: 310 ms

Sobre sinal: 18% em relação ao degrau

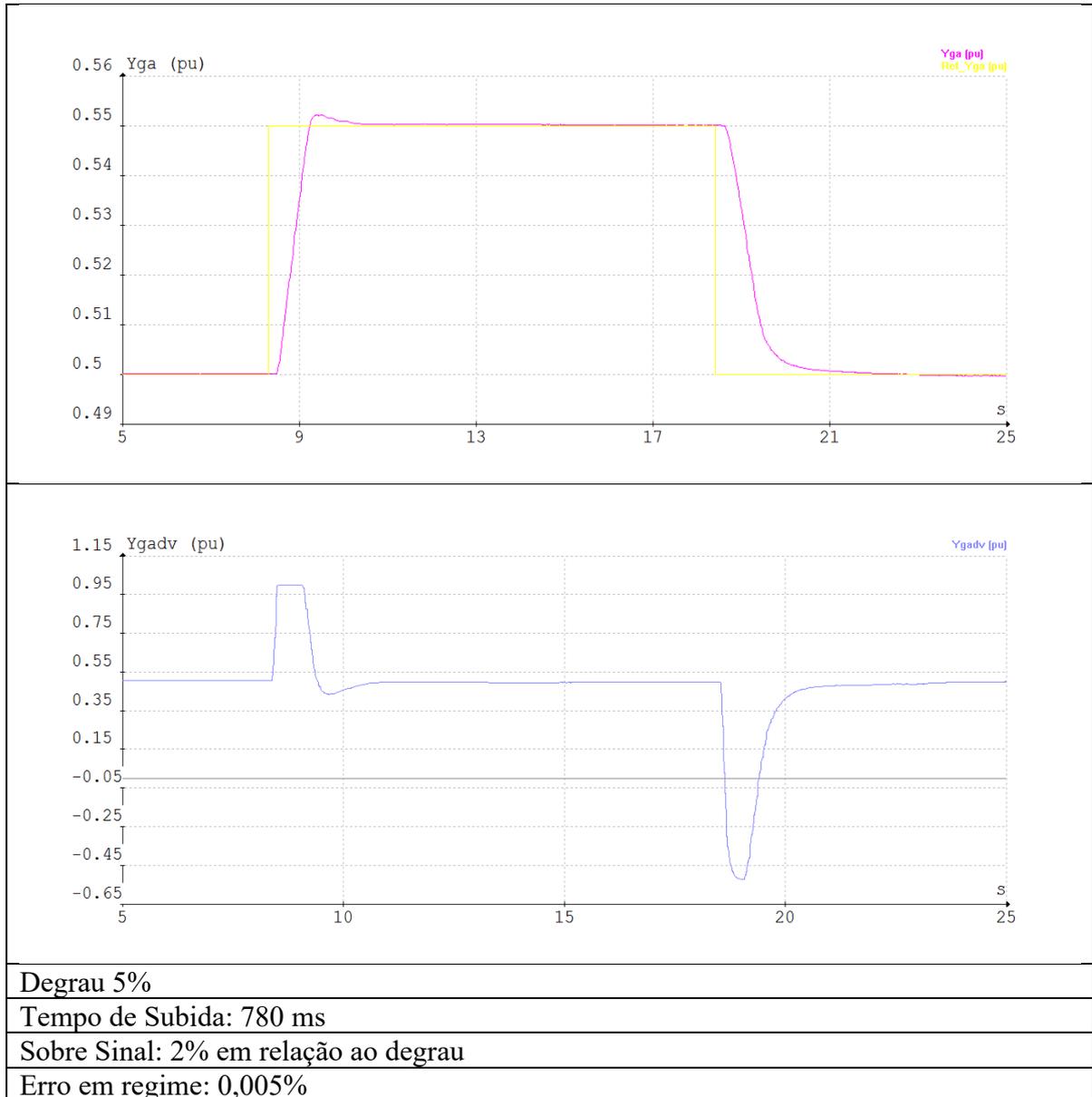
Erro em regime: erro zero em regime permanente

Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Ajustes da dinâmica dos atuadores**

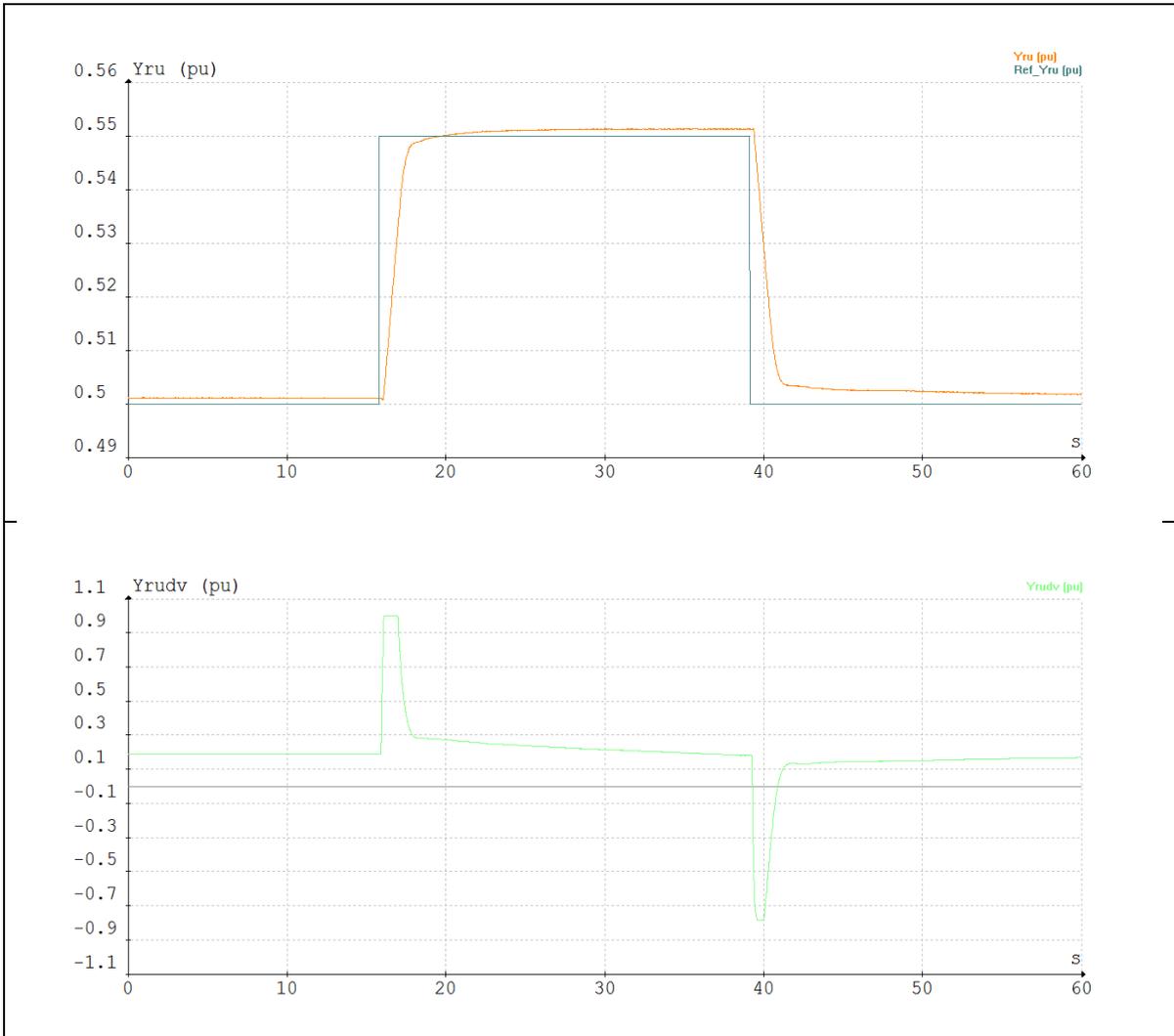
As Figuras 44 e 45 apresentam, respectivamente, a dinâmica dos atuadores do distribuidor e Kaplan, onde se pode perceber um leve sobressinal e um pequeno erro em regime o que satisfaz os requisitos do sistema.

Figura 44: Dinâmica do distribuidor: degrau 5%.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 45: Dinâmica do Kaplan: degrau 5%.



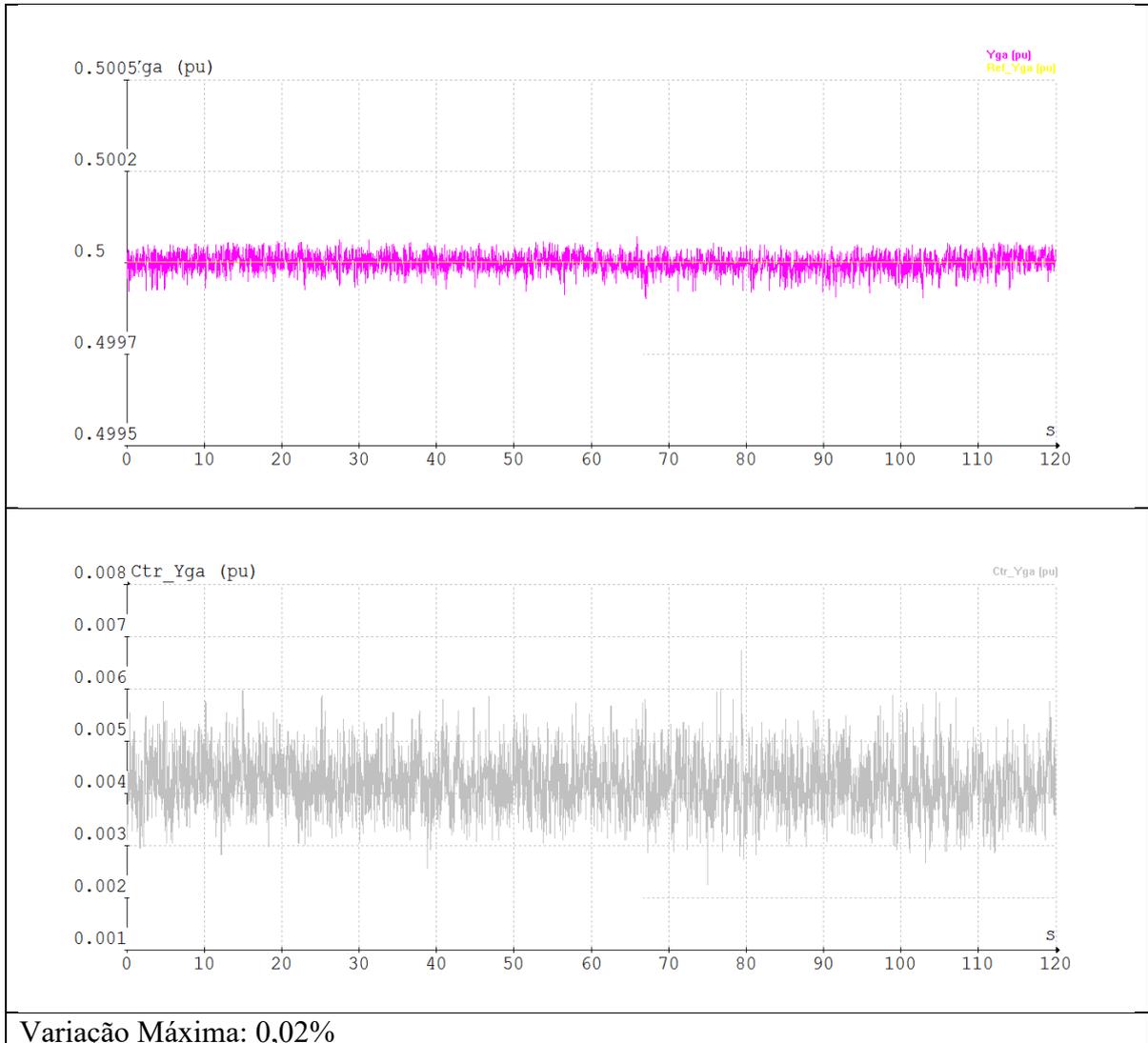
Degrau 5%
Tempo de Subida: 1,54 s
Sobre Sinal: sem sobre sinal
Erro em regime: 0,1%

Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Regime dos atuadores**

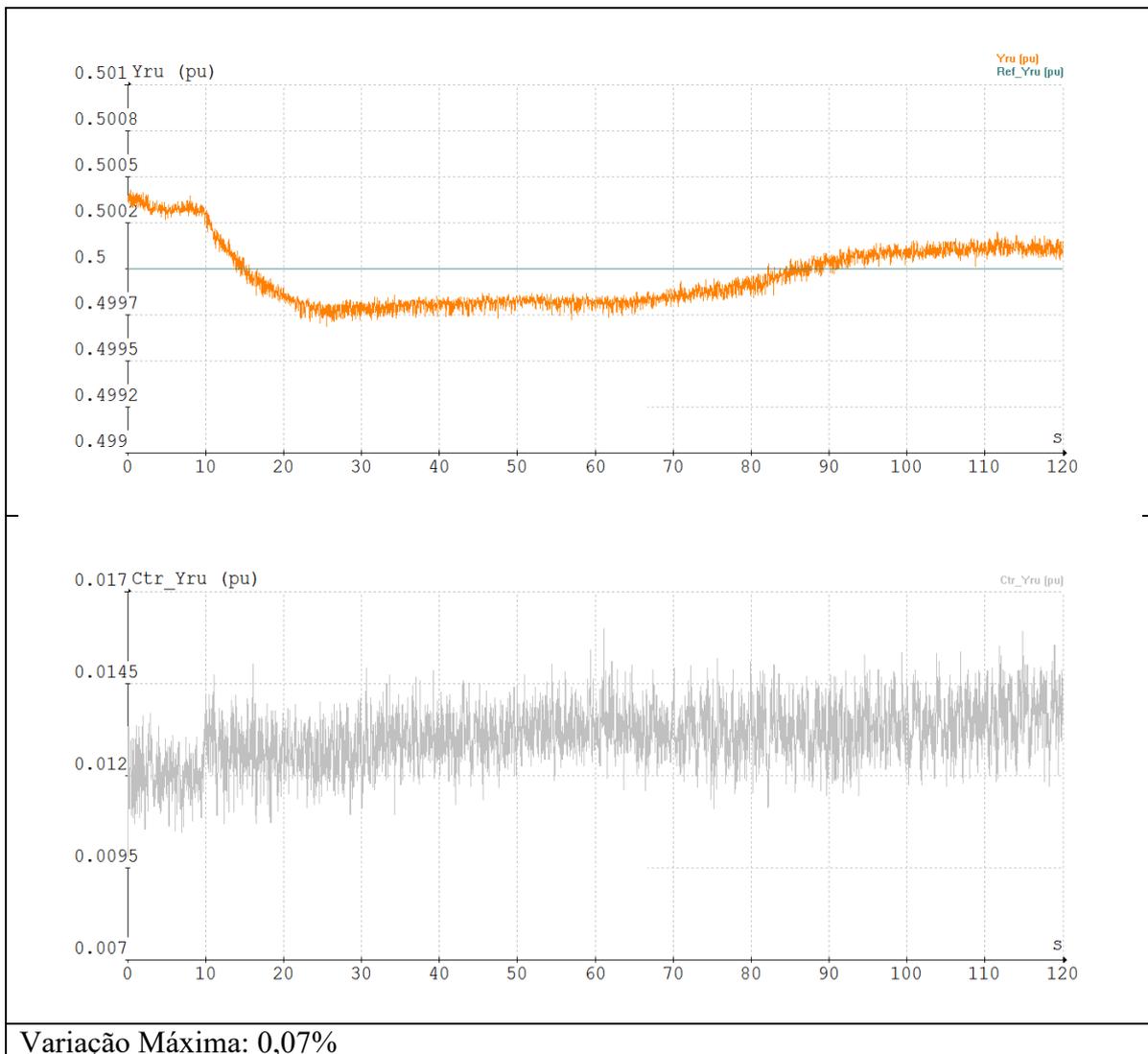
Manter os atuadores operando em regime permanente se faz necessário para verificar a dinâmica em regime de estabilidade. As Figuras 46 e 47 demonstram a operação do distribuidor e Kaplan em regime permanente, onde se pode verificar uma baixa variação (menor que 0,1%).

Figura 46: Regime do Distribuidor.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 47: Regime do Kaplan.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

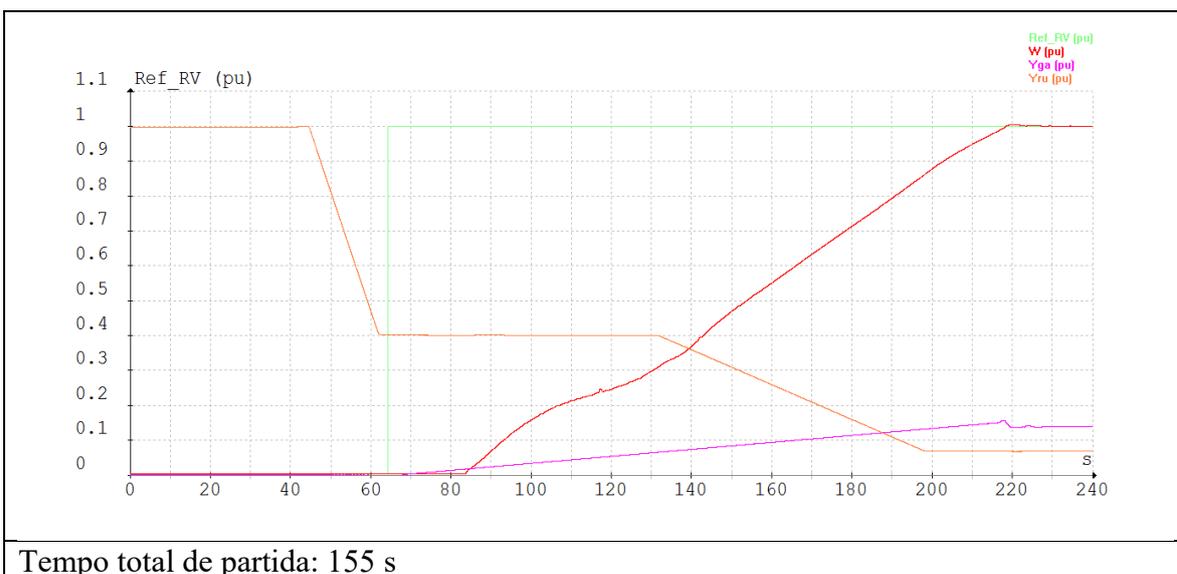
11.2. ENSAIOS DINÂMICOS À VAZIO

Durante os ensaios dinâmicos, vários registros foram feitos a fim de verificar e ajustar a malha de controle do regulador.

- **Partida e parada automáticas**

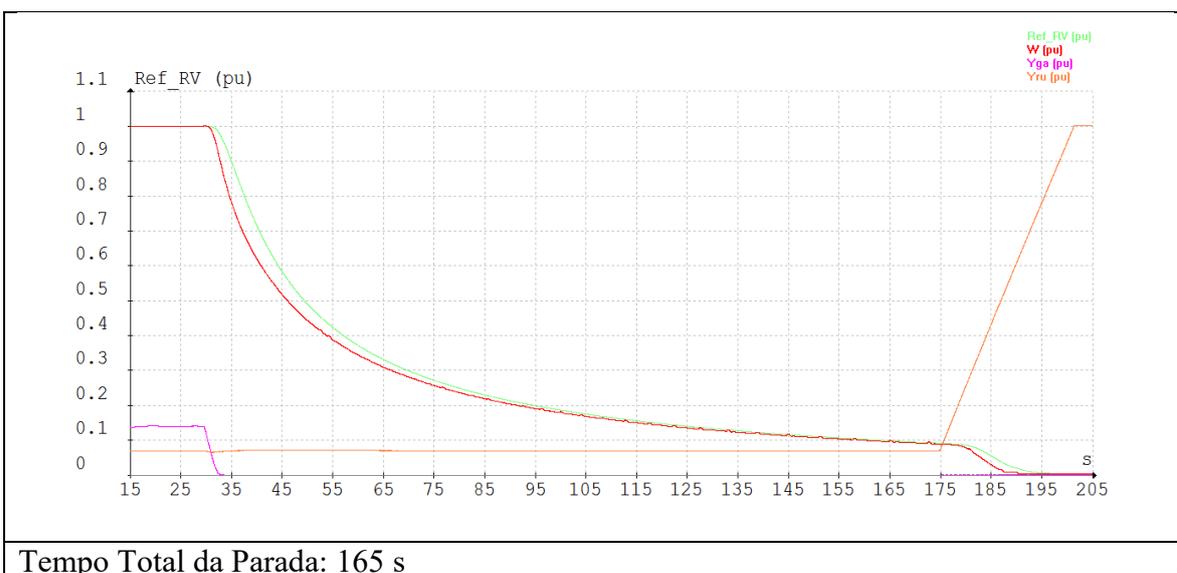
Em se tratar de uma máquina pesada, a partida deve ser feita de forma lenta para que o torque mecânico não danifique os acoplamentos. Outra situação em que a partida deve ser lenta é na época de piracema, onde os peixes tendem a ocupar a descarga da turbina. As Figuras 48 e 49 demonstram a partida e parada da turbina em condições normais, a parada se dá pela inércia do movimento até aplicação dos freios, onde ocorre uma desaceleração maior.

Figura 48: Partida automática.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 49: Parada automática.

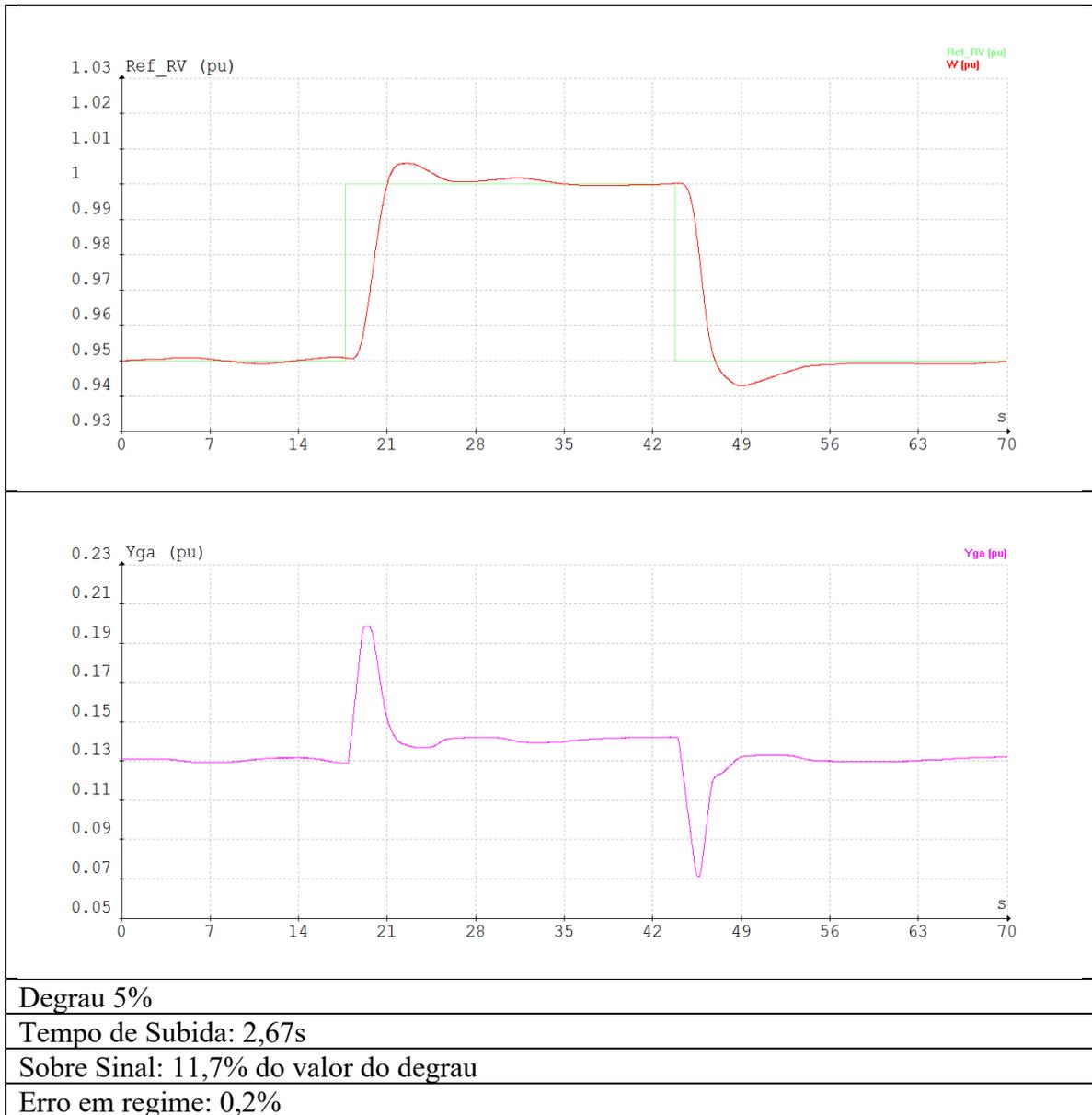


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Ajuste da malha de velocidade**

O ajuste da malha de velocidade é realizado conforme abordado no item 9.4 e pode ser comprovado na Figura 50. Como resultado percebe-se uma evolução estável, baixo sobressinal e a ocorrência de poucas oscilações no distribuidor.

Figura 50: Ajuste da malha de velocidade.



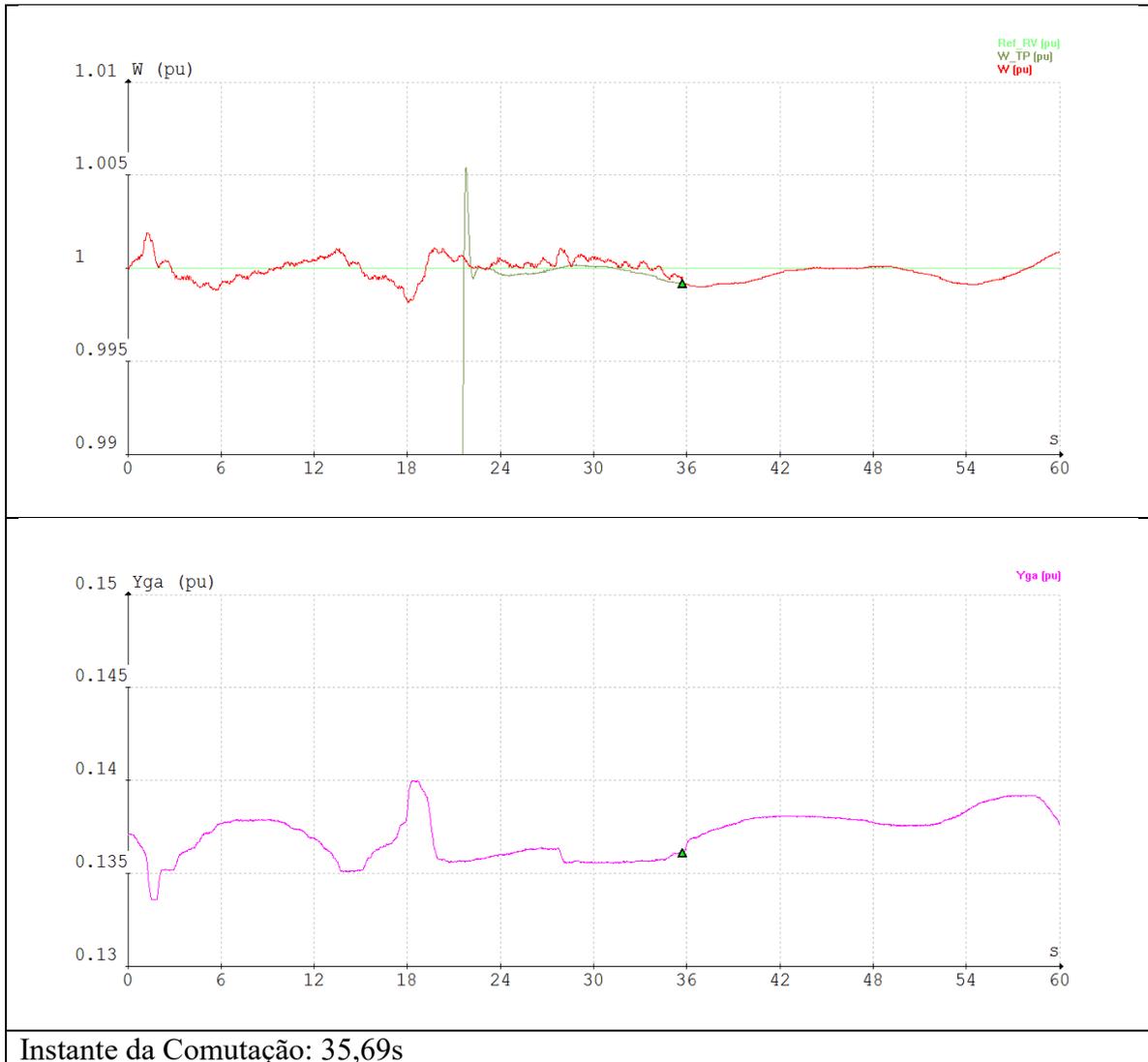
Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Comutação Pick-Up's – TP**

A medição de velocidade por pick-up's é de extrema importância na partida da turbina e em casos que a máquina síncrona tenha um baixo valor de indução magnética remanente, impossibilitando a medição por TP. A Figura 51 demonstra a comutação entre as duas medições, seja de forma intencional ou por falha.

Normalmente a medição principal é por TP, mas na partida e até aproximadamente 70% da velocidade nominal a medição é feita por Pick-Up's.

Figura 51: Ajuste da malha de velocidade: Comutação Pick-Up's – TP.

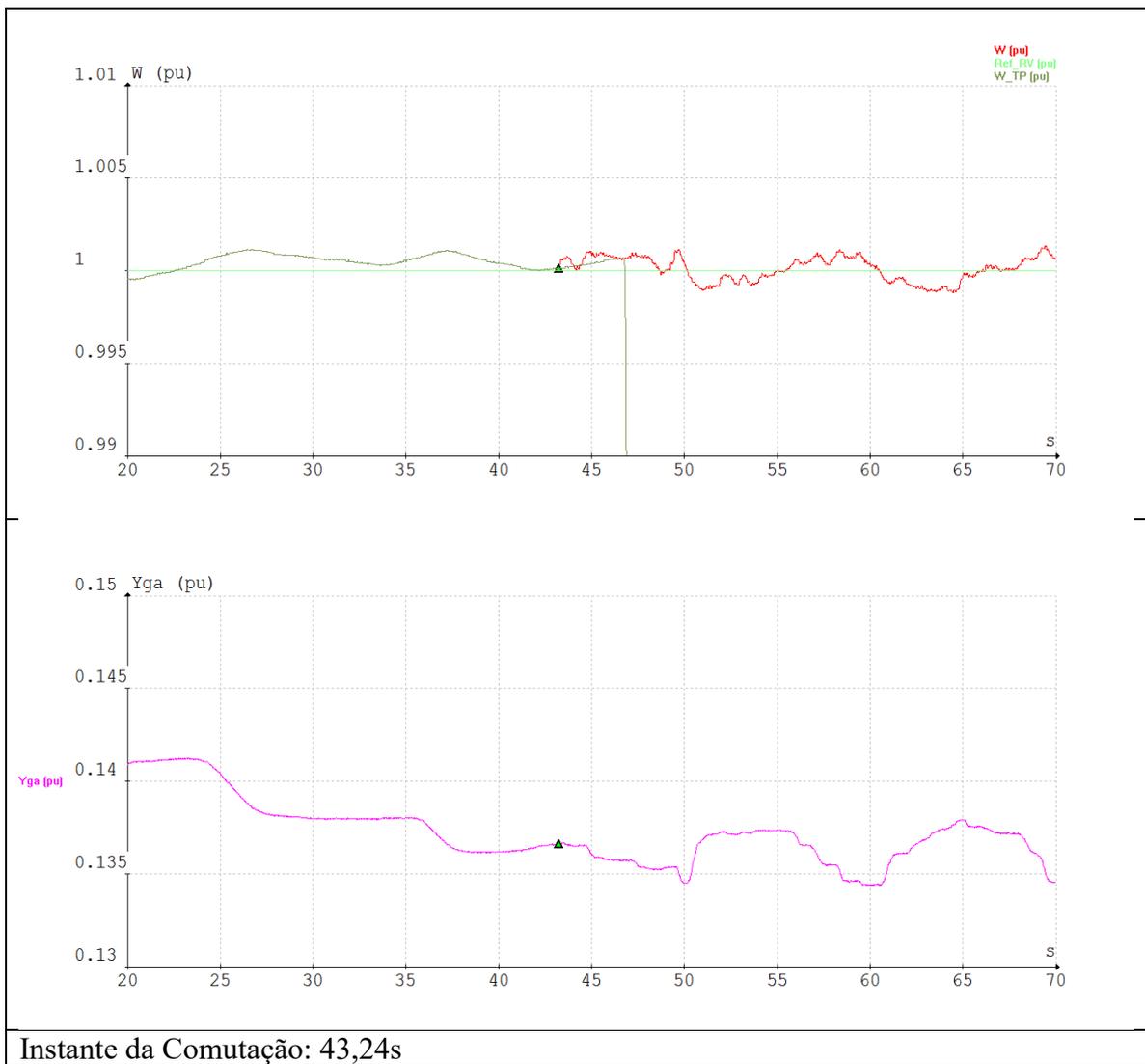


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Comutação TP – Pick-Up's**

A Figura 52 apresenta a comutação entre as medições de velocidade por TP para Pick-Up's. Tal comutação pode ter sido de forma intencional por meio de falha de medição por TP. Normalmente a medição por TP é menos ruidosa do que a medição por Pick-Up's e é a principal medição de velocidade do regulador.

Figura 52: Ajuste da malha de velocidade: Comutação TP – Pick-Up's.

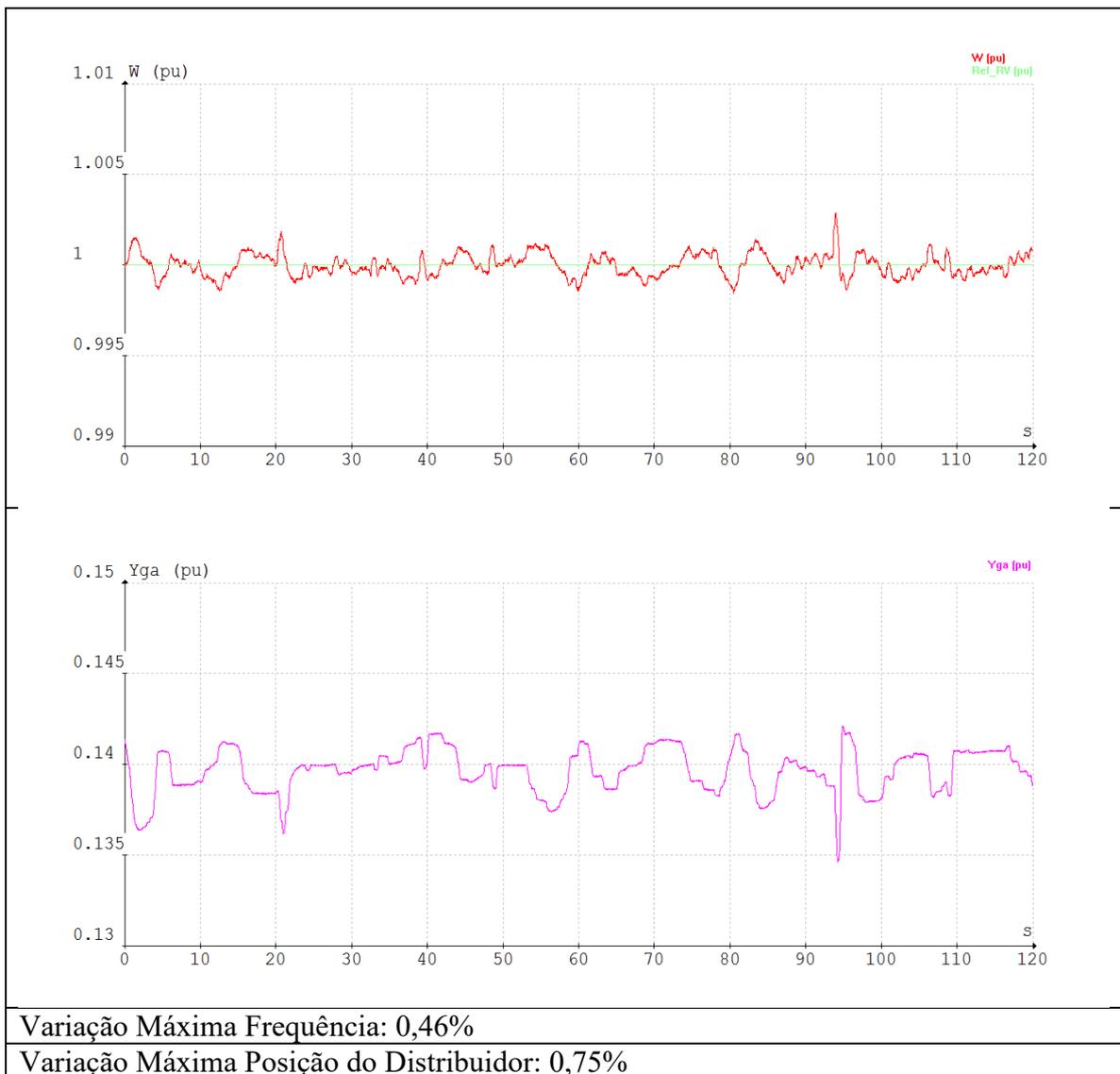


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Controle de velocidade em regime permanente**

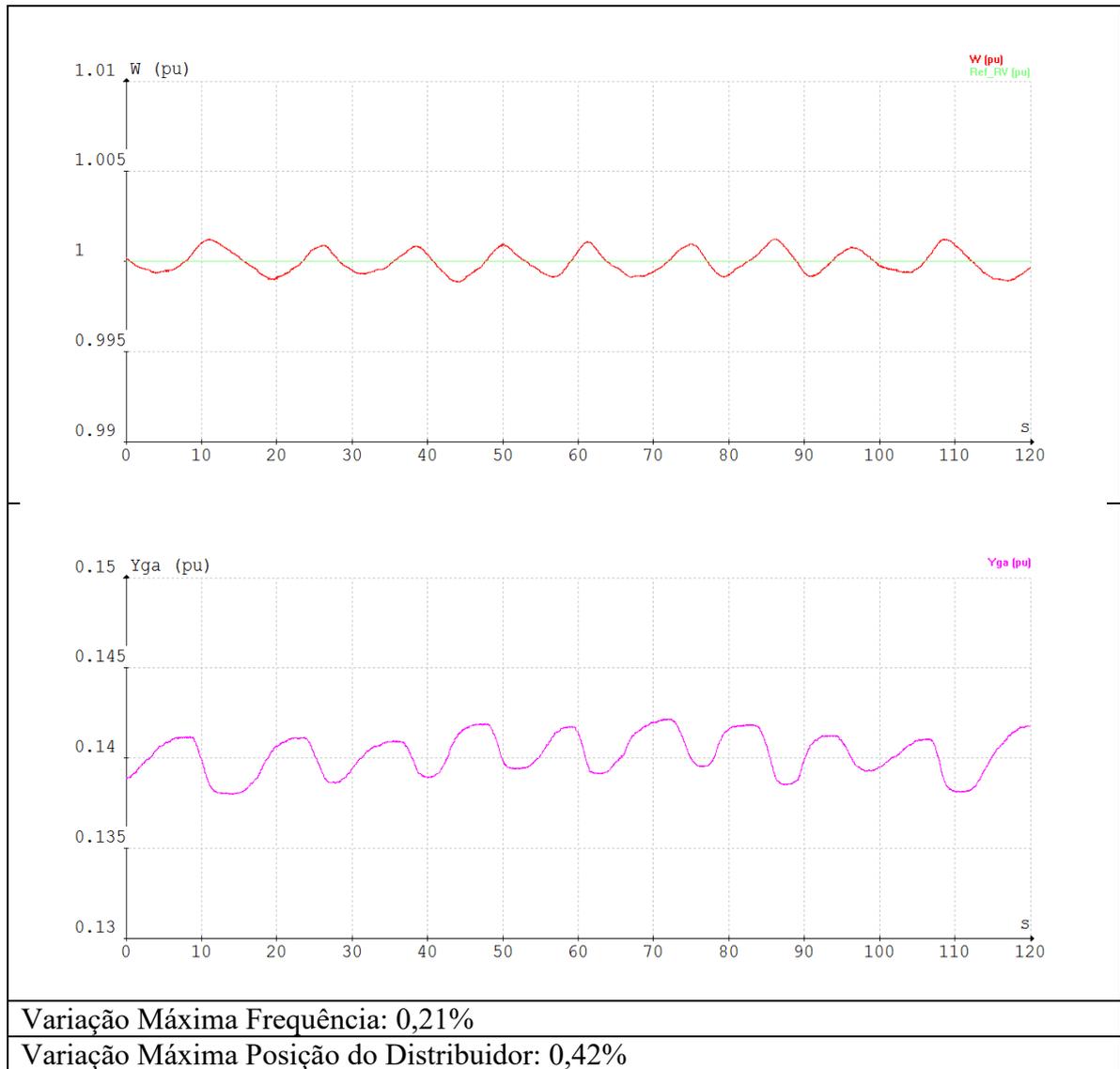
Nas Figuras 53 e 54 demonstram a estabilidade do sinal de velocidade em regime permanente. É possível perceber uma leve variação menor do que 0,5%, o que mostra um bom controle em regime permanente. Outra característica que chama a atenção é o ruído inserido na medição por Pick-Up's, o que não impede uma boa atuação do controlador de velocidade.

Figura 53: Estabilidade em regime permanente Pick-up's.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 54: Estabilidade em regime permanente TP.

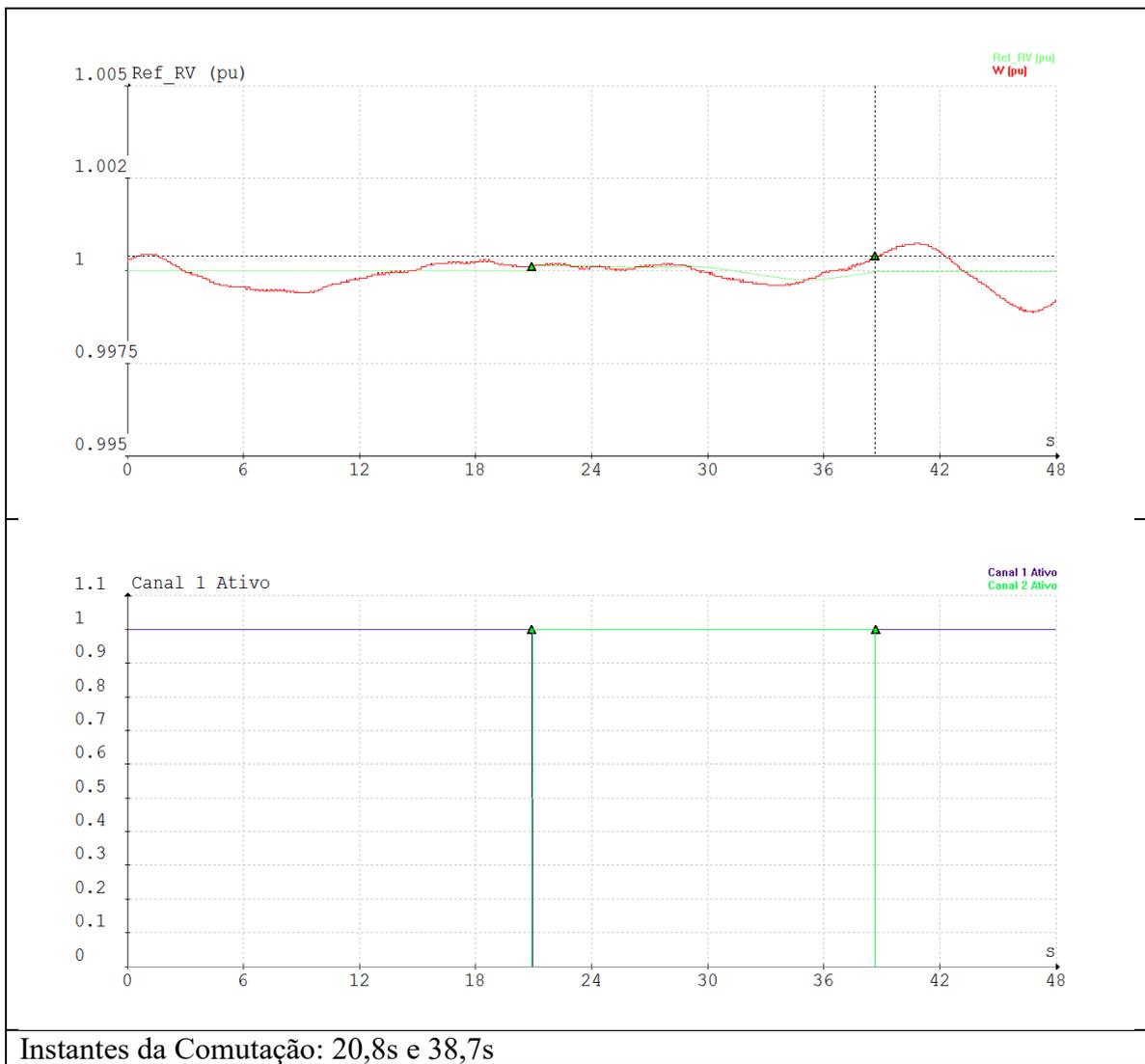


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Comutação de canal**

Uma comutação de canal suave e sem distúrbios é muito importante para a operação do regulador e turbina. Ela garante uma redundância, em caso de falha de hardware, isto é, a turbina não parará até que não se tenha pelo menos um canal ativo e íntegro. Com essa comutação é possível que a manutenção interfira no canal em falha sem perda de geração da unidade. A Figura 55 comprova a comutação de forma estável e rápida.

Figura 55: Comutação de canal a vazio.

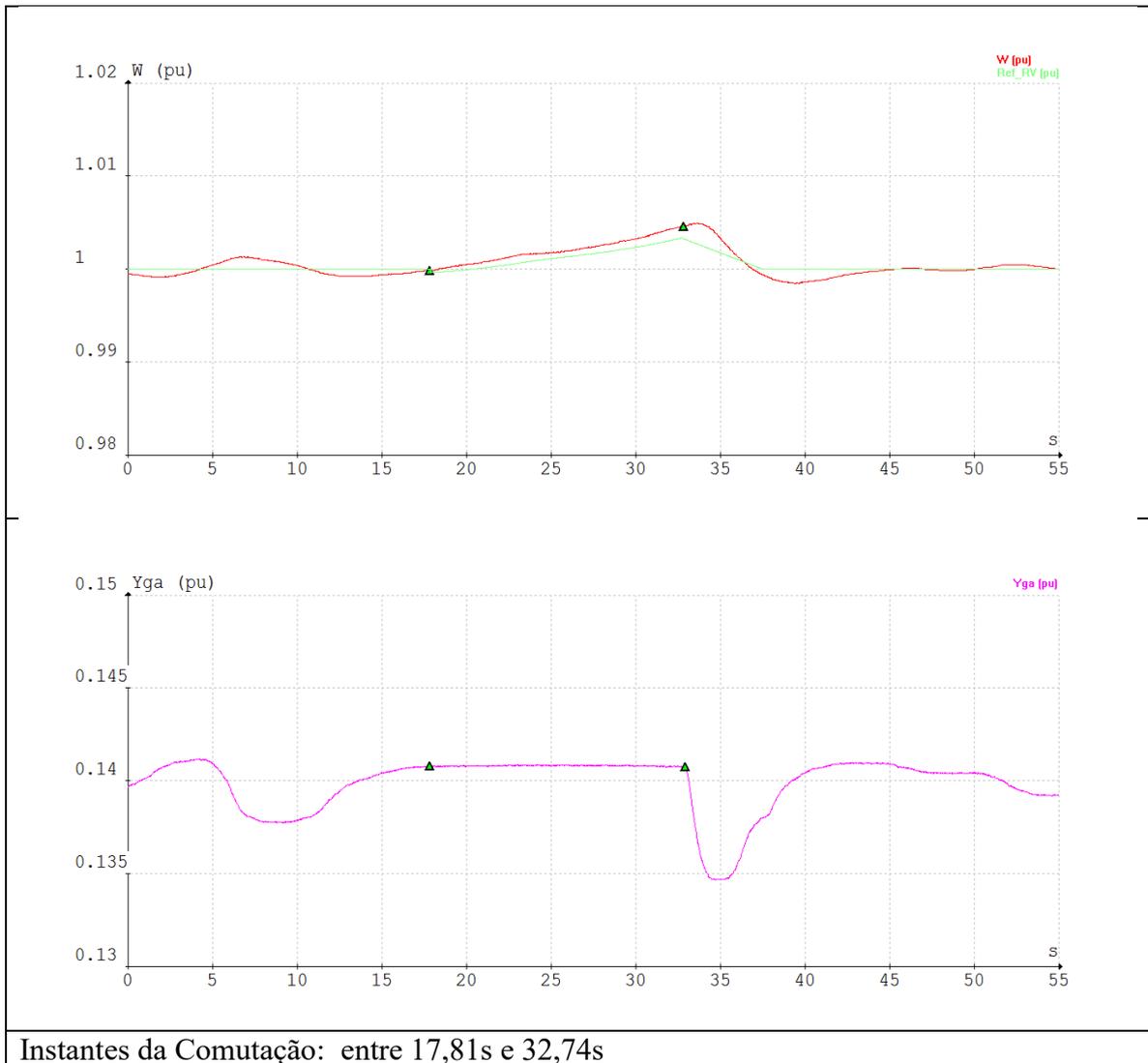


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Comutação entre o modo normal e manutenção**

O modo de manutenção é bastante utilizado para a solução de problemas de posicionamento dos atuadores. Com ele é possível partir a turbina de forma manual, ou seja, sem usar o laço fechado de controle para assim ser possível identificar roçamentos entre partes móveis e ou girantes, desbalanceamento e vários outros testes. A Figura 56 mostra o modo de manutenção em atuação e nota-se que o atuador não se movimenta enquanto o modo está ativado.

Figura 56: Comutação entre o modo normal e manutenção.

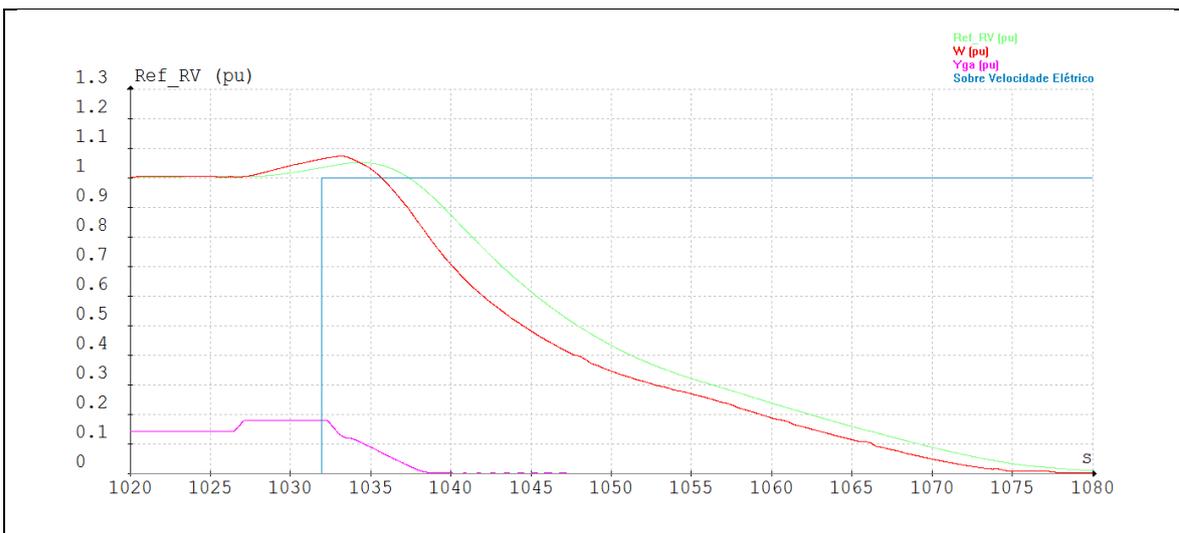


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Sobre velocidade elétrico**

Testar a atuação do sobre velocidade elétrico é de fundamental importância para a integridade da turbina, pois evita que a turbina atinja a velocidade de disparo onde pode ser muito prejudicial para as instalações e os colaboradores que lá se encontram. Na Figura 57 é possível verificar a atuação do sobre velocidade elétrico: ao atingir o patamar de 1,05 pu (patamar para teste) de velocidade, o regulador atua devido uma falha grave ao mesmo tempo que comanda o fechamento dos atuadores.

Figura 57: Atuação da sobre velocidade elétrico.

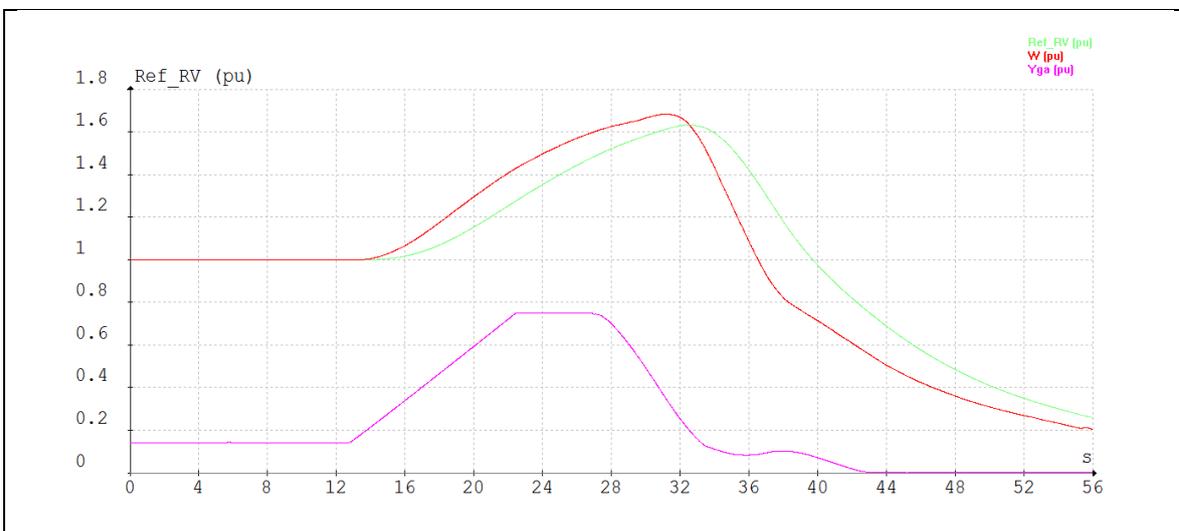


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Sobre velocidade mecânico**

A exemplo do sobre velocidade elétrico o sobre velocidade mecânico é muito importante para a integridade da turbina e segurança em geral. Este é o último recurso do sistema de regulação para evitar o disparo da turbina e atua diretamente nas válvulas hidráulicas de emergência, pilotando os atuadores para a posição de fechamento e em casos mais extremos provoca o fechamento das comportas. Na Figura 58 é possível verificar o momento de atuação da proteção em 1,6 pu, e o fechamento em taxa máxima do atuador.

Figura 58: Atuação sobre velocidade mecânico.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

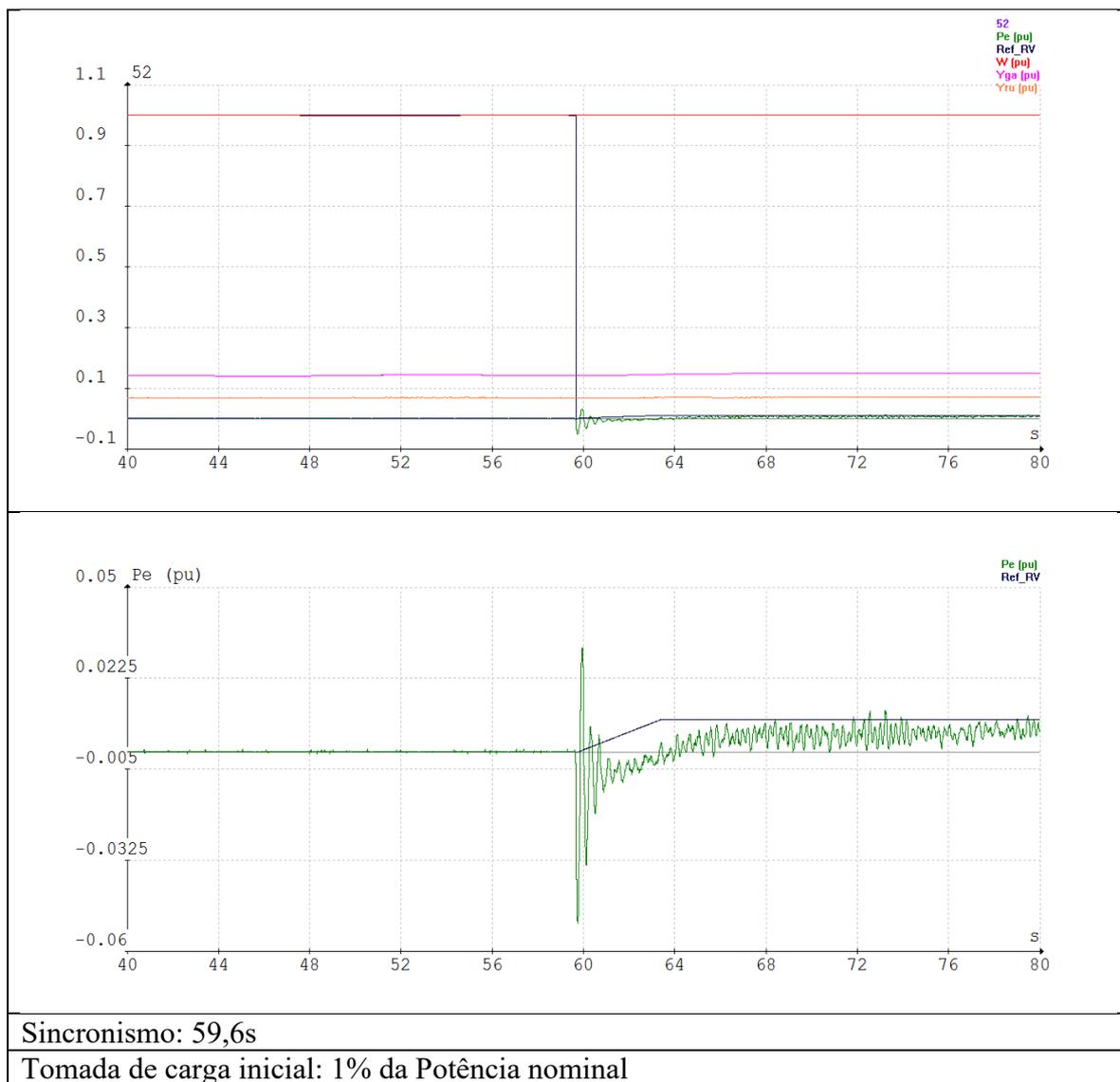
11.3. ENSAIOS DINÂMICOS EM CARGA

Neste ponto o conjunto turbina/ gerador é conectado ao sistema e passará a fornecer potência ativa e fornecer/ absorver potência reativa.

- **Sincronismo automático em controle de Potência**

A Figura 59 demonstra o sincronismo da unidade com o sistema. Tal sincronismo é feito de forma suave e com baixa tomada de carga, ficando assim disponível para um set point maior de potência.

Figura 59: Sincronismo Automático: Controle de Potência.

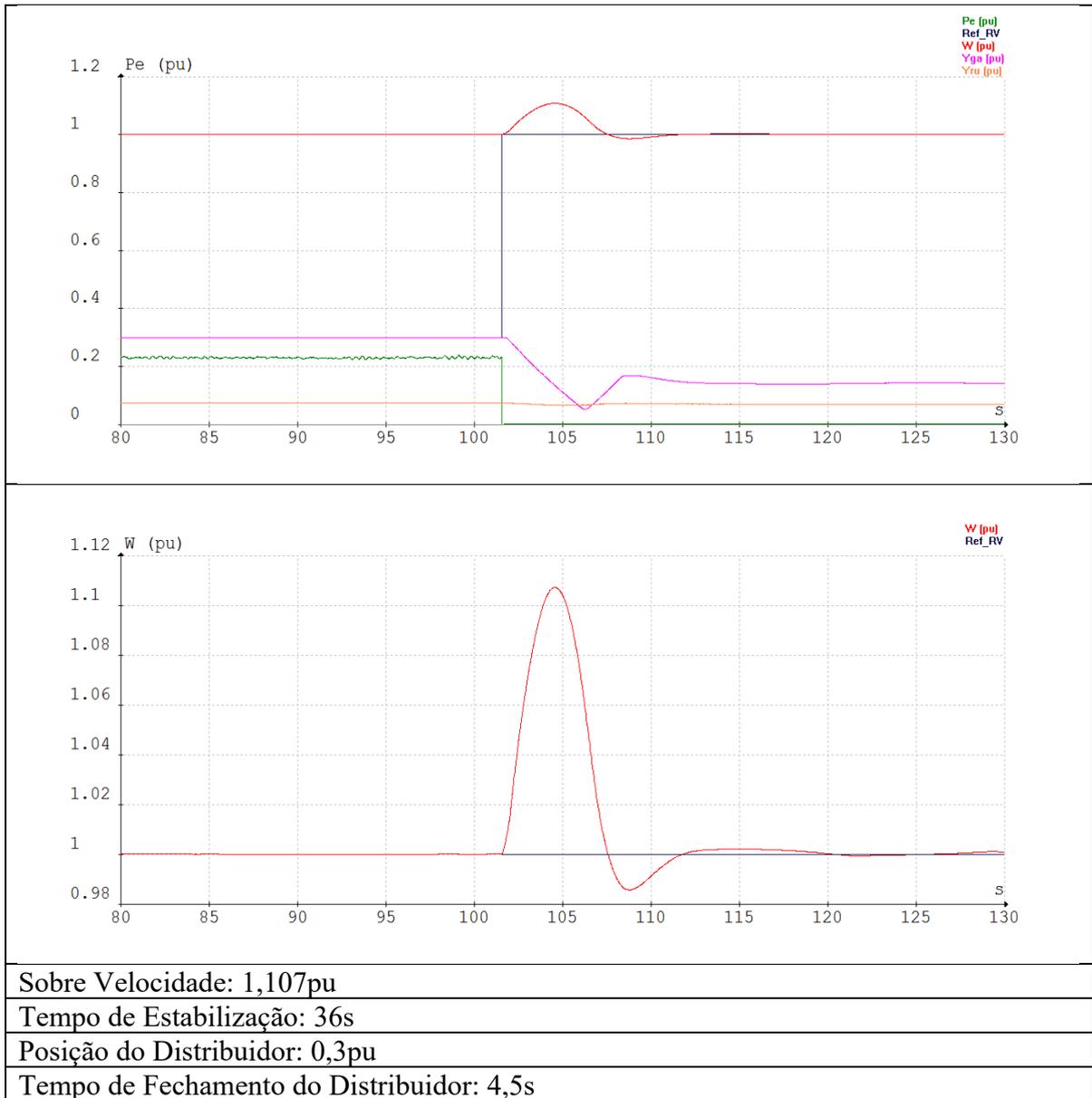


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Rejeições de carga**

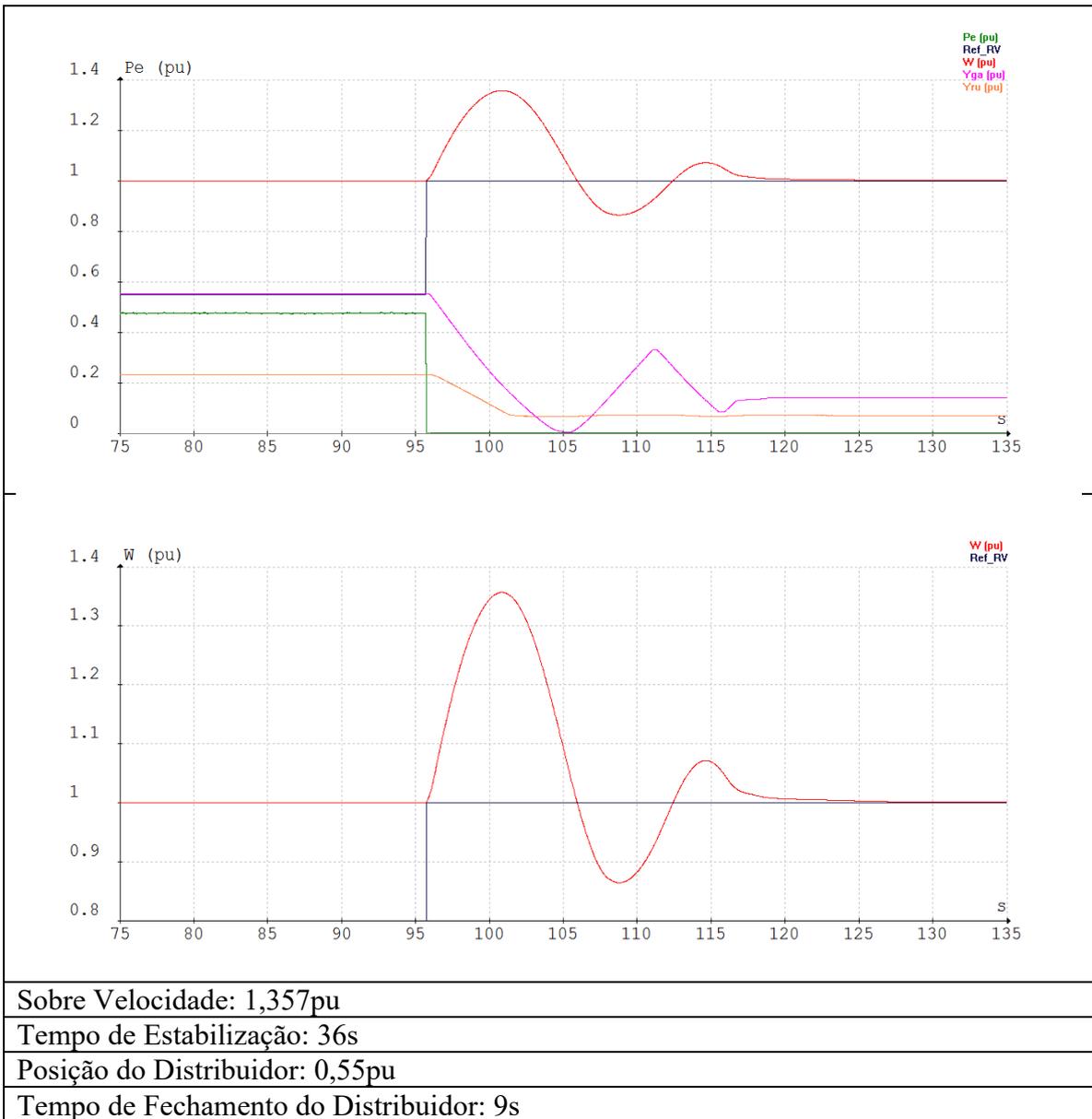
Nas Figuras 60, 61, 62 e 63 apresentam o comportamento do Regulador e turbina quando submetidos a uma série de rejeições de carga com níveis diferentes de potência. Percebe-se que em todas as rejeições executadas o Regulador se comporta de forma satisfatória fechando os atuadores de forma rápida durante o transitório e retornando à velocidade para o valor nominal.

Figura 60: Rejeição de carga com 25% de potência.



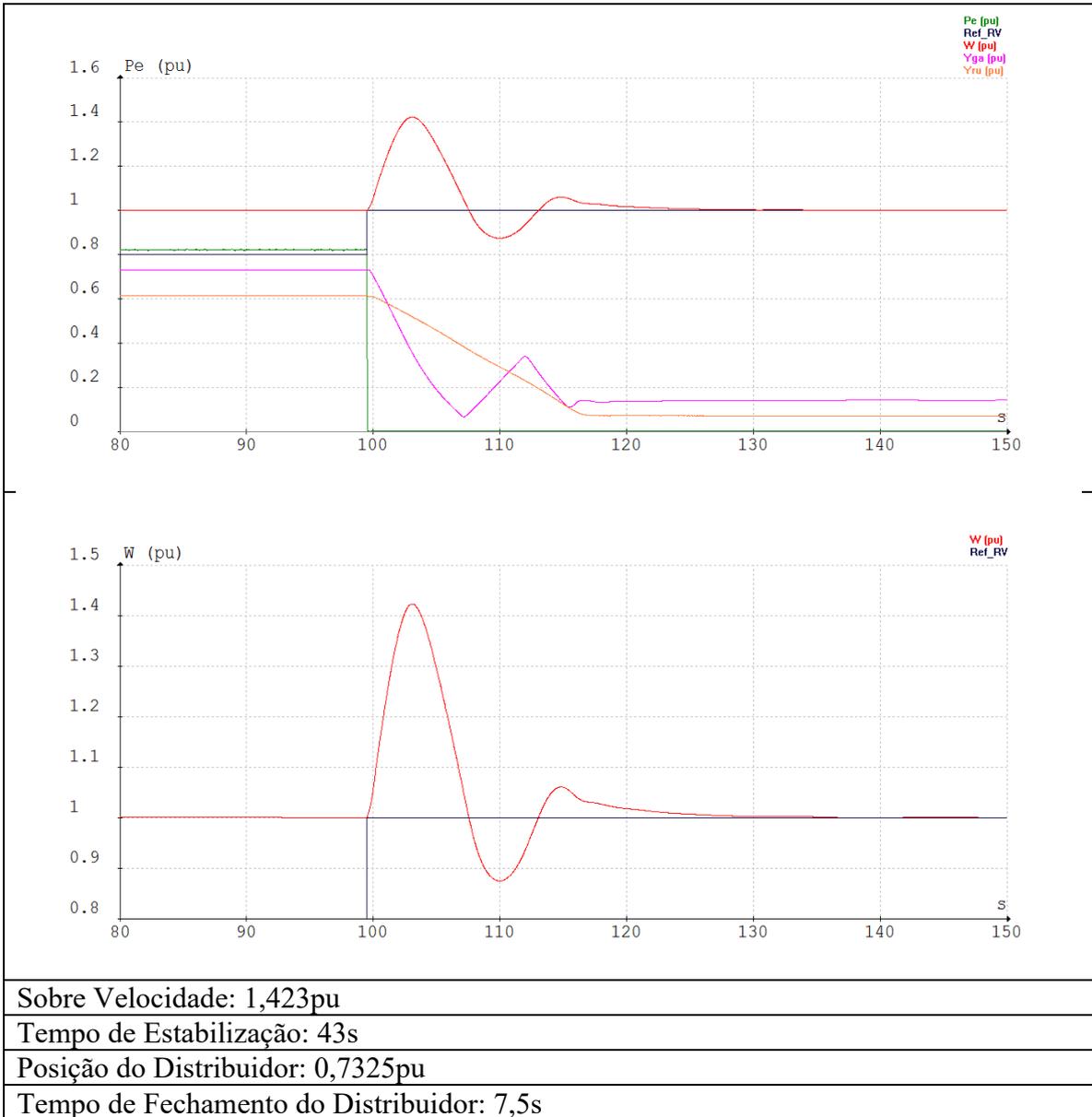
Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 61: Rejeição de carga com 50% de potência.



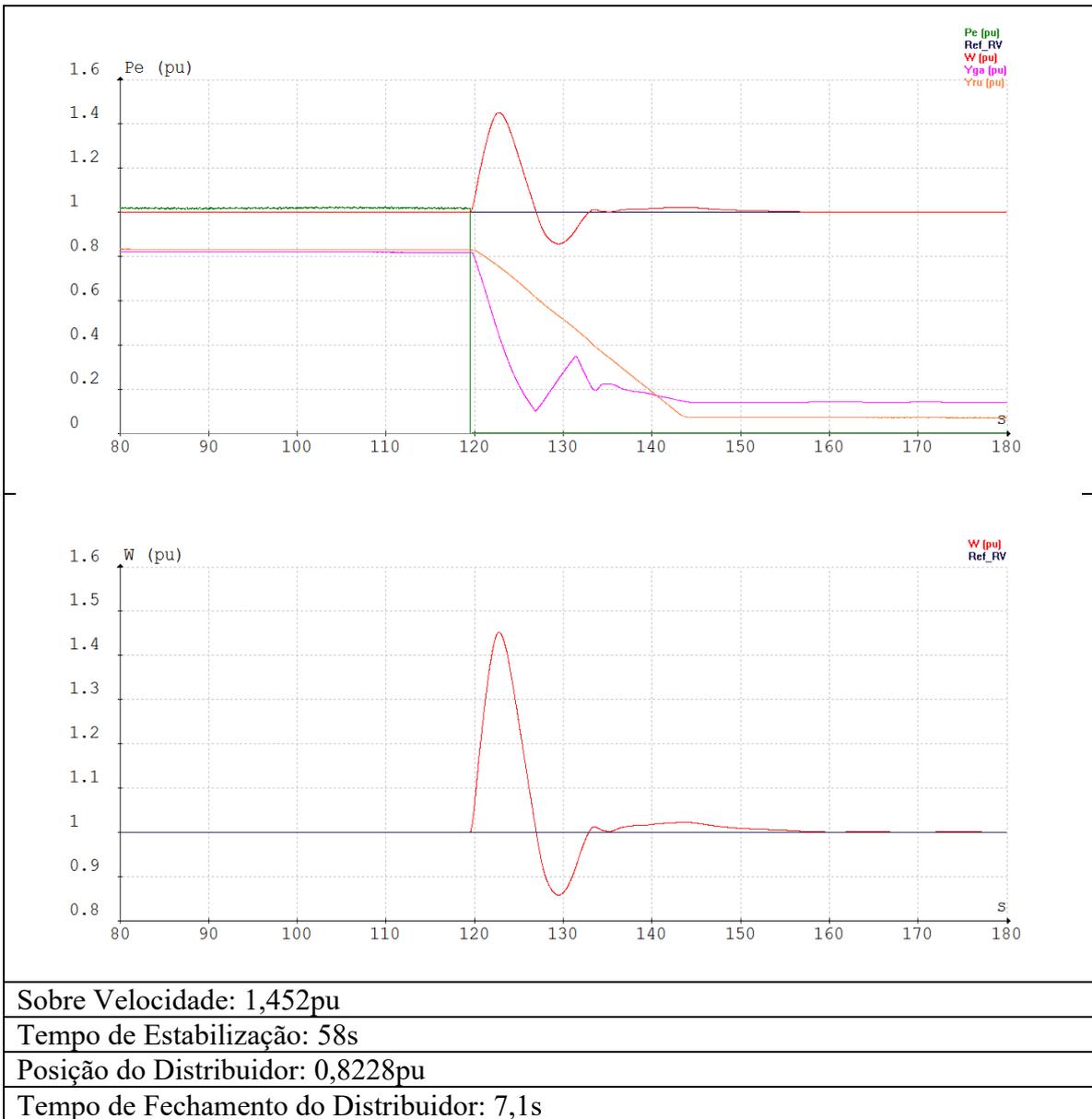
Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 62: Rejeição de carga com 75% de potência.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 63: Rejeição de carga com 100% de potência.

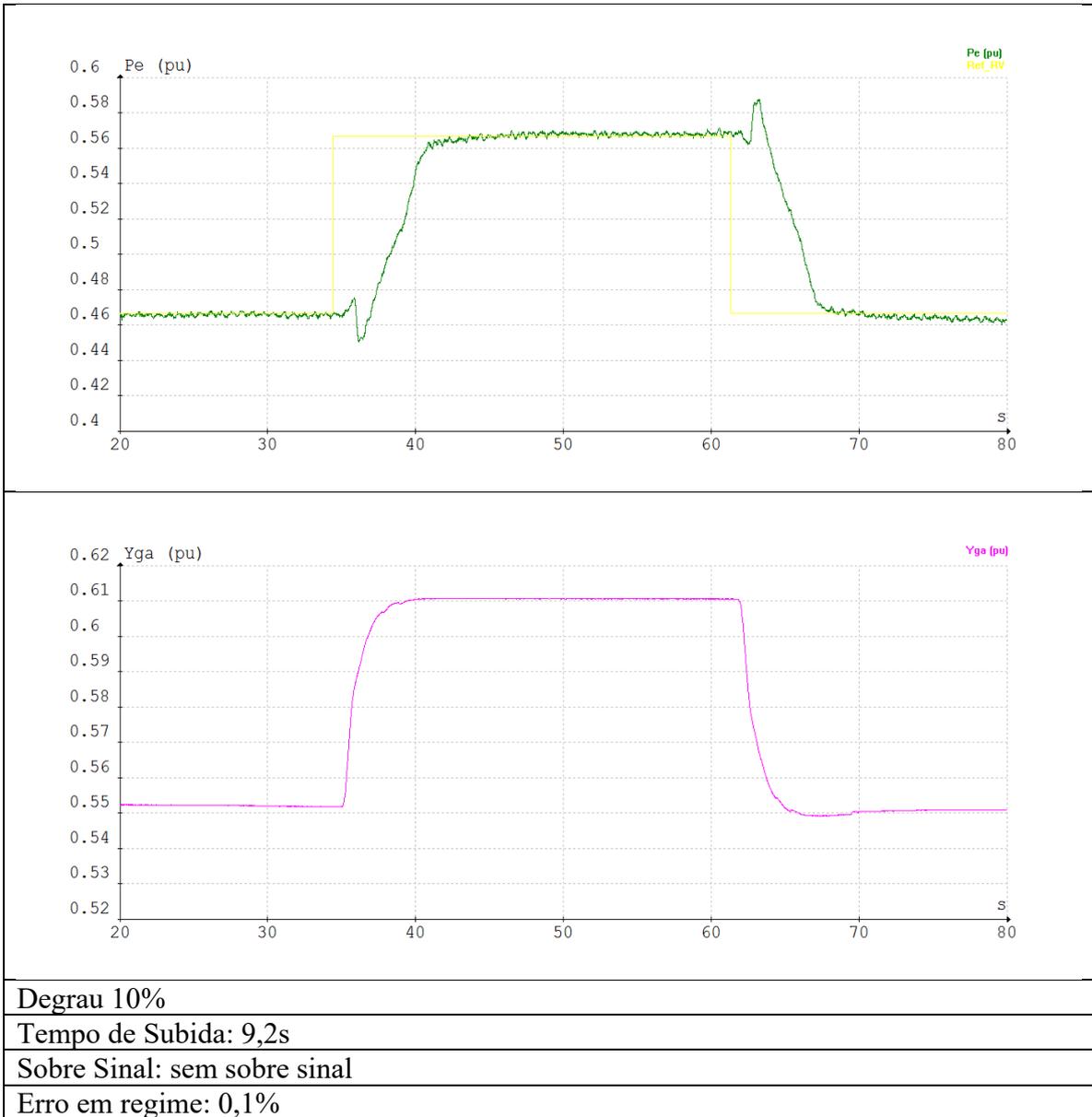


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Dinâmica controle de Potência**

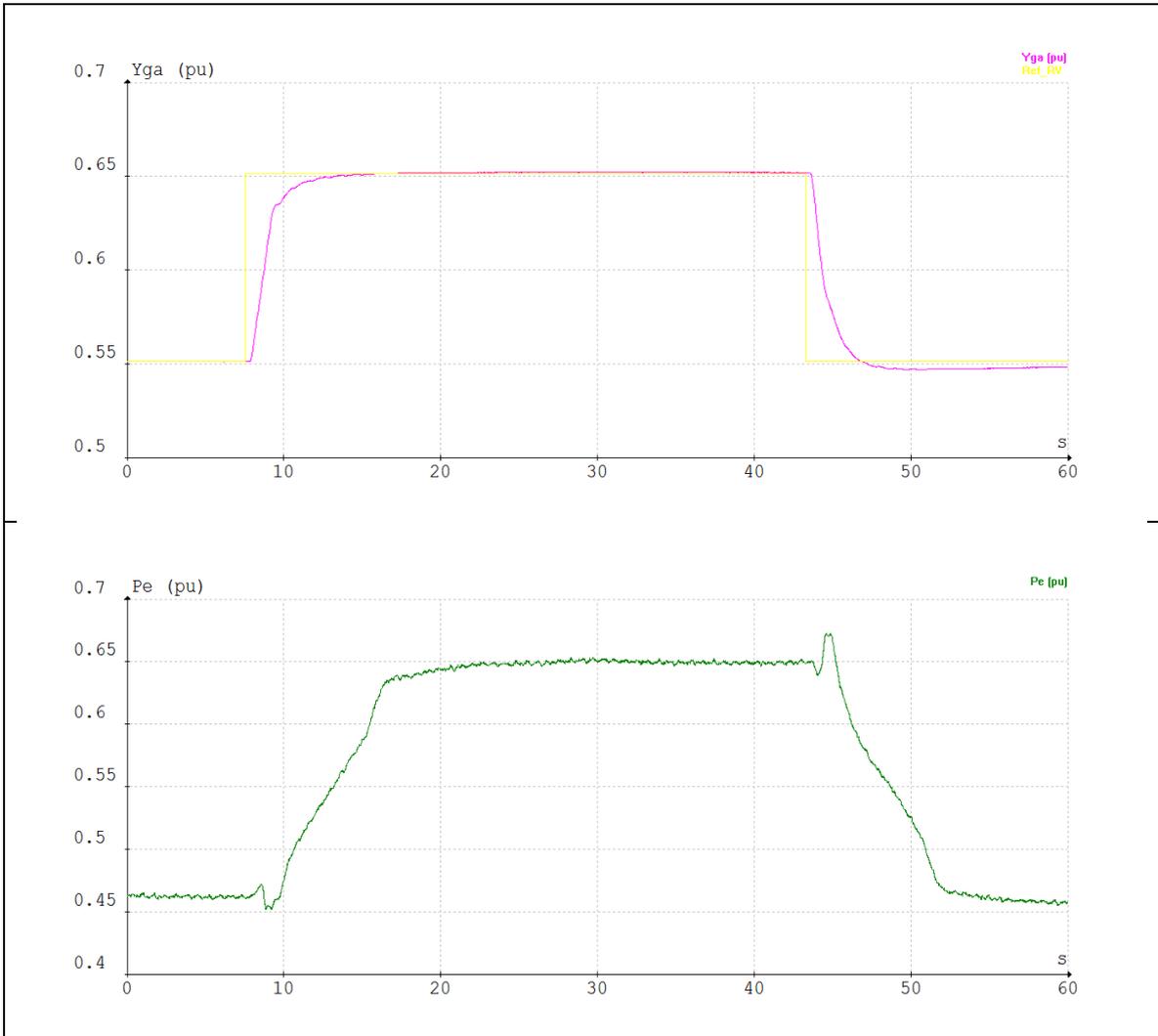
As Figuras 64 e 65 apresentam o resultado dos ajustes realizados na malha de potência abordados no item 10.6, cujo resultado apresenta um baixo erro em regime e pode-se verificar o efeito da coluna d'água.

Figura 64: Ajuste da dinâmica do controle de Potência.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 65: Ajuste da dinâmica do controle de Abertura.



Degrau 10%

Tempo de Subida: 8,2s

Sobre Sinal: sem sobre sinal

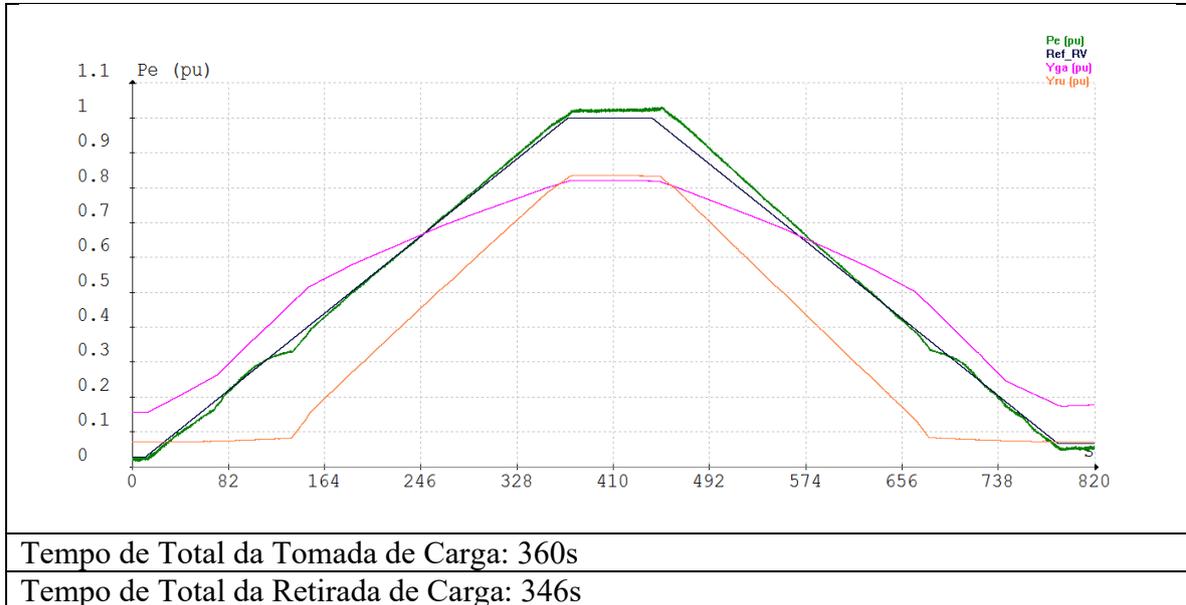
Erro em regime: Sem erro em regime

Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Tomada e Retirada de carga**

A Figura 66 apresenta a tomada e retirada de carga de forma lenta, em casos de parada normal ou apenas redução/ aumento de potência são executadas nessa taxa.

Figura 66: Tomada e Retirada de carga em controle de Potência.

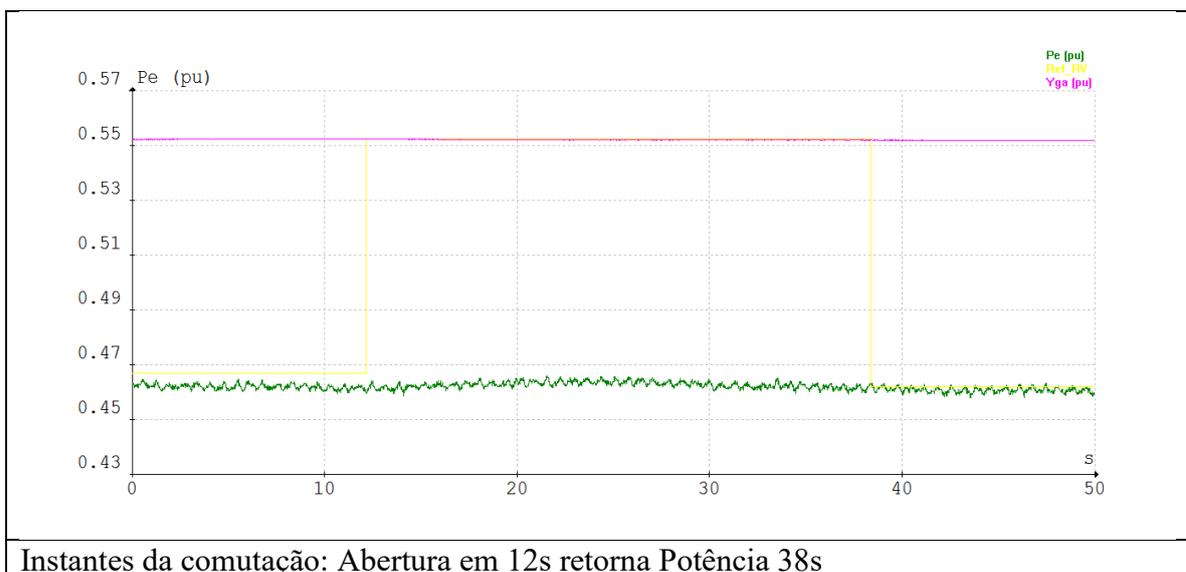


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Comutação do modo de controle**

Em carga são dois os modos de controle, potência e abertura. A Figura 67 apresenta a comutação entre os modos de controle. Primeiro de potência para abertura, e no instante seguinte de abertura para potência. É possível notar a referência do Regulador saindo de potência passando para abertura e na sequência retornando para potência. A comutação para abertura pode se dar por falha na medição de potência ativa, ou seja, perda na medição de tensão terminal ou de corrente terminal.

Figura 67: Comutação do modo de controle Potência – Abertura.

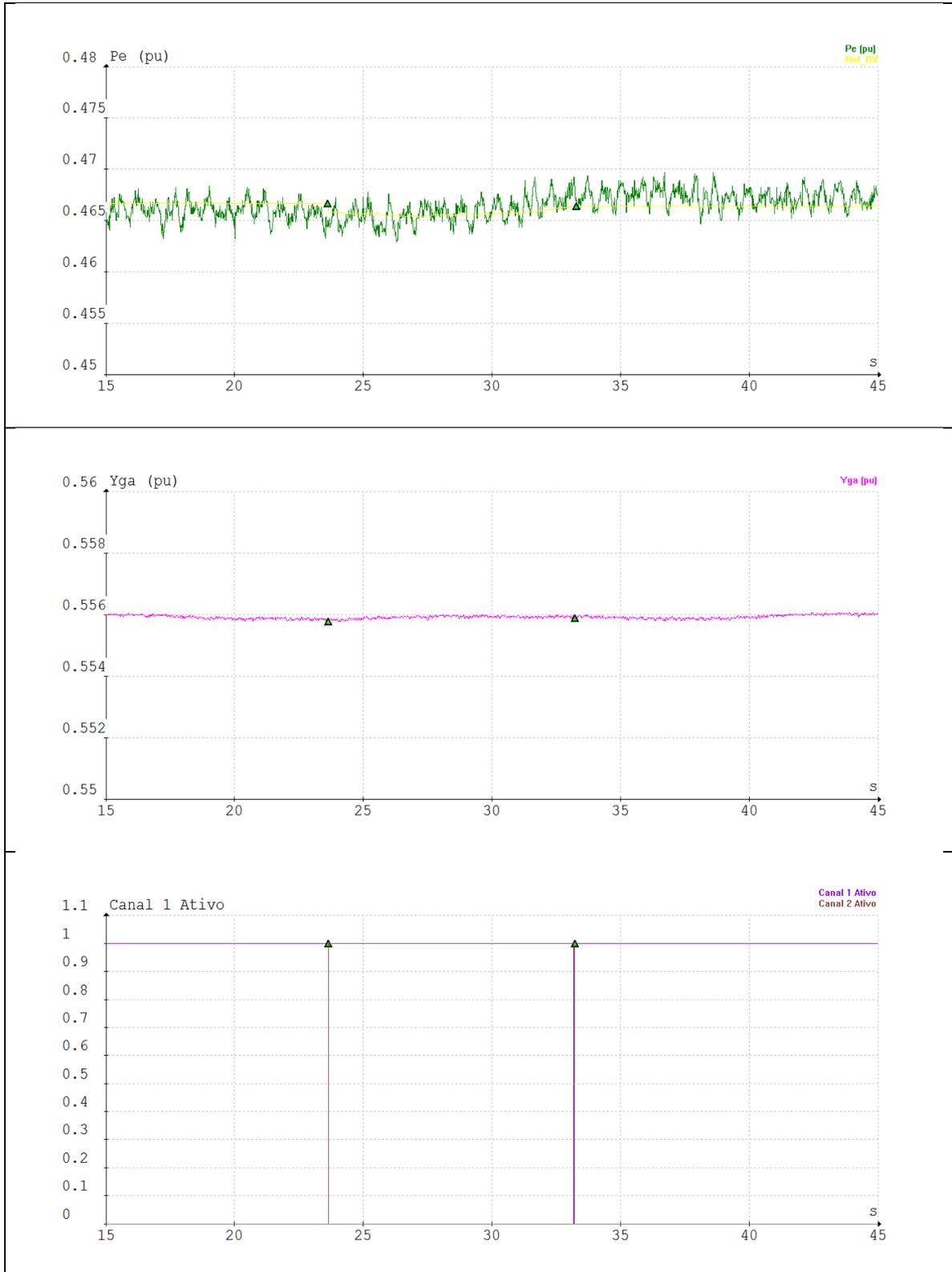


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Comutação de Canal em Carga**

A Figura 68 demonstra a comutação de canal em carga, a qual segue o mesmo princípio da comutação em vazio.

Figura 68: Comutação de canal em Carga.

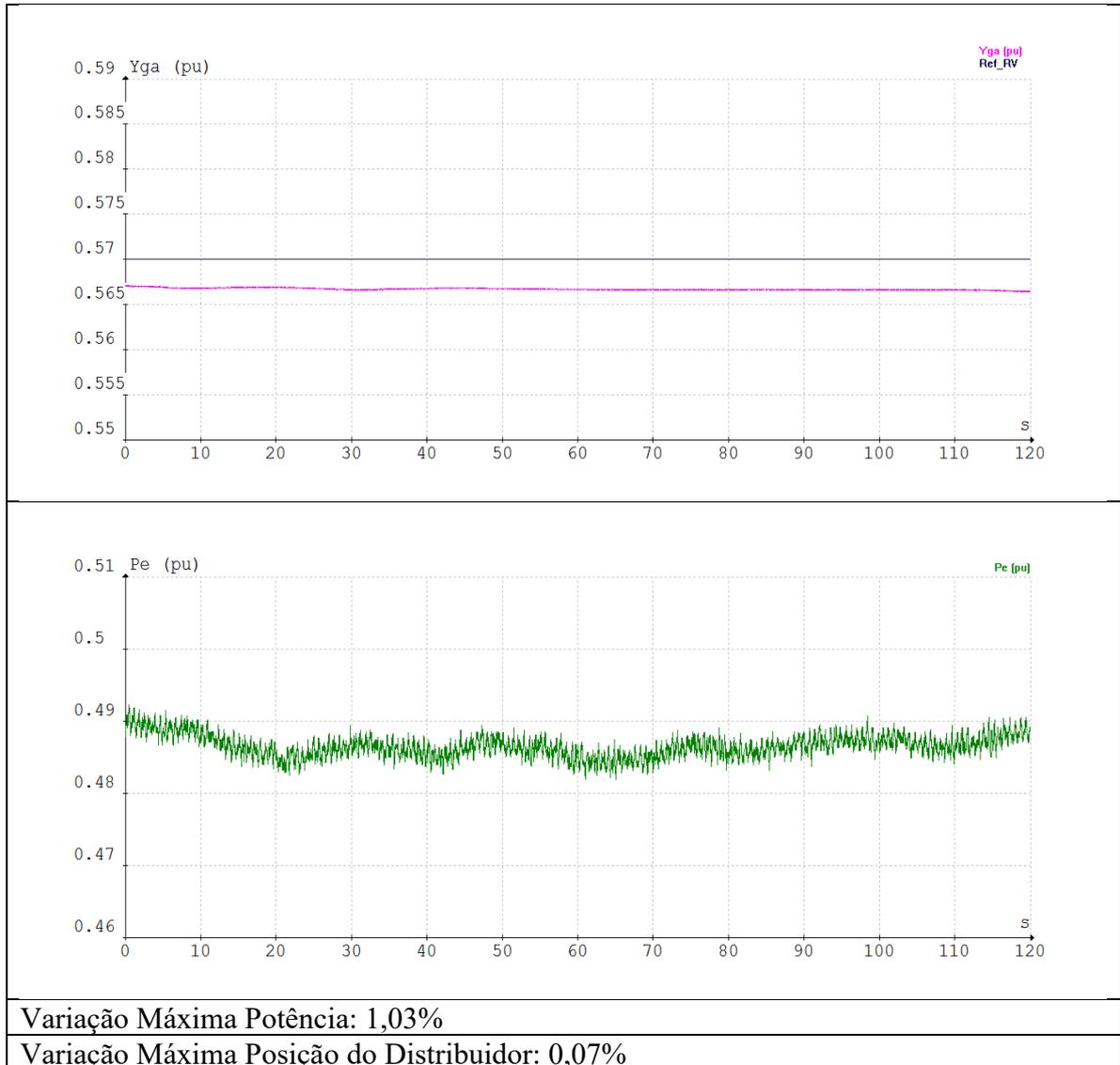


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Estabilidade em regime permanente**

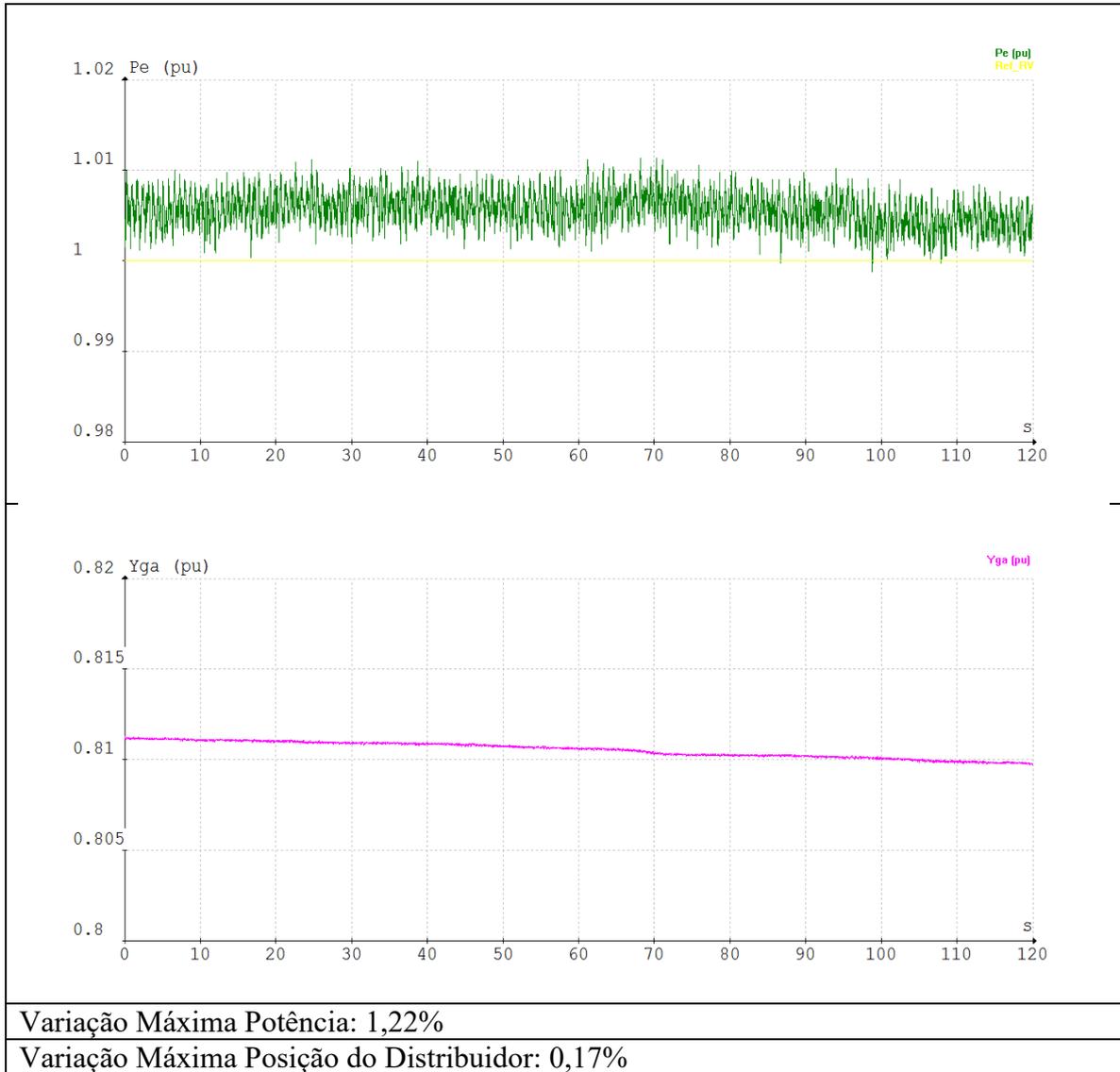
As Figuras 69 e 70 apresentam o regulador operando em regime de estabilidade, como se pode notar ocorre uma leve oscilação em torno da referência, seja ela potência ou abertura. Tal oscilação é considerada normal e não interfere na operação do Regulador.

Figura 69: Estabilidade em regime permanente Controle de abertura.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

Figura 70: Estabilidade em regime permanente Controle de Potência.

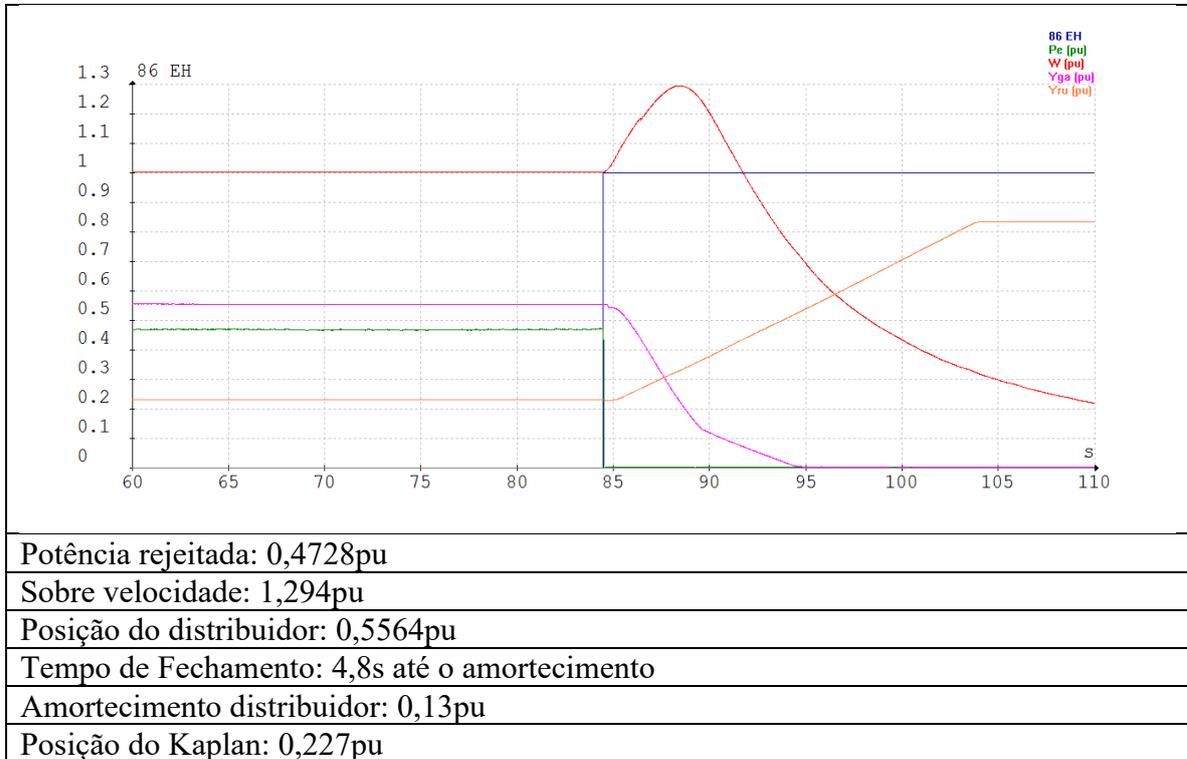


Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

- **Atuação 86E/H**

A Figura 71 demonstra a atuação de uma proteção externa ao regulador. Ela atua diretamente na válvula de emergência do sistema de regulação fechando de forma autônoma o atuador do distribuidor, não dependendo do regulador para o fechamento no mesmo.

Figura 71: Atuação 86EH.



Fonte: Relatório de Comissionamento UG41 – Usina Hidroelétrica de Jirau.

12. CONCLUSÃO

O comissionamento é uma etapa fundamental, realizada após a montagem dos equipamentos e sistemas. É nessa etapa que os problemas encontrados são corrigidos e pode-se comprovar toda a funcionalidade do sistema de regulação de velocidade.

Ao longo dos capítulos 2, 3, 4 e 5 foram apresentados diversos componentes que atuam em conjunto com o regulador de velocidade bem como os tipos de turbinas mais usuais e um breve informativo sobre as usinas hidroelétricas. Tais componentes são de fundamental importância para o controle da turbina, pois componentes mal dimensionados podem oferecer riscos para a planta (usina) como um todo e, por isso, precisam estar bem ajustados e em boas condições operativas.

Com base nos estudos realizados para a execução do trabalho, principalmente na área de sistemas de controle, pôde-se perceber que não basta ter experiência prática se os valores aprendidos na teoria não forem aplicados no momento da execução dos ensaios e na interpretação dos resultados obtidos.

No capítulo 11 foram exibidos os resultados práticos obtidos durante o comissionamento do regulador de velocidade da unidade geradora 41 da UHE Jirau. A partir dos ensaios realizados no sistema de regulação de velocidade, pôde-se notar um bom desempenho estático e dinâmico do sistema nos modos de controle de velocidade (frequência), abertura e potência. Os resultados mostram-se satisfatórios e atendem os requisitos estipulados pelo ONS, confirmando a teoria abordada ao longo dos capítulos 6, 7, 8, 9 e 10.

Com isso o trabalho alcançou seu objetivo de demonstrar de forma prática os ensaios mais importantes no comissionamento de um sistema de regulação de velocidade. Para alcançar tal objetivo foi feito um estudo exaustivo na teoria de sistemas de controle, manuais de comissionamento entre outros. Com esta meta do trabalho alcançada, fica como sugestão para trabalhos futuros os seguintes temas:

- Apresentar estudos prévios ao comissionamento através de modelagens e simulações;
- Apresentar de forma detalhada o controle de nível, muito utilizado em épocas de estiagem onde se deseja manter o nível do reservatório;
- Fazer a mesma análise para reguladores isócronos;
- Apresentar o comportamento da unidade geradora na situação de “black start”. O “black start” é a simulação do desligamento de unidades geradoras motivado por uma eventual interrupção de energia em parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) e a retomada do sistema por completo. As principais hidroelétricas do Brasil passam por simulações como essa.

13. BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.esbr.com.br/a-usina>
- [2] <http://www.eletrosul.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/uhe-jirau-e-inaugurada-reforca-sistema-eletrico-brasileiro>
- [3] ELETROBRÁS. Diretrizes para estudo e projeto de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000.
- [4] REVISTA FURNAS; ANO XXXI N°318; MARÇO 2005.
- [5] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Submódulo 3.6: Requisitos técnicos mínimos para a conexão as instalações de transmissão.
- [6] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Manual de Procedimentos da Operação. Brasília- DF, 2009.
- [7] SOUZA, Z.; FUCKS, R. D.; SANTOS, A. H. M. Centrais hidro e termelétricas. São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá, MG: Escola Federal de Engenharia, 1983.
- [8] SCHREIBER, P. Schreber. Usinas hidrelétricas. Berlim: Edgard Blücher, 1953.
- [9] SOARES JR, Ricardo Luiz; Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 213.
- [10] HARVEY, Adam; e outros; Turbinas Hidráulicas, 1998.
- [11] TAVARES T. V., “Ensaio de Comissionamento de Gerador Síncrono em Usinas Hidrelétricas”. Florianópolis, 2011.
- [12] DRAPINSKI, J. Hidráulica e Pneumática Industrial e móvel. 1ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- [13] SENAI/SC. Hidráulica e técnicas de comando. Florianópolis: SENAI/SC, 2004.
- [14] HIDALGO, E. M. P. Modelo para diagnose de falhas em regulador de velocidade de turbinas hidráulicas. Universidade de São Paulo, 2010, São Paulo.
- [15] OGATA, KATSUHIKO - Engenharia de Controle Moderno. Universidade de Minnessota. Tradução: Severo, Bernardo Faculdade de Engenharia do Rio de Janeiro.
- [16] REIVAX AUTOMAÇÃO E CONTROLE S/A. Instrumentação e Controle. Programa de Aperfeiçoamento em Automação Industrial. Módulo 2, 2010.
- [17] REIVAX AUTOMAÇÃO E CONTROLE S/A. Geração de Energia Elétrica. Programa de Aperfeiçoamento em Automação Industrial. Módulo 1, 2010.
- [18] REIVAX – Funções de Transferência do RVX POWER, 2015.
- [19] MEDEIROS, V. Marcos. Aspectos Teóricos e Práticos de Reguladores de Tensão e Velocidade para Usinas Hidroelétricas. Florianópolis, 2011.

- [20] SOARES, J.M.C., Identificação Experimental, Simulação e Ajuste de Reguladores de Velocidade de Usinas Hidrelétricas com Verificação em Testes de Campo, Dissertação de Mestrado, UFSM – 1982.

ANEXOS

14. ANEXO A – SUBMÓDULO 3.6 do ONS: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.



**Operador Nacional
do Sistema Elétrico**

Procedimentos de Rede

Assunto	Submódulo	Revisão	Data de Vigência
REQUISITOS TÉCNICOS MÍNIMOS PARA A CONEXÃO ÀS INSTALAÇÕES DE TRANSMISSÃO	3.6	1.1	16/09/2010

Quadro 5 – Requisitos para o sistema de regulação primária (1)

Descrição	Requisito técnico mínimo	Benefício
1. Estatismo permanente	Ajustável entre 2 e 8%	Permitir o ajuste da participação das unidades geradoras no controle de frequência da rede elétrica.
2. Estatismo transitório	Ajustável entre 10 e 500%	Permitir o ajuste da resposta transitória das unidades geradoras hidráulicas.
3. Banda morta	Menor ou igual a $\pm 0,04$ Hz.	Uma banda morta larga tem efeitos negativos na regulação primária e dificulta a determinação de parâmetros adequados de controle.
4. Tempo de estabilização (3) na operação em rede isolada das unidades	Menor que 60 segundos	Garantir bom desempenho em condições de ilhamento e recomposição.
5. Tempo de resposta (2) na operação em rede isolada	Menor que 9 segundos	
6. Ajuste do regulador de velocidade na condição de operação interligada	O ajuste do regulador para a condição de operação interligada deve satisfazer (tempo de resposta e estabilização) também a condição de operação isolada.	Esse requisito garante o desempenho tanto em condições de operação interligada quanto em condições de ilhamento e recomposição de sistema.
7. Ajuste do regulador de velocidade na condição de operação em vazio	Admite-se um ajuste diferenciado do regulador de velocidade para a operação em vazio, uma vez que é possível determinar tal condição por meio da posição de chaves e disjuntores. Por outro lado, a condição de operação isolada não pode ser detectada facilmente.	
8. Desempenho fora das condições nominais de tensão e frequência	O sistema de regulação da frequência deve obedecer aos requisitos acima, dentro das faixas de variação de frequência (relacionadas no Quadro 1) e de tensão admitidas para o gerador.	Isso garante o desempenho para as condições operativas previstas.
9. Controle conjunto de potência	O controle conjunto de potência, caso exista, deve ter a capacidade de equalizar a geração entre as unidades sob controle.	Essa característica objetiva facilitar a operação das unidades geradoras.
10. Desempenho em condições de rejeição de carga	O regulador de velocidade deve ser capaz de controlar a velocidade da unidade geradora em caso de rejeição total de carga para evitar seu desligamento por sobrevelocidade.	

Notas: (1) Para as usinas termoeletricas que operam em ciclo combinado, os requisitos mínimos acima estabelecidos aplicam-se à instalação como um todo.