

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO**

**CAIO GAMA MELILA CASTRO
MARCUS VINICIUS SILVA DE SOUZA
RAFAEL ALEXANDRINO ARAUJO**

**REGULADOR DE VELOCIDADE
MODERNIZAÇÃO E COMISSIONAMENTO**

VOLTA REDONDA

2021

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO**

**REGULADOR DE VELOCIDADE
MODERNIZAÇÃO E COMISSIONAMENTO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Discentes:

Caio Gama Melila de Castro

Marcus Vinicius Silva de Souza

Rafael Alexandrino Araujo

Orientador:

Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Júnior

VOLTA REDONDA

2021

AGRADECIMENTOS

RESUMO

O Regulador de Velocidade é um subsistema que atua no conjunto turbina-gerador no sentido de aumentar ou diminuir a potência gerada pela turbina quando a velocidade angular ou frequência se afasta do valor de referência. Devido a sua função este subsistema é o principal responsável pela qualidade da energia elétrica gerada, em termos de frequência e potência.

O presente documento apresenta a proposta de modernização para o sistema de regulação de velocidade de três hidrogeradores de 45 MW com turbina tipo francis em uma usina hidrelétrica de alto reestabelecimento, de modo a se obter um sistema com maior eficiência, confiabilidade e que atenda a todos os requisitos técnicos do órgão operador nacional do sistema elétrico (ONS).

Dentro da proposta de modernização, serão citadas a nova topologia de funcionamento do regulador de velocidade e os ganhos obtidos com a mudança de filosofia. Como conclusão, será apresentado a comparação dos ensaios realizados no comissionamento, com os realizados no descomissionamento, comprovando a eficácia do novo sistema, juntamente com os ganhos de funcionalidades obtidos.

Palavras-chave: Modernização, Confiabilidade, Regulador de velocidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	3
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Contribuições técnicas	3
1.4	Metodologia.....	4
2	REGULADOR DE VELOCIDADE	5
2.1	Centrais hidrelétricas.....	5
2.1.1	Centrais hidrelétricas de alta confiabilidade de reestabelecimento	6
	(Alto reestabelecimento integral – Black Start):	6
2.2	Conjunto gerador.....	7
2.2.1	Rotor	7
2.2.2	Tipos de turbina	8
2.2.3	Turbina Francis	8
2.3	Regulador de velocidade.....	10
2.3.1	Funções do sistema de regulação de velocidade	11
2.3.2	Estrutura Geral de um Regulador de Velocidade.....	12
2.3.3	Regulador de Velocidade com Estatismo Permanente (Regulação de Frequência e Potência).....	12
2.3.4	Requisitos mínimos para funcionamento do regulador de velocidade .	14
2.4	Sistemas óleo-dinâmicos.....	17
2.4.1	Valvula direcional proporcional	17
2.4.2	Distribuidor	18
2.5	Constante de inércia da água (golpe de aríete)	19
2.5.1	Proteção por chaminé de equilíbrio.....	20
2.5.2	Proteção por válvula reguladora de pressão.....	21

2.6	Regulador de tensão	21
3	CENÁRIO PRÉ MODERNIZAÇÃO	23
3.1	Descrição do Sistema de Regulação de Velocidade	23
3.1.1	Interface com o exterior	23
3.2	Estrutura geral do regulador de velocidade	24
3.2.1	Posicionador	25
3.2.2	Regulação de Velocidade	25
3.2.3	Estatismo Permanente	25
3.2.4	Insensibilidade em Frequência	26
3.2.5	Realimentação em Abertura	26
3.2.6	Limitador de Abertura	27
3.2.7	Realimentação em Potência	27
3.2.8	Limitador de Potência	28
3.2.9	Referenciador	28
3.2.10	Sequência de partida	28
3.2.11	Degaus de Velocidade	29
3.2.12	Degaus de Potência	29
3.2.13	Tele indicações	30
3.2.14	Supervisão dos Defeitos	30
3.3	Descrição dos modos automáticos de regulação	30
3.3.1	Regulador de Rotação	30
3.3.2	Regulador de Abertura	31
3.3.3	Regulação de Potência	31
3.4	Transduções do regulador de velocidade	32
3.4.1	Potência	32
3.4.2	Posição do distribuidor	32
3.5	Limitações do sistema atual de regulação de velocidade	32

4	MODERNIZAÇÃO	35
4.1	Informações gerais dos equipamentos empregados na modernização....	36
4.2	Estrutura empregada na modernização	37
4.3	Ensaio realizado no comissionamento.....	38
4.3.1	Verificações iniciais.....	38
4.3.2	Circuitos de alimentação	39
4.3.3	Interfaces	39
4.3.4	Ensaio no demarrador da unidade hidráulica	41
4.3.5	Ensaio em água-morta	41
4.3.6	Ensaio em vazio.	48
4.3.7	Ensaio dinâmico em carga	56
5	COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE O REGULADOR NOVO E O ANTIGO.....	71
5.1	Ensaio de abertura do distribuidor em água morta.....	71
5.2	Ensaio de fechamento do distribuidor em água morta	73
5.3	Tempo de fechamento do distribuidor por trip.....	74
5.4	Ensaio de partida automática	75
5.5	Ensaio de parada rápida com descarga prévia	77
5.6	Ensaio com rejeição de carga.....	78
5.6.1	Rejeição de carga com 25% da carga nominal	79
5.6.2	Rejeição de carga com 50% da carga nominal	80
5.6.3	Rejeição de carga com 75% da carga nominal	82
5.6.4	Rejeição de carga com 100% da carga nominal	83
6	CONCLUSÃO, COMENTÁRIOS E PROJETOS FUTUROS	85
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Usina hidroelétrica	5
Figura 2 - Turbina Francis	10
Figura 3 – Estrutura geral de um sistema de regulação de velocidade.....	12
Figura 4 – Estatismo permanente	13
Figura 5- Sistema mecânico do distribuidor.	19
Figura 6- Chaminé de Equilíbrio.....	20
Figura 7- Esquema Geral do Regulador de Velocidade.....	24
Figura 8- Estatismo Permanente.....	26
Figura 9- Abertura do Distribuidor e Regulação de Velocidade.....	29
Figura 10- Esquema Básico de Regulação Instalado.....	33
Figura 11- TP utilizado para medição da frequência do grupo.....	34
Figura 12 - Malha de Controle do Atuador	42
Figura 13 - Oscilografia do Ensaio de Máxima Velocidade de Abertura e Fechamento do Distribuidor	Erro! Indicador não definido.
Figura 14 - Oscilografia Gerada na Ensaio de Controle de Posição do Distribuidor	46
Figura 15 - Oscilografia Gerada no Ensaio de degrau de Posição do Distribuidor	47
Figura 16 - Oscilografia do Ensaio de Degraus Gradativos do Distribuidor	47
Figura 17 - Lógica de Controle de Partida Automática do Regulador	48
Figura 18 - Oscilografia do Ensaio de Partida Automática do Rgulador.....	49
Figura 19 - Malha de Controle de Velocidade a Vazio	50
Figura 20 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a vazio por TP.....	51
Figura 21 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a Vazio por Pickup	52
Figura 22 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a vazio a um Degrau Aplicado	53
Figura 23 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a vazio a um Degrau Aplicado	54
Figura 24 - Oscilografia do Ensaio de Comutação de Canal de Controle	55
Figura 25 - Oscilografia do Ensaio de Sobrevelocidade Elétrico.....	56
Figura 26 - Oscilografia do Ensaio de Sincronismo e modo de Potência.....	57
Figura 27 - Malha de Controle e Potência.....	58
Figura 28 - Oscilografia do ensaio de degrau de potência ativa.....	59

Figura 29 - Oscilografia do Ensaio de Degrau de Potência em modo de Abertura .	60
Figura 30 - Oscilografia do Ensaio de Rampa de Carga/Descarga de Potência.....	61
Figura 31 - Ensaio de Isolação Simulada	63
Figura 32 - Oscilografia do Ensaio de Comutação de modo de Controle.....	64
Figura 33 - Oscilografia do Ensaio de Comutação de Canal de Controle	65
Figura 34 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 25%.....	67
Figura 35 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 50%.....	68
Figura 36 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 75%.....	68
Figura 37 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 100%.....	69
Figura 38 - Curva de Potência x Abertura	70
Figura 39 - Oscilografia do Ensaio de Abertura do distribuidor RV antigo	71
Figura 40 - Oscilografia do Ensaio de Abertura do distribuidor RV novo	72
Figura 41 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor RV antigo.....	73
Figura 42 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor RV novo.....	73
Figura 43 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor Trip RV antigo.	74
Figura 44 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor Trip RV novo...	74
Figura 45 - Oscilografia do Ensaio de Partida Automática RV antigo	75
Figura 46 - Oscilografia do Ensaio de Partida Automática RV novo	76
Figura 47 - Oscilografia do Ensaio de Parada Rápida com Descarga Prévia RV antigo	77
Figura 48 - Oscilografia do Ensaio de Parada Rápida com Descarga Prévia RV novo	77
Figura 49 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 25% RV antigo.....	79
Figura 50 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 25% RV novo.....	80
Figura 51 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 50% RV antigo.....	81
Figura 52 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 50% RV novo.....	81
Figura 53 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 75% RV antigo.....	82
Figura 54 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 75% RV novo.....	82
Figura 55 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 100% RV antigo.....	83
Figura 56 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 100% RV novo.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos técnicos gerais para as unidades geradoras hidroelétricas e termoelétricas.....	14
Tabela 2 - Requisitos para o sistema de regulação primária	15
Tabela 3- Comparativo de Desempenho no Ensaio de Abertura do Distribuidor	72
Tabela 4- Comparativo de Desempenho no Ensaio de Fechamento do Distribuidor	73
Tabela 5 – Comparativo de Desempenho no Ensaio de Fechamento do Distribuidor por Trip	75
Tabela 6 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Partida Automática.....	76
Tabela 7 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Parada Rápida com Descarga Prévia.....	78
Tabela 8 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 25%	80
Tabela 9 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 50%	81
Tabela 10 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 75% da Nominal	83
Tabela 11 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 100%	84

LISTA DE SIGLAS

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

TP – Transformador de Potencial

TC – Transformador de corrente

IHM – Interface homem-máquina

RV – Regulador de Velocidade

SEP – Sistema Elétrico de Potência

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Controlado pelo operador nacional do sistema (ONS), toda usina hidrelétrica possui um índice mínimo de disponibilidade de 80% para as unidades de geração, este índice é medido anualmente, e para que as usinas atinjam este índice, suas manutenções preventivas devem ser muito bem planejadas e eficazes de modo a mitigar as intervenções corretivas.

Pelo fato do sistema de regulação de velocidade ser um sistema de suma importância em usina hidrelétrica, o estado de obsolescência deste equipamento tem causado um elevado número de falhas nestas unidades geradoras, abaixando assim o índice de disponibilidade da usina e tornando um sistema de suma importância em um sistema de baixa confiabilidade.

1.2 Objetivos

- Realizar uma análise técnica a respeito de uma proposta de modernização para o sistema de regulação de velocidade, utilizando equipamentos modernos disponíveis no mercado industrial;
- Analisar os ensaios que comprovam a eficácia do sistema proposto, consolidando as vantagens da implementação do sistema.
- Garantir ao sistema de regulação de velocidade maior confiabilidade através do novo sistema proposto;
- Reduzir o número de falhas ocasionadas pelo sistema;
- Aumentar a disponibilidade de geração das unidades onde o novo sistema será instalado.

1.3 Contribuições técnicas

Criar um mecanismo capaz de avaliar analiticamente dois sistemas de regulador de velocidade.

1.4 Metodologia

A metodologia e desenvolvimento deste trabalho dá-se inicialmente, com a análise das falhas apresentadas pelo sistema ao qual se propõe a modernização e levantamento do histórico de falhas nas unidades geradoras onde o regulador de velocidade foi a causa raiz. A partir de um estudo prévio das funcionalidades do sistema, tem por ações sucessivas, a implementação de equipamentos que atendam as necessidades operacionais do sistema; A parametrização dos equipamentos e por fim, a análise dos resultados dos ensaios de comissionamento.

2 REGULADOR DE VELOCIDADE

2.1 Centrais hidrelétricas

Uma central hidroelétrica é um agrupamento de componentes que tem como principal objetivo transformar a energia potencial hidráulica de um rio ou de uma represa em energia elétrica (ANDIA, 2005).

Os principais componentes de uma usina hidroelétrica, como podem ser vistos na figura 1, são:

- Barragem: onde é represada a água do rio para promover o acúmulo e a queda de água;
- Tomada de Água: onde realiza a distribuição da água para as diversas máquinas;
- Conduto forçado: que direciona a água até a turbina;
- Casa de Máquina ou Casa de Força, onde fica a turbina que converte a energia cinética do movimento da água em energia mecânica para acionar o gerador. O gerador, por sua vez, transforma a energia mecânica proveniente da turbina em energia elétrica. O transformador eleva o nível de tensão para transmitir a longas distâncias. E, além desses, há outros componentes, como regulador de velocidade, regulador de tensão, serviços auxiliares entre outros.

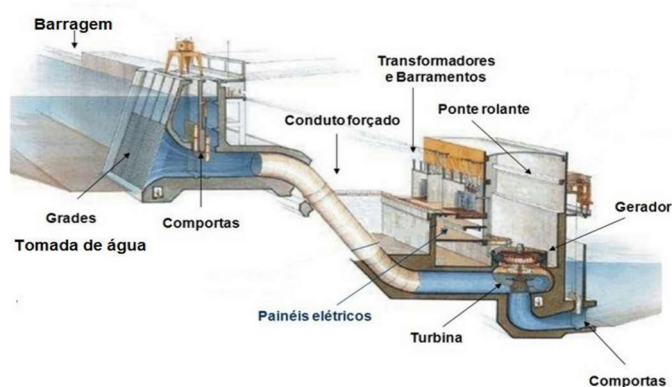


Figura 1- Usina hidroelétrica

Fonte: INEPAR-IESA (2008).

2.1.1 Centrais hidrelétricas de alta confiabilidade de reestabelecimento (Alto reestabelecimento integral – Black Start):

São usinas que quando todas as suas unidades geradoras estão na condição de repouso (desligadas elétrica e mecanicamente), independente de utilizar qualquer alimentação externa, podem suprir os seus serviços auxiliares e com isso ligar estas unidades geradoras. Desse modo, esta usina deverá disponibilizar o número mínimo de unidades geradoras para iniciar e concluir todo o processo de recomposição fluente. Além disso, a usina deve:

- Ser capaz de energizar linhas de transmissão e equipamentos a ela associados sem ter que considerar nenhum evento que esteja fora do seu controle;
- Ter capacidade para assimilar variações bruscas de carga, controlando a tensão e a frequência dentro das faixas definidas para situação de emergência. Na fase fluente a frequência pode variar de 58 a 62 Hz;
- Dispor de grupo gerador de emergência ou de unidade geradora auxiliar para partida de uma ou mais unidades geradoras principais, ou ainda de sistema de partida com alimentação em corrente contínua CC (através de banco de baterias) para excitação do campo do gerador;
- Ter índice de disponibilidade anual superior a 80%;
- Devem ter capacidade de restabelecer o número mínimo de unidades geradoras definido no plano de recomposição (de acordo com a instrução de recomposição da área a qual a usina está inserida) em um intervalo máximo de 30 (trinta) minutos, durante os testes reais de recomposição;
- Devem estar com o número mínimo de unidades geradoras disponibilizadas para iniciar e concluir todo o processo de recomposição, em cada área de autorestabelecimento, para a fase de recomposição fluente;
- Devem dispor de grupo gerador de emergência ou de unidade geradora auxiliar para partida de uma ou mais unidades geradoras principais, ou ainda de sistema de partida com alimentação em corrente contínua CC (através de banco de baterias) para excitação do campo do gerador. Esses sistemas devem ter condições de efetuar pelo menos duas tentativas de recomposição da unidade geradora, sem o auxílio de fonte de alimentação externa;

- O índice de disponibilidade superior a 80% se refere ao valor apurado no ano anterior a realização dos testes.

2.2 Conjunto gerador

De acordo com Greg C. Stone et. al (2004), os geradores síncronos são equipamentos geralmente destinados ao fornecimento de energia elétrica. Para o consumidor, duas grandezas principais definem a qualidade do fornecimento, sendo elas, a frequência e a tensão. Essas grandezas devem ser mantidas dentro de certos limites de continuidade e conformidade considerados como satisfatórios pelas normas, para que os equipamentos sejam alimentados e possam operar continuamente, sem que ocorram danos devido a variações de tensão e frequência. Isso é realizado por um gerador de corrente alternada, cujo objetivo é converter uma energia mecânica em elétrica.

2.2.1 Rotor

Parte girante da máquina, constituído por um material ferromagnético envolto num enrolamento designado como enrolamento de campo, que tem como função produzir um campo magnético constante, assim como no caso do gerador de corrente contínua, para interagir com o campo produzido pelo estator. A tensão aplicada nesse enrolamento é contínua. Além disso, o rotor pode conter dois ou mais enrolamentos, sempre em número pares e todos conectados em série, sendo que cada enrolamento será responsável pela produção de um dos pólos do eletroímã, e que o número de pólos irá indicar a velocidade que o gerador deverá girar para que se possa produzir uma determinada frequência nos terminais do estator.

Rotores de pólos salientes geralmente tem pólos de campo que são montados sobre um aro, por sua vez presos ao eixo do rotor por uma peça constituída por um conjunto de raios. No entanto, uma vez que a velocidade de rotação é geralmente significativamente menor do que 1000 rpm, a perda é considerada moderada, pois se a velocidade fosse maior, seria necessário a aplicação de rotor com pólos lisos. Máquinas de pólos salientes normalmente são usadas com turbinas hidráulicas, que tem uma velocidade relativamente baixa (quanto maior a penstock,

isto é, a maior queda de água, o mais rápido a velocidade). Para gerar 50 ou 60 Hz no estator, um grande número de pólos do campo é necessário (Greg C. Stone et. al, 2004).

2.2.2 Tipos de turbina

A turbina é um equipamento que converte energia hidráulica em energia mecânica, transferida para o eixo da máquina. As turbinas são classificadas como turbinas de reação e de ação (DÍEZ, 1996):

- Turbinas de reação: turbinas em que a energia mecânica é obtida pela transformação das energias cinéticas e de pressão do fluxo de água. As turbinas que se enquadram nesta definição são as turbinas Francis e Kaplan.
- Turbinas de ação: turbinas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento através do rotor. As turbinas que se enquadram nesta definição são as turbinas Pelton.

2.2.3 Turbina Francis

As turbinas FRANCIS recebem este nome em referência ao engenheiro inglês James Bicheno Francis (1812-1892), que as idealizou em 1847, e foram utilizadas em instalações hidroelétricas nos Estados Unidos. Desde a sua primeira concepção, muitos aperfeiçoamentos foram feitos, tanto em termos hidráulicos, mecânicos e de instalação. Atualmente, essas turbinas atingem seus melhores valores de rendimento para quedas que variam de 10 até 200 metros.

De acordo com PORTAL PCH (2020), uma turbina tipo Francis é constituída basicamente por seis partes. A figura 2 ilustra os componentes básicos de uma Turbina do tipo Francis:

a) – Caixa espiral:

É uma tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Esta parte fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser removida ou modificada. O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina. É fabricada

com chapas de aço carbono soldada em segmentos. A caixa espiral conecta-se ao conduto forçado na seção de entrada, e ao pré-distribuidor na seção de saída.

b) – Pré-Distribuidor

A finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuído. É composto de anéis superiores, entre os quais são montados um conjunto de palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, para não gerar perda de carga e não provocar turbulência no escoamento. É uma parte sem movimento soldada a caixa espiral e fabricada com placas ou chapas de aço carbono.

c) – Distribuidor

O distribuidor é composto de uma série de palhetas móveis, acionadas por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina (sem contato com a água). Todas as palhetas têm o seu movimento conjugado, isto é, todas se movem ao mesmo tempo e de maneira igual. O acionamento é feito por um ou dois pistões hidráulicos. O distribuidor controla a potência da turbina, pois regula a vazão da água. É um sistema que pode ser operado manualmente ou em modo automático, tornando o controle da turbina praticamente isento de interferências do operador.

d) – Rotor da Turbina

O rotor da turbina é onde ocorre a conversão de energia hídrica em potência de eixo. Em toda turbina hidráulica a água entra vinda de um reservatório ou canal de nível mais elevado (portanto com maior pressão) e escapa para um canal de nível mais baixo (portanto com menor pressão). A água de entrada é levada através de um duto fechado até um conjunto de lâminas curvas (palhetas), bocais ou injetores que transferem a energia da água para um rotor. Em consequência a pressão e a velocidade da água na saída são menores do que na entrada. A água que sai da turbina é conduzida por um duto, o tubo de sucção, até o reservatório ou canal inferior. A potência que uma turbina pode extrair do fluxo de água será proporcional ao produto da vazão volumétrica e da queda d'água disponível.

e) – Eixo

É responsável de fazer a transmissão da energia mecânica (giro) produzida pela turbina para o rotor do gerador, ou seja, serve apenas de acoplamento.

f) – Tubos de Sucção

Duto de saída da água, geralmente com o diâmetro final maior que o inicial, desacelera o fluxo da água após esta ter passado pela turbina, devolvendo-a ao rio, parte jusante da casa de força.

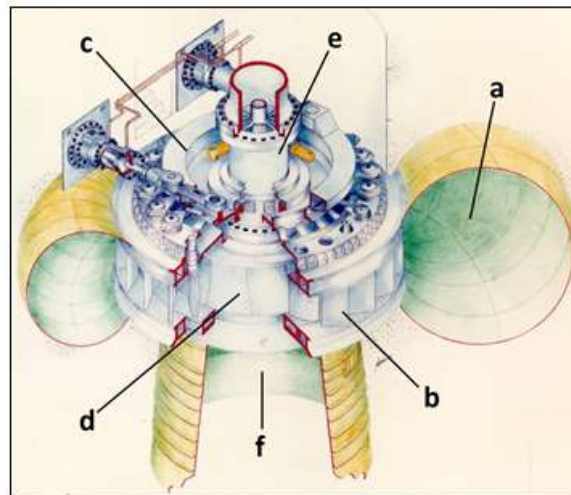


Figura 2 - Turbina Francis

Fonte: Adaptação Itaipu Binacional (2020)

2.3 Regulador de velocidade

O Regulador de Velocidade é um subsistema dentre outros que atuam no conjunto turbina-gerador no sentido de aumentar ou diminuir a potência gerada pela turbina quando a velocidade angular ou frequência se afasta do valor de referência.

Em função da demanda do sistema, o Regulador de Velocidade da turbina atua sobre a posição das pás do distribuidor ou da posição das agulhas, controlando a abertura e, conseqüentemente, a vazão de água que chega ao rotor, fazendo com que o hidrogerador gere apenas a energia elétrica necessária para o consumo (ANDIA, 2005) (YESID, 2006). Também é o principal responsável, de

forma direta e indireta, pela qualidade da energia elétrica gerada, em termos de frequência e potência (VINADE, 2003).

Na operação do regulador de velocidade, há um ponto que é conhecido como sem carga ou operação a vazio, que é o ponto específico de abertura das pás do distribuidor, previsto pelo projeto, que determina onde o sistema gera a força suficiente apenas para vencer os esforços de atritos associados com a rotação da turbina (MAZZORANA, 2008).

Os reguladores de velocidade podem tanto operar de forma isolada, controlando a potência gerada, como também operar de forma interligada, formando um grupo gerador com várias unidades, onde é exigida alta disponibilidade, devido às solicitações imediatas de geração de potência extra. Eles também permitem prevenir a sobrecarga do rotor da turbina devido ao excesso de velocidade (MAZZORANA, 2008).

2.3.1 Funções do sistema de regulação de velocidade

Pela definição de YESID (2006), o Regulador de Velocidade deve realizar várias funções, além de ajustar o servomotor. Podem-se destacar as seguintes funções:

- Permitir a sincronização do gerador ao sistema no menor tempo possível;
- Dar partida na máquina, acelerando-a até a velocidade nominal, sem causar danos na turbina (por ação de tensões elevadas nas pás) no menor tempo possível;
- Ajustar o ângulo das pás do rotor para operação com o máximo rendimento (turbinas Kaplan), em função da altura de queda e abertura do distribuidor;
- Em rejeição brusca de carga, promover o fechamento do distribuidor, sem que a sobrepessão do duto e da caixa espiral, subpressão da sucção e sobrevelocidade da máquina superem os níveis garantidos pelo fabricante da turbina e do gerador;
- Em condições especiais, colocar limites máximos de geração (limitador eletrônico e/ou mecânico, de potência e/ou posição do servomotor);
- Na falha completa de todas as fontes de alimentação de potência elétrica, promover o fechamento total do distribuidor ou bloqueá-lo e mantê-lo numa

posição fixa, enquanto é feita a manutenção, sem desligar a máquina do sistema;

- Fornecer indicações confiáveis da velocidade da máquina desde zero (unidade parada, deslocamento mínimo do rotor) até 100% de sobrevelocidade, para atuação de proteções de sobrevelocidade confiáveis em caso de falha do regulador.

2.3.2 Estrutura Geral de um Regulador de Velocidade.

Os Reguladores de velocidade podem ser encontrados com concepção hidromecânica ou eletrônica (analógica, digital ou microprocessado), sempre utilizando um “servomotor” (jargão utilizado em campo para o conjunto atuador hidráulico + mecânica de abertura do distribuidor) para atuação no distribuidor ou injetor, dependendo do tipo da turbina hidráulica. Os reguladores eletrônicos possuem a vantagem de oferecer a possibilidade de alteração e ajuste de seus parâmetros de maneira fácil, podendo incorporar diferentes funções e limites.

A escolha do tipo adequado do regulador de velocidade irá depender fundamentalmente do regime de operação previsto para a central hidrelétrica, se ela vai operar interligada a um grande sistema ou se a sua operação for isolada.

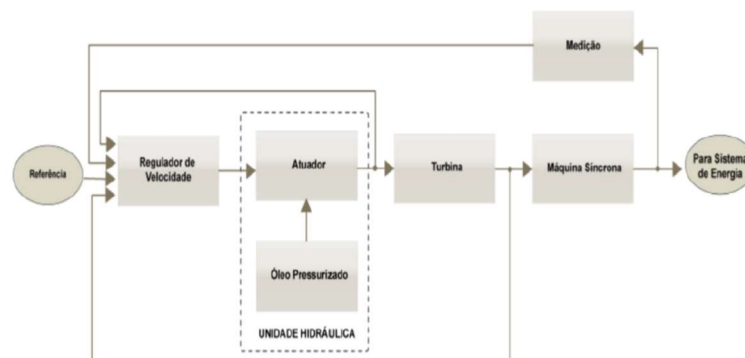


Figura 3 – Estrutura geral de um sistema de regulação de velocidade.

Fonte: VOITH HYDRO (2001)

2.3.3 Regulador de Velocidade com Estatismo Permanente (Regulação de Frequência e Potência)

O estatismo permanente é uma característica que os reguladores de velocidade devem possuir para que unidades geradoras com características diferentes possam operar em paralelo.

O estatismo permanente é definido pela variação percentual da velocidade quando da ocorrência de um impacto de carga no sistema, igual à potência nominal do gerador controlado.

Segundo Kundur (1994), quando duas ou mais unidades geradoras trabalham em paralelo com estatismos permanentes diferentes e ocorre uma variação de frequência, ambas as unidades assumirão o novo valor de potência, porém a variação de potência será diferente em cada unidade, conforme pode ser observado na Figura 6.

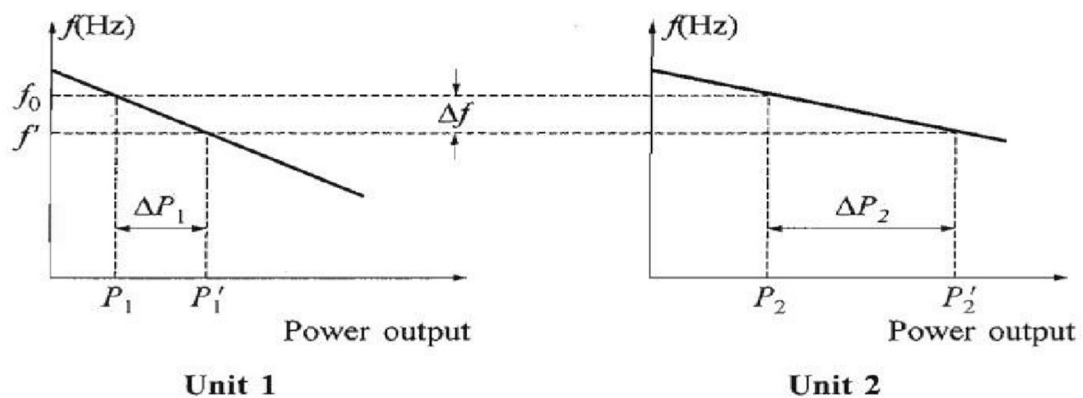


Figura 4 – Estatismo permanente

Fonte: Kundur (1994)

Onde:

ΔP = A variação de potência na unidade geradora

Δf = A variação de frequência na unidade geradora

B_p = valor de estatismo permanente na unidade geradora

Ainda segundo Kundur (1994), um valor muito usual de estatismo permanente é 5%, o que significa que, quando ocorre uma variação de potencia no sistema, correspondente a 100% da potencia do gerador controlado, ocorrerá uma variação de 5% na frequência do gerador.

Assim, concluí-se que, quanto maior o estatismo permanente de uma unidade geradora, mais estável será sua geração, ou seja, precisará ter uma maior variação de potência no sistema para que o regulador de velocidade tenha uma resposta maior.

2.3.4 Requisitos mínimos para funcionamento do regulador de velocidade

Os requisitos mínimos exigidos pelo ONS para a operação de um Regulador de Velocidade são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos técnicos gerais para as unidades geradoras hidroelétricas e termoelétricas

Descrição	Requisito técnico mínimo	Benefício
1. Operação em regime de frequência não nominal para unidades geradoras hidroelétricas.	(a) A unidade geradora hidroelétrica deve atender os requisitos estabelecidos nas normas técnicas vigentes e os ajustes de suas proteções de sub e sobrefrequência devem ser submetidos à aprovação do ONS.	Minimizar o desligamento do gerador por subfrequência e sobrefrequência quando o sistema pode se recuperar sem o desligamento dele.
2. Operação em regime de frequência não nominal para unidades geradoras termoelétricas.	Operação entre 57 e 63 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência instantâneos. Operação abaixo de 57,5 Hz por até 5 segundos. Operação abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos; Operação entre 58,5 e 61,5 Hz sem atuação dos relés de subfrequência e sobrefrequência temporizados. Operação acima de 61,5 Hz por até 10 segundos (1).	Evitar o desligamento do gerador quando de déficit de geração, antes que o esquema de alívio de carga atue completamente ou em condições de sobrefrequência controláveis.

3. Participação em Sistemas Especiais de Proteção - SEP	Possibilidade de desconexão automática de geração, para atender a esquemas de ilhamento da usina.	Minimizar consequências de perturbações no sistema.
---	---	---

A Tabela 2 mostra os requisitos para a regulação primária, que é a regulação da frequência realizada pelos reguladores de velocidade nas usinas.

Tabela 2 - Requisitos para o sistema de regulação primária

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.	

Em relação às Tabelas 1 e 2, têm-se as seguintes notas:

- (1) A temporização da proteção de desligamento por sobrefrequência é definida com base em avaliação do desempenho dinâmico, para garantir a segurança operativa do Sistema Interligado Nacional (SIN).
- (2) É o tempo necessário para a velocidade da unidade atingir 90% do valor final, quando sujeita a um degrau de variação de frequência na referência de velocidade do regulador de velocidade com a malha de frequência aberta. Esse requisito geralmente é verificado por meio de simulações, por ser difícil estabelecer condições operativas isoladas.
- (3) É o tempo necessário para a velocidade da unidade permanecer acima de 95% e abaixo de 105% de seu valor final.

2.4 Sistemas óleo-dinâmicos

O sistema óleo-dinâmico compreende o atuador eletro-hidráulico e o servomotor do distribuidor. O esquema do atuador varia conforme o fabricante, embora todos tenham uma válvula transdutora eletro-hidráulica (válvula proporcional) e uma válvula distribuidora. Muitos reguladores de velocidade são de ação do tipo PID (proporcional, integral, derivativo). Eles possibilitam que se tenha uma resposta rápida e, também, redução de ganho transitório, concomitante a um aumento do ganho em regime permanente. A ação derivativa (aumento do ganho transitório) em geral não é usada, pois muitas vezes causa oscilação excessiva no sinal de controle e nos primeiros estágios do atuador (PORCIÚNCULA et al, 2006; LINSINGEN, 2008).

2.4.1 Válvula direcional proporcional

A válvula proporcional tem como característica ter uma eletrônica embarcada que trabalha com alta precisão e força hidráulica. Como o próprio nome sugere, essa válvula possui uma resposta de vazão proporcional ao sinal elétrico enviado. Para os reguladores que trabalham com o sinal variando de 4mA a 20mA, é possível citar algumas situações de trabalho.

- Sinal de referência em 4mA: a válvula trabalha no sentido de máximo fechamento.
- Sinal de referência em 12mA: a válvula fica posicionada no meio do seu curso e, dessa forma, não existe deslocamento de óleo.
- Sinal de referência em 20mA: a válvula trabalha no sentido de máxima abertura.

Quaisquer valores intermediários, entre os máximos e posição de repouso, promovem um movimento proporcional, permitindo uma perfeita regulação do deslocamento de óleo.

2.4.2 Distribuidor

O distribuidor é utilizado nas turbinas de reação e tem como objetivo conduzir a água em direção às pás do rotor, regulando a vazão e modificando, dessa forma, a potência da turbina, ajustando-se às possíveis variações de carga na rede (DIEZ, 1996; ANDIA, 2005).

O distribuidor é constituído de um conjunto de pás diretrizes (direcionais) móveis dispostas ao redor do rotor, as quais giram simultaneamente com mesmo ângulo, possibilitando a passagem da descarga requerida ou interrompendo-a, quando necessário. Para cada valor de descarga, o ângulo mais conveniente das pás diretrizes de entrada de água no rotor é o que gera um escoamento com mínima perda hidráulica.

Outro componente importante é o anel que comanda as bielas das pás, chamado anel de regularização, ele é comandado por um eixo graças às bielas, que lhe permitem efetuar um movimento de rotação de pequena amplitude. O anel recebe o comando para a regulação do fluxo de água de alimentação, transmitido pelos servomotores colocados no plano do anel de regulação, que provocarão o movimento do anel movendo as pás para a abertura ou ângulo desejado (YESID, 2006).

A Figura 5 apresenta os componentes que formam parte do sistema mecânico do distribuidor:

- 1 Anel inferior onde são montadas as pás;
- 2 Pás direcionais encaixadas entre os anéis inferior e superior;
- 3 Anel superior;
- 4 Manivela soldada às pás;
- 5 Bielas ajustáveis ligadas em uma extremidade às manivelas e na outra ao anel distribuidor;
- 6 Anel de regulação, responsável pela rotação e movimento simultâneo de todas as pás direcionais do distribuidor, na mesma proporção.

(MAZZORANA, 2008).

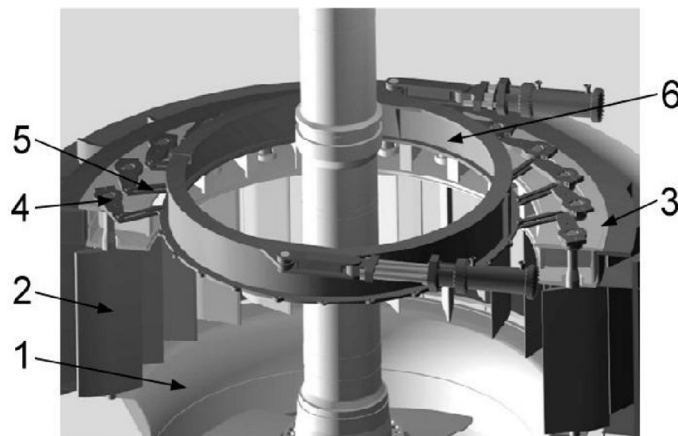


Figura 5- Sistema mecânico do distribuidor.

Fonte: ANDIA (2008)

2.5 Constante de inércia da água (golpe de aríete)

A dificuldade de se realizar uma boa regulação tem origem no efeito da inércia da água. Por exemplo, uma abertura no distribuidor provoca uma maior sucção de água o que provoca uma queda na altura, com a súbita redução de pressão. A água que está entrando no conduto com uma velocidade constante deverá variar a velocidade até restabelecer a antiga queda. Até que isto ocorra se tem um efeito inverso ao desejado na variação de potência. Este efeito singular depende totalmente da constante de tempo de inércia da água.

O fenômeno do golpe de aríete não é somente prejudicial à instalação, devido às sobrepensões as quais o conduto fica sujeito em resultado do fechamento brusco de uma válvula ou do distribuidor de uma turbina. As oscilações de massa

subsequentes podem amplificar-se com o tempo, dando origem a uma condição de ressonância. A estabilidade do sistema de regulação de velocidade é fortemente influenciada pelas flutuações de pressão no conduto, principalmente nas instalações com condutos longos cujo tempo de inércia hidráulica é relativamente elevado. Os métodos mais usados para atenuação da sobrepressão no conduto forçado são:

Instalação de uma chaminé de equilíbrio ou de um reservatório hidropneumático entre o túnel de adução e a descida do conduto forçado para a turbina.

Instalação de uma válvula de alívio ou válvula de sobrepressão que, na ocorrência da sobrepressão, abre libertando água para a jusante evitando o estabelecimento de uma onda de pressão no interior do conduto forçado.

A inércia do conjunto rotórico contribui para a estabilização da velocidade, amortecendo os desvios de velocidade provocados pelos desajustes entre a potência elétrica e a potência mecânica da turbina. Do conjunto das duas máquinas, é o gerador que contribui com maior momento de inércia. Se necessário, pode-se aumentar o momento de inércia do conjunto, instalando um volante de inércia.

2.5.1 Proteção por chaminé de equilíbrio

Uma chaminé de equilíbrio é constituída por um reservatório que se comunica com o conduto forçado pela parte inferior, com a parte superior aberta para a atmosfera e tendo uma altura superior à linha hidrostática. A figura 8 mostra o esquema de uma instalação hidroelétrica que dispõe de proteção por chaminé de equilíbrio.

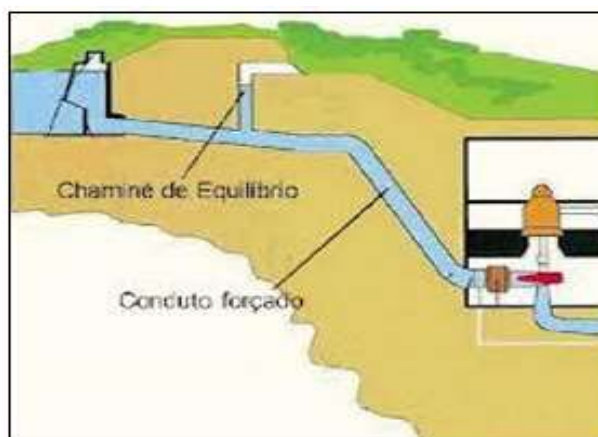


Figura 6- Chaminé de Equilíbrio

Fonte: CESP (2005)

2.5.2 Proteção por válvula reguladora de pressão

Este método de proteção se dá pela ligação de uma válvula em derivação à entrada da turbina, à montante do distribuidor com o qual o seu funcionamento é sincronizado. Nos casos de aceitação ou rejeição da carga, permite-se o escoamento da água através desta válvula em by-pass à turbina, de modo a evitar a formação de uma onda de pressão devido à manobra brusca do distribuidor. Esta válvula é acionada por um servomotor, sendo os tempos de fechamento e de abertura ajustados individualmente.

O funcionamento da válvula de alívio se dá na seguinte forma: quando o gerador é sujeito a rápidas mudanças de carga, a válvula é manobrada em sincronismo aproximado com o distribuidor da turbina, de forma a manter o caudal constante no conduto forçado. Em caso de rejeição da carga, a Válvula de Alívio de Pressão é aberta ao mesmo tempo em que é fechado o distribuidor da turbina, mantendo-se o caudal constante através da Válvula de Alívio de Pressão.

2.6 Regulador de tensão

O regulador de tensão tem a tarefa de manter constante a tensão no barramento de saída do gerador e/ou controlar a Potência Reativa fornecida por este ao sistema, partindo do princípio da criação do campo magnético em máquina síncrona, que em geral acontece através dos pólos que se constituem em eletroímãs. A corrente que os excita, ou seja, a corrente de campo é contínua e levada aos enrolamentos dos pólos através de escovas e anéis ou por sistema alternativo que não os usa, obtendo assim um campo magnético de polaridade fixa e intensidade variável.

O sistema de excitação compõe-se de uma fonte controlada responsável por alimentar o campo magnético e equipamentos auxiliares, devendo fornecer a potência necessária e modificá-la tão rapidamente quanto possível e necessário, conforme a variação da carga (tempo de resposta), evitando queda de tensão ou mesmo sobre-tensão.

O regulador eletrônico é o componente do sistema que verifica a tensão de saída do gerador e, automaticamente ajusta a corrente do campo do excitador, para

que a tensão permaneça rigorosamente constante, sob qualquer condição de carga. O regulador opera por realimentação, ou seja, a tensão de saída do gerador é compensada com uma referência, se a tensão do gerador não estiver no valor correto, o comparador acusa um erro que atua no circuito de potência do regulador e altera a corrente do campo do excitador a fim de corrigir a tensão do gerador.

3 CENÁRIO PRÉ MODERNIZAÇÃO

3.1 Descrição do Sistema de Regulação de Velocidade

O sistema de regulação é constituído de:

- Um armário contendo todos os componentes, tais como: relés, isoladores, conversores e outros.
- Um *rack* contendo as cartas eletrônicas que realizam o tratamento dos sinais de entrada e saída, a regulação e a geração dos sinais de comando elétrico para atuador.
- Um sistema de monitoração de velocidade independente do rack eletrônico principal;
- As interfaces de entradas e de saídas com os sinais externos.

3.1.1 Interface com o exterior

A medição de frequência do grupo FG é condicionada pela frequência nominal do gerador, a partir de um TP instalado no barramento de saída do gerador.

A frequência da rede é medida a partir de um TP instalado na barra da subestação da usina.

Um Módulo Independente efetua a medição da frequência do grupo por um sensor de proximidade indutivo a 2 fios instalado próximo ao eixo da turbina, para obter pulsos através de uma roda dentada, esta aquisição é usada como referencia para atuação dos freios da unidade geradora.

A medição de potência é fornecida por uma entrada analógica, a medição de potência é realizada por um Transdutor de Potência Ativa / Corrente.

Todos os sinais de entrada do regulador são efetuados através de sinais discretos e analógicos.

O regulador pode transmitir suas informações de saídas por ligações discretas e analógicas.

3.2 Estrutura geral do regulador de velocidade

A figura 12 apresenta um esquema geral de um Regulador de Velocidade.

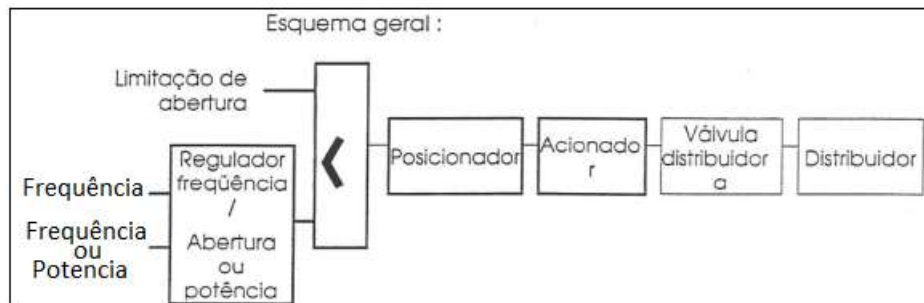


Figura 7- Esquema Geral do Regulador de Velocidade

Fonte: Manual Regulador de Velocidade (2020)

O regulador padrão "Francis" é constituído de uma realimentação em posição do distribuidor pilotado por uma malha frequência / abertura ou potência. A partida da máquina é feita por uma sequência de duas rampas de aberturas criadas pelo regulador. Esta técnica permite minimizar o tempo de sincronização do grupo. Antes do acoplamento um referenciador de velocidade comandado por ordens "+ velocidade" e "- velocidade" realiza o ajuste da frequência para sincronização manual do grupo. A sincronização automática é possível por meio do sinal de imagem da tensão da rede permitindo assim um acoplamento mais rápido que a sincronização manual. Após o acoplamento, um referenciador de carga (abertura ou potência de acordo com o tipo de controle escolhido) permite transmitir ao regulador a referência de regulação secundária sob a forma de referência analógica ou de ordens "+ carga" e "- carga".

Além destas funções de regulação propriamente ditas, o regulador oferece todas as funções de supervisão e de segurança necessárias para assegurar a máxima disponibilidade da máquina:

- Supervisão dos sensores com funcionamento de modo degradado.
- Controles de coerência na medida da velocidade e da malha de posição.
- Supervisão interna permanente do equipamento (autoteste).

3.2.1 Posicionador

A função da realimentação da posição do distribuidor é realizada por uma realimentação do tipo proporcional integral, à qual acrescenta-se uma ação derivada obtida da medição de posição da válvula distribuidora quando o sistema de amplificação hidráulica é a dois estágios. O comando do acionador efetua-se através de um amplificador de potência capaz de fornecer uma corrente de 1 a 6 a de acordo com o tipo de acionador. Uma tensão alternada de alta frequência (*dither*) pode ser superposta ao comando para melhorar se necessário as performances do acionador (redução da histerese).

3.2.2 Regulação de Velocidade

O regulador de velocidade é de estrutura PID série-paralela, esta tem a vantagem de aplicar a ação derivada somente no retorno da informação de velocidade e não na referência.

3.2.3 Estatismo Permanente

O regulador de velocidade tem a possibilidade de um estatismo permanente frequência / abertura ou frequência / potência segundo o modo de funcionamento. A função do estatismo permanente é de limitar voluntariamente a contribuição do grupo na regulação da frequência da rede e de equilibrar as contribuições dos diferentes grupos geradores conectados em uma rede quando a frequência varia.

O estatismo permanente se traduz por uma relação linear ligando a abertura do distribuidor ou a potência fornecida pelo grupo à frequência da rede em regime estabilizado. Isto é representado na figura 14.

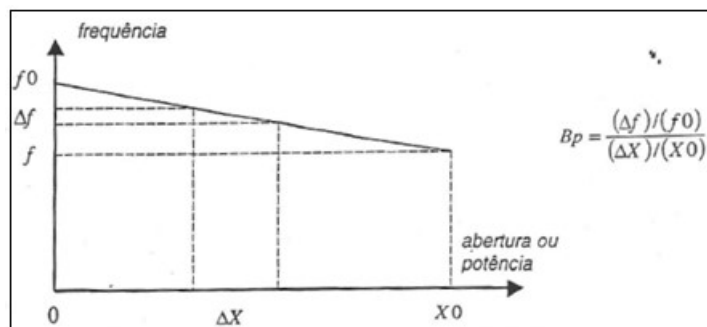


Figura 8- Estatismo Permanente

Fonte: Manual Regulador de Velocidade (2020)

3.2.4 Insensibilidade em Frequência

Uma insensibilidade em frequência ajustável por programação é disponível quando o grupo estiver acoplado à rede. Esta permite, quando for necessário, impedir o grupo de participar na regulação primária de frequência (por exemplo quando a capacidade de manter a frequência não for possível, ou quando a função principal do grupo for manter um nível ou uma vazão).

3.2.5 Realimentação em Abertura

Este modo de funcionamento permite em instalações simples de transmitir ao grupo as ordens de regulação secundária sem para tanto necessitar o equipamento de medição da potência elétrica (transformadores de tensão e de corrente, transdutor de potência ativa). A ordem dada ao regulador sob a forma de uma referência analógica ou incremental, é interpretada como uma referência de posição. Neste modo de funcionamento, a regulação de velocidade pode ficar ativa (ela vai então compensar a referência de posição, e o grupo participa na regulação primária da rede), ou ser inibida pela insensibilidade em frequência, neste caso o grupo somente participará na regulação primária se a frequência da rede variar de um valor maior que o programado para a insensibilidade.

3.2.6 Limitador de Abertura

O limitador de abertura age depois do regulador de velocidade e da realimentação de abertura ou potência, diretamente sobre a referência de posição do distribuidor. Ele se apresenta como uma escolha de mínimo entre a saída do regulador e o valor instantâneo do limitador.

Existem dois tipos de limitações de abertura:

- Antes da sincronização, é a sequência de partida que fixa a limitação em função da velocidade da máquina.
- Após a sincronização, é ativado o limitador normal. Este limitador pode ser posicionado por ordens externas "+" e "-" e seu valor pode ser fornecido para o exterior sob a forma de teleindicação.

3.2.7 Realimentação em Potência

A realimentação da potência elétrica é do tipo proporcional-integral. Ela utiliza o corretor PI da malha de velocidade, para evitar o excesso de parâmetros a ajustar durante o comissionamento. Como na realimentação em abertura, dois modos de funcionamento são possíveis:

- Regulagem secundária pura: neste caso, fixa uma insensibilidade em frequência. Dentro da faixa desta insensibilidade somente a realimentação em potência fica ativa, e para valores fora da faixa, a malha de frequência vai corrigir a potência fornecida pelo grupo para contribuir na regulagem da frequência.
- Regulagem combinada primário-secundária: se não for programada uma insensibilidade de frequência, a potência do grupo, determinada pela malha de realimentação em potência, é corrigida permanentemente em função da diferença da frequência da rede e da frequência de referência (60 Hz). O grupo aplica uma referência de potência, mas contribui também para a estabilidade da rede elétrica.

3.2.8 Limitador de Potência

Em casos particulares, pode ser útil limitar a potência elétrica fornecida pelo grupo (por exemplo quando o alternador estiver subdimensionado em relação a turbina).

3.2.9 Referenciador

De acordo com o modo de funcionamento do regulador, o referenciador pode ter às seguintes funções:

- Referenciador de velocidade: quando o disjuntor do grupo estiver aberto, se a sincronização for manual, o referenciador permite de fazer variar a frequência de -10% à + 10% em torno da referência nominal (60Hz).
- Referenciador de carga (abertura ou potência): quando o grupo estiver acoplado à rede, a referência de velocidade é fixada a da velocidade nominal. A referência externa deve tornar-se então uma referência de carga, podendo variar de 0 a 100% da abertura nominal, ou de -10% à 110% da potência nominal, de acordo com o tipo de realimentação adotada.

3.2.10 Sequência de partida

O interesse fundamental dos grupos hidráulicos é de poder fornecer rapidamente um complemento de potência à rede elétrica. Por isto, é essencial a redução ao mínimo tempo de partida e de sincronização. O regulador oferece em sua forma padrão uma sequência de partida otimizada onde os princípios são os seguintes:

- Sequência de partida em malha aberta com duas rampas de partida em função de parâmetros mecânicos e hidráulicos da instalação determina-se um comando para duas referências de abertura sucessivas e de uma velocidade da máquina na qual se faz a transição de uma à outra. Este comando leva o grupo à sua velocidade nominal com uma aceleração quase nula num tempo mínimo.

- Sincronização Automática: a referência de velocidade do regulador é a referência da rede à qual acrescenta-se um escorregamento programável. Assim, após a sequência de partida, o regulador leva diretamente a velocidade do grupo à frequência da rede. Se as condições de excitação do gerador estão realizadas, as condições de acoplamento são mais rapidamente obtidas. A figura 17 mostra a abertura do distribuidor nas rampas de partida e a regulação de velocidade após a partida.

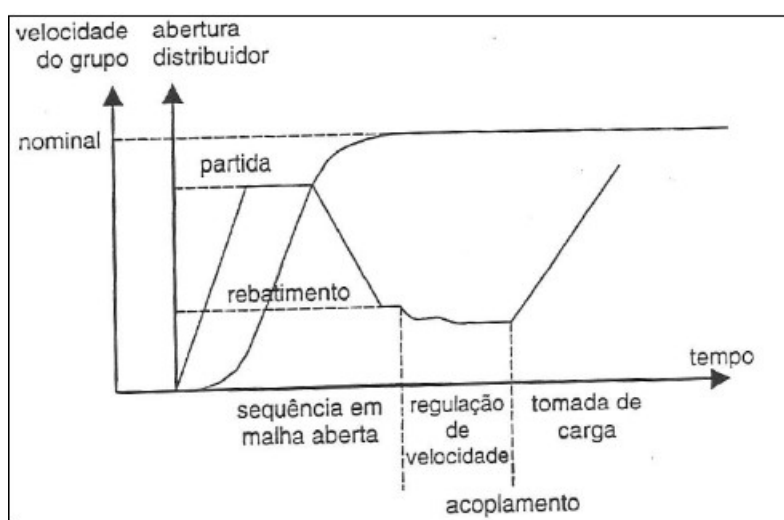


Figura 9- Abertura do Distribuidor e Regulação de Velocidade

Fonte: Manual Regulador de Velocidade (2020)

3.2.11 Degraus de Velocidade

Independente da Cadeia Taquimétrica Auxiliar, o regulador é capaz de fornecer alguns degraus de velocidade de acordo com o número de saídas lógicas disponíveis.

3.2.12 Degraus de Potência

Dois degraus de potências são disponíveis sob a forma de saídas lógicas para o automatismo, por exemplo para sinalizar "potência nula" (para autorizar a abertura do disjuntor) e "potência nominal".

3.2.13 Tele indicações

As tele indicações possíveis dependem da quantidade de saídas analógicas deixadas livres pelas outras funções do regulador. Essas são no mínimo:

- Frequência do Grupo,
- Referência de Velocidade / Carga,
- Limitação de abertura,
- Posição do Distribuidor

3.2.14 Supervisão dos Defeitos

Os defeitos supervisionados são classificados em duas categorias:

- Defeitos Maiores: São aqueles defeitos que não permitem ao regulador de preservar o controle da máquina - defeitos do sistema (defeito de memória, cão de guarda) e perda da medida de velocidade do grupo. Esses defeitos provocam a parada da máquina e são sinalizados por uma saída lógica dedicada. Uma informação mais precisa sobre a natureza do defeito está disponível no terminal de controle.
- Defeitos menores: São aqueles defeitos que não colocam em perigo a segurança da máquina. Eles são sinalizados por uma saída lógica dedicada, e informações mais precisas no terminal de controle quando do restabelecimento do funcionamento normal do regulador. Esses defeitos são anulados por reset após a eliminação da causa.

3.3 Descrição dos modos automáticos de regulação

3.3.1 Regulador de Rotação

O regulador de rotação é um regulador do tipo PID ajustado por parâmetros (os parâmetros do regulador são variáveis de acordo com a condição de operação). Há 3 conjuntos de parâmetros: Operação a vazio, operação isolada e operação em paralelo na rede. O parâmetro ajustado para operação em vazio é sempre efetivo

quando o gerador não está sincronizado. A comutação manual de operação isolada para operação interligada é possível se o disjuntor do gerador estiver fechado. A comutação automática de operação interligada para operação isolada é efetuada se a faixa permitida ajustável de frequência for ultrapassada. Na seleção de mínimo, o valor de saída do regulador de rotação é comparado com a limitação de abertura, sendo o menor valor a saída para a regulação do posicionamento. Com outro modo de regulação, o circuito de regulação de velocidade não é efetivo; entretanto, o ajuste de regulação da rotação acompanha de acordo com o estatismo permanente, ajustado de forma que na comutação para regulação da velocidade a abertura do distribuidor é inicialmente mantida.

3.3.2 Regulador de Abertura

A regulação de abertura posiciona a abertura do distribuidor como um limitador, deixando-a fixa num valor desejado. Caso a frequência ultrapasse a variação de um Δn maior que o ajustado, então haverá comutação para Regulação de Velocidade Isolada. A regulação de abertura corresponde à introdução de um ajuste de regulação para a malha de controle de posicionamento para o servomotor do distribuidor. No caso de regulação de abertura ligado, em operação interligada, o distribuidor acompanha diretamente esse ajuste de regulação. Durante o procedimento de partida, o distribuidor acompanha o ajuste de regulação com duas aberturas (partida I e partida II). Durante a partida da turbina, o valor da regulação de abertura é comparado com aquele do regulador de velocidade, e o menor desses valores é transferido para o ponto de regulação do distribuidor (seleção de mínimo). A regulação é realizada de forma que seja válida como uma limitação de abertura nos outros modos de regulação.

3.3.3 Regulação de Potência

Se o disjuntor do gerador estiver fechado e a frequência estiver dentro da faixa admissível, a regulação de potência pode ser ativada a partir de todos os outros modos de operação por meio da tecla potência ou da entrada remota. Após

um procedimento de partida a comutação para regulação de potencia é feita automaticamente, se o parâmetro correspondente estiver ajustado. O Ajuste de regulação da potencia pode ser mudado por meio da alteração do valor desejado, através dos comandos “Aumentar / Diminuir”. O valor de saída da regulação de potencia é determinado pela comparação do ajuste de regulação de potencia com o valor real da mesma, através de uma função de regulação PI. Os parâmetros de regulação, estatismo e constante de tempo de amortecimento são valores fixos que podem ser alterados via parâmetros pelo regulador.

3.4 Transduções do regulador de velocidade

3.4.1 Potência

O regulador está provido de um transdutor para medição da potencia ativa. O transdutor de potência usa entradas de corrente e entradas de tensão provenientes de TCs e TPs, para calcular a potencia ativa e gera em sua saída um sinal de corrente de 4 a 20 mA, correspondente à potencia gerada pelo gerador.

3.4.2 Posição do distribuidor

Um transdutor linear de deslocamento (LVDT) é empregado como transmissor da posição do distribuidor. A posição do distribuidor totalmente fechado corresponde a um sinal na saída de 4 mA e a posição totalmente aberto corresponde a um sinal de 20 mA.

3.5 Limitações do sistema atual de regulação de velocidade

Todos os Sistemas de Regulação de Velocidade das três Unidades Geradoras foram modernizados por volta do ano de 1998, a figura 18 ilustra o esquema básico do sistema de regulação atual, instalado.

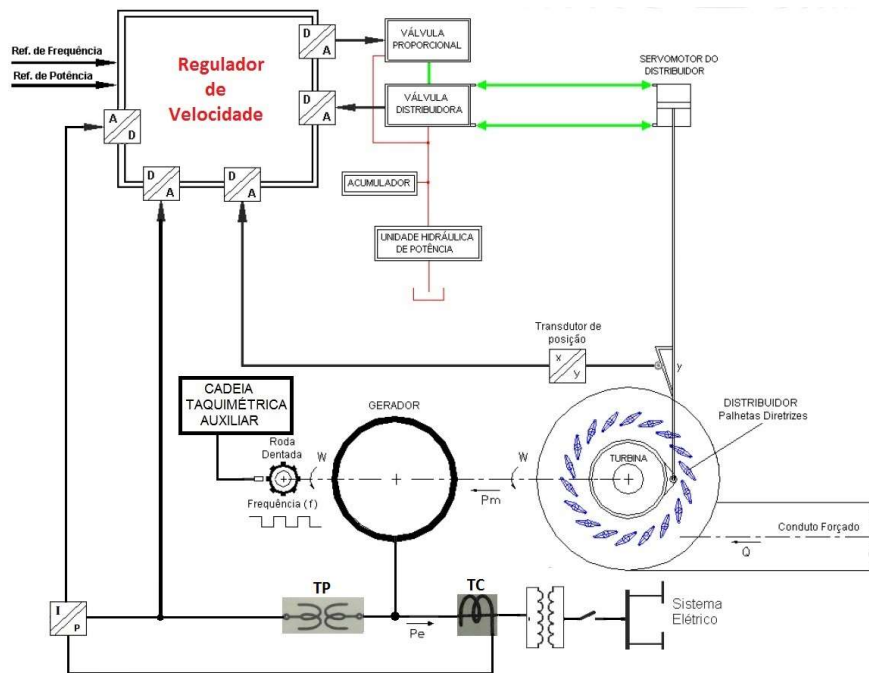


Figura 10- Esquema Básico de Regulação Instalado

Fonte: Do Autor (2020)

No entanto, a filosofia do Sistema de Regulação de Velocidade possui algumas limitações e inconvenientes para o sistema de geração, ao qual ele se emprega, como por exemplo:

- O armário do regulador de velocidade possui apenas um canal de controle principal, sem a existência de um canal retaguarda, responsável por assumir o controle de regulação de velocidade no caso de uma possível falha no canal principal.
- A realimentação de velocidade/frequência é realizada somente por meio de um Transformador de Potencial (TP) de 6900 v / 115v, instalado na saída do barramento do gerador. Isso traz o problema de que se perdida a única realimentação de frequência existente, a Unidade Geradora necessitará realizar seu desligamento da rede com parada total da unidade. A figura 19 mostra o TP utilizado para a realimentação de frequência/velocidade.



Figura 11- TP utilizado para medição da frequência do grupo

Fonte: Concessionária de Energia do Vale do Paraíba (2020)

- Para realizar apenas giro mecânico do gerador para testes, o gerador não pode estar com aterramento temporário instalado em seus terminais. Pois com os terminais do gerador curto circuitados não existirá o sinal da realimentação de frequência do Regulador de Velocidade, não sendo, desta maneira, possível, o regulador realizar o controle de rotação, sendo necessário, a parada do Gerador.
- Outro inconveniente, é que em caso de baixo magnetismo residual (remanente), na fase de giro mecânico sem excitação do gerador, a tensão de saída do gerador pode não ser suficiente para que o TP possa alimentar até mesmo a entrada de realimentação em frequência do Regulador de Velocidade, devido ao remanente magnético não ser suficiente para gerar uma tensão residual mínima para entrada de sinal de frequência.
- Outra limitação, é que no caso de um curto circuito indesejado nos terminais do gerador ou no circuito do Transformador de Potencial, o Regulador não poderá ter o monitoramento e controle da velocidade de rotação do gerador, sendo, portanto necessário que o monitoramento da velocidade e proteção de sobrevelocidade seja realizado por outros sistemas auxiliares ao sistema de regulação.
- Para baixas rotações devido ao baixo magnetismo remanente, a tensão do secundário do TP apresenta níveis muito baixos, não tendo a amplitude necessária nem mesmo para "alimentar" o cartão de entrada de sinal tensão do Controlador Principal.

4 MODERNIZAÇÃO

Através de um relatório de análise estatística de desempenho, realizado pela ABRAGE (2014) em um levantamento de dados entre os anos de 2003 a 2014, pode-se verificar que desde 2003, mantém-se a tendência de maior número de falhas provenientes dos reguladores de velocidade para unidades geradoras hidráulicas e térmicas. Em contrapartida, as falhas no regulador de velocidade não são os que apresentam maior tempo médio de reparo. A tabela 3 apresenta o histórico de falhas no período do levantamento estratificados por equipamentos.

O cenário na usina hidrelétrica ao qual se propõe a modernização não se difere do levantamento realizado pela associação, sendo também o regulador de velocidade o maior causador de falhas. Embora não tenha sido caracterizado no relatório se as falhas no regulador de velocidade, são provenientes de componentes elétricos ou mecânicos.

Em decorrência deste elevado número de falhas, além de outros problemas apresentados no sistema de regulação e a obsolescência de alguns componentes do sistema, tornou-se pertinente à modernização, sendo necessário para a redução do número de falhas e aumento de confiabilidade, o emprego de novas tecnologias e filosofias de funcionamento.

Tabela 3 - Falhas em Hidrogeradores Estratificados por Equipamento

Equipamento	Quantidade de Falhas											
	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003
Reg. velocidade	182	170	231	212	232	252	225	200	192	129	176	170
Excitação	114	118	151	132	148	137	133	127	136	116	117	70
Turbina	88	82	73	124	108	74	116	127	104	71	74	77
Gerador	84	125	111	136	119	195	152	138	134	80	119	110
Quad. comando	63	101	75	42	35	24	55	49	25	19	24	31
Mancal guia	50	40	50	78	70	49	101	90	52	26	26	36
Serviço auxiliar	45	59	43	58	41	57	40	36	27	24	18	32
Proteção	43	66	74	48	52	28	160	180	46	21	38	39
Adução / Sucção	38	31	27	34	68	43	55	56	49	35	67	69
Mancal escora	31	44	25	20	33	34	31	35	27	25	13	23
Mancal combin.	18	7	19	13	33	14	25	18	28	7	7	8
Transf. corrente	1	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Transformador	-	45	34	53	51	31	52	47	34	43	30	42
Disjuntor	-	31	32	22	33	23	56	57	21	12	27	13
Seccionadora	-	8	6	7	13	12	5	4	0	2	5	4
Outros	6	15	18	329	2	0	7	8	6	2	21	8
Total	763	943	973	1.309	1.043	973	1.213	1.172	885	620	763	738

Fonte: Associação Brasileira das Empresas Geradoras de Energia Elétrica, 2014.

4.1 Informações gerais dos equipamentos empregados na modernização

- **Dados de placa do gerador**

Fabricante: SIEMENS

Potência: 55,0 MVA

Tensão terminal Nominal: 6,5 Kv

Frequência Nominal: 60,0 Hz

Fator de Potência Nominal: 0,80

- **Sistema de Regulação de Velocidade**

Fabricante: REIVAX

Ano de fabricação: 2019

Número do projeto: F19013

Número serial: 19PNL079

Canal de controle: Duplo

Modos de controle de regulação de Velocidade/Potência: Velocidade, Potência e Abertura

- **Lista de Variáveis Monitoradas durante o comissionamento**

Ref. RV - Referência do Regulador de Velocidade [pu].

Pe - Potência Ativa [pu].

w - Velocidade [pu].

H - Queda Líquida [pu].

Ctrl - Sinal de Controle [pu].

12E - Sobrevelocidade Elétrica.

12M - Sobrevelocidade Mecânica.

65 - Válvula de Partida.

CH1 - Canal 1.

CH2 - Canal 2.

Yga - Posição do Distribuidor [pu].

Ref. Yga - Referência de Posição do Distribuidor [pu].

Ygadv - Posição da Válvula Distribuidora do Distribuidor [pu].

Ref. Ygadv - Referência de Posição da Válvula Distribuidora do Distribuidor [pu].

4.2 Estrutura empregada na modernização

A arquitetura do sistema ao qual se propõe a modernização era composto de um sistema mono canal, ou seja, um único CLP realizava todo controle elétrico de regulação de velocidade, desta forma, uma falha neste CLP ocasionava o desligamento do gerador.

Visando o aumento de confiabilidade do equipamento, tomou-se por decisão a aplicação de um sistema operando com topologia de duplo canal, sendo desta forma, o sistema composto de um canal de controle principal, que comanda o sistema e um canal de controle retaguarda, que opera em hot-standby, onde a comutação é realizada automaticamente através de diagnósticos de falha no canal de controle principal.

Conciliou-se com a aplicação desta topologia de duplo canal, a possibilidade de se realizar manutenção no controlador em caso de comutação para o canal redundante por motivo de falha no canal principal enquanto o sistema redundante estiver em operação, ou seja, o sistema permite que a manutenção seja realizada mesmo que o gerador esteja operando normalmente, sem afetar o desempenho e controle do gerador.

Outro ponto de atenção no regulador de velocidade a ser modernizado, é o sistema de medição de velocidade/frequência bastante limitado no que diz respeito a confiabilidade, pois a medição era realizada somente por um conjunto de tp's, instalados nos barramentos de saída do gerador, que em caso de falha em algum destes tp's ou em caso de perda de remanente no gerador, o regulador de velocidade não operava corretamente ocasionando desligamento do gerador. Pensando na solução dessa limitação, a opção implantada foi a instalação de mais um conjunto de transformadores de potencial instalado na saída do barramento de geração juntamente com dois sensores indutivos que recebem o nome de pick-up junto a uma roda dentada de seis dentes no eixo do gerador que auxiliam na medição de frequência do grupo durante a partida, pois devido ao fato da referência de tensão recebida dos tp's serem muito baixas durante a partida do gerador o regulador de velocidade prioriza os sensores indutivos como a medição da frequência principal até o gerador atingir 50% da sua frequência nominal. Com a nova configuração, o sistema de medição de frequência/velocidade está sendo realizada por dois TP's e

dois pick-ups distintos, cada um ligado a um canal de controle diferente, sendo assim, caso ocorra um problema no TP ou pick-up do canal 1, este canal irá identificar a falha e comutará para o canal 2, que por sua vez assumirá o controle, aumentando assim a confiabilidade e segurança do sistema.

Foi realizado também uma mudança de filofia de funcionamento das bombas de pressurização do sistema hidráulico. No sistema anterior quando uma bomba apresentava baixo rendimento a pressão do sistema diminuía até que atingisse um valor de pressão determinado para que a bomba reserva entrasse em operação. O processo de troca das bombas consistia em primeiro desligar a bomba principal e depois ligar a bomba reserva, mas esse processo era ineficiente pois quando a bomba principal era desligada a pressão do sistema que já estava caindo caía ainda mais rápido já que a bomba reserva ainda necessitava de um tempo pequeno para começar a pressurizar o sistema novamente, e durante esse pequeno intervalo o gerador desarmava por pressão crítica baixa no sistema hidráulico. Para solução do problema foi alterada a filosofia de funcionamento das bombas, caso a bomba principal do sistema falhasse ou apresentasse baixo rendimento a bomba reserva operaria junto a bomba principal impedindo assim que o sistema continuasse a perder pressão.

4.3 Ensaios realizados no comissionamento

4.3.1 Verificações iniciais

Com o início do comissionamento de forma efetiva, uma primeira inspeção foi feita, com o objetivo de verificar eventuais danos aos equipamentos referentes ao transporte e/ou carga/descarga do mesmo. Durante esta inspeção foram verificados os seguintes pontos:

- Danos mecânicos ao painel ou aos componentes da porta do painel (IHM e chaves seletoras);
- Avarias na pintura do painel e componentes;
- Componentes quebrados ou com fixação frouxa;
- Sujeira, umidade, vestígios de presença de água;

- Cabos frouxos ou falta de identificação de fiação;

Como não foi identificado nenhuma anormalidade no painel, foi realizado ensaios de resistência de isolamento nos circuitos do painel utilizando um Megger com tensão de ensaio de 500Vcc a fim de identificar possíveis pontos de curto circuito.

Após os ensaios de resistência de isolamento, foi dado início à interligação do painel com os periféricos da usina.

4.3.2 Circuitos de alimentação

Após a interligação do painel com os periféricos da usina foi reapertado todas as borneiras e conexões e o painel foi energizado.

Após a energização do painel, foram medidos todos os valores de tensão nas fontes auxiliares, externas ou transformadas internamente, constatando que os valores das medições estavam dentro dos valores de tolerância do circuito.

4.3.3 Interfaces

A validação das interfaces é muito importante pois garante que toda a interligação do painel com os periféricos da usina foi ligada de maneira correta, garantindo que os comandos, estados de operação e proteções funcionarão de acordo com a filosofia da usina.

Com a configuração de duplo canal de controle foi empregada, todos os testes de interface foram realizados nos dois canais.

- **Interfaces externas – Entradas digitais**

As primeiras interfaces testadas e constatadas o correto funcionamento, foram as entradas digitais que são os estados e comandos externos recebidos pelo regulador, como exemplo os comandos de partida e parada do gerador oriundos do sistema digital.

- **Interfaces externas - Saídas digitais**

Assim como nas entradas digitais, as saídas digitais do regulador também foram plenamente testadas e tiveram seu funcionamento aprovado, como exemplo as saídas de alarme e Trip para o sistema digital.

- **Interface externas – Entradas analógicas**

As entradas analógicas foram forçadas em campo de acordo com o diagrama elétrico e verificado a indicação correspondente recebida na IHM local, como exemplo, os sinais de frequência oriundos dos TP's, Pickups e posição do distribuidor.

- **Interface externas – Saídas analógicas**

As saídas analógicas foram testadas forçando os sinais na IHM local do regulador e verificado aos valores de acordo com o diagrama elétrico, como exemplo, os valores de potência, a posição do distribuidor e os valores de frequência.

- **Interface externas – Sinais de proteção**

Nesta etapa foram testados todos os estados e comandos oriundos do sistema de proteção do grupo, validando a lógica implementada, bem como o projeto de interligação do painel com o sistema de proteção implantado na Usina.

- **Comunicação**

Para finalizar os testes das interfaces, foram testados todos os sinais analógicos e digitais trocados via rede, entre o sistema de regulação de velocidade e o sistema de automação empregado na Usina.

4.3.4 Ensaios no demarrador da unidade hidráulica

- **Ensaio de comando manual nas bombas**

Antes de realizar os ensaios nas bombas, foram configurados na IHM os parâmetros para controle e correto funcionamento do sistema hidráulico. Foram definidos os seguintes parâmetros:

- I. Pressão baixa no sistema hidráulico – 105bar alarme
- II. Pressão liga bomba reserva – 100bar
- III. Pressão muito baixa no sistema hidráulico – 95bar desligamento do gerador
- IV. Temperatura alta do óleo – 50°C alarme
- V. Temperatura muito alta do óleo – 60°C desligamento do gerador

Com os parâmetros de controle configurados foram realizados os ensaios de operação das bombas de modo manual.

- **Ensaio de pressurização do sistema hidráulico em automático**

Este ensaio foi realizado para constatar o correto funcionamento do sistema hidráulico quando operando automaticamente. Para esse ensaio as duas bombas foram desligadas e o modo de controle do sistema foi comutado para automático, com o sistema operando em automático a bomba selecionada como principal ligou e fez controle da pressão do sistema corretamente, o teste foi realizado nas duas bombas obtendo resultados satisfatórios.

Foi realizado também o teste de atuação da bomba reserva, através do nível de pressão liga bomba reserva e por falha da bomba principal obtendo também resultados satisfatórios.

4.3.5 Ensaios em água morta

O objetivo dos ensaios em água morta é sintonizar e refinar os ajustes da malha de controle do atuador, para isso é necessário testar todos os sensores e o funcionamento de todo o conjunto hidráulico do sistema de regulação de velocidade.

Em toda esta etapa, o controle de posição das válvulas e do distribuidor para o sistema de regulação de velocidade é mantido em malha aberta, e o fechamento das malhas de controle só pode ser efetuado após a finalização desses ensaios.

Vale salientar que esses ensaios acontecem com o conduto forçado totalmente drenado, sendo assim com a turbina sem água.

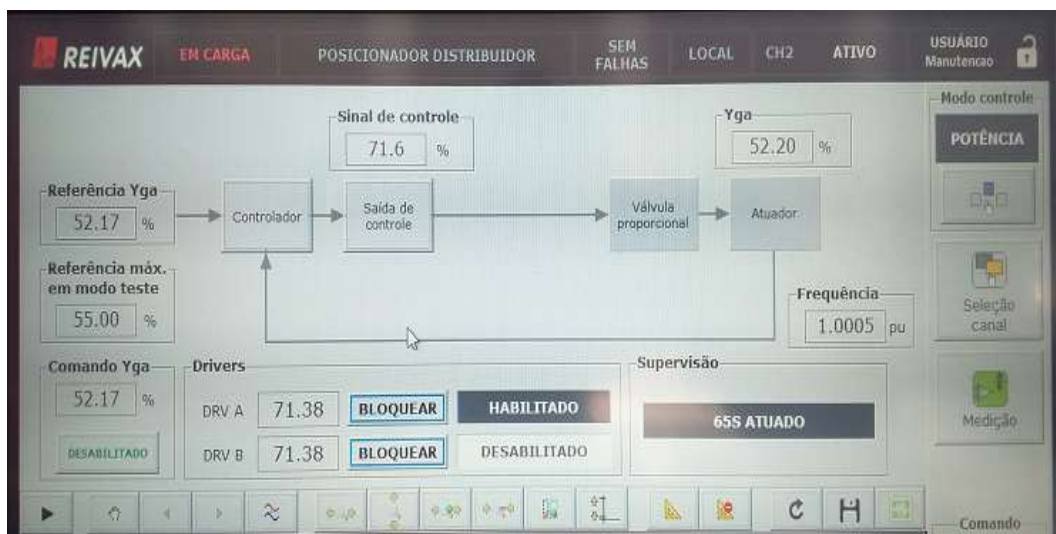


Figura 12 - Malha de Controle do Atuador

Fonte: Reivax (2020)

- **Ajuste de escala do transdutor de posição do distribuidor – LVDT**

Com o LVDT instalado, foi realizado o ajuste na escala de funcionamento do mesmo. O sinal analógico do LVDT varia de 4 a 20mA, sendo 4mA correspondente ao distribuidor totalmente fechado e 20mA para o distribuidor totalmente aberto. Como o distribuidor estava fechado o valor de escala referente ao distribuidor totalmente fechado foi configurado, porém o valor referente ao distribuidor totalmente aberto só foi configurado após a abertura total do distribuidor.

- **Ajuste dos sensores de velocidade: Pickup**

Os sensores Pickup são sensores indutivos de proximidade, que geram sinais em forma de onda quadrada. Esses sensores ficam instalados próximo ao eixo

do gerador junto a uma roda dentada com uma proximidade especificada pelo fabricante do sensor, para o correto funcionamento esses sensores foram instalados um ao lado do outro.

O ajuste destes sensores para a transdução da frequência leva em conta o número de dentes da roda dentada e a velocidade em rpm da turbina, seguindo o seguinte cálculo:

$$FN = \frac{RPM * N}{60}$$

Onde:

FN = frequência nominal do pick-up

RPM – Rotação nominal do conjunto turbina-gerador

N – Número de dentes da roda dentada

O conjunto gerador turbina em questão trabalha com 720 RPM e a roda dentada onde foi instalado os sensores possui 6 dentes.

- **Esmagamento das palhetas do distribuidor para ajuste Mecânico**

Este esmagamento serve para ajustar o distribuidor de forma a obter o máximo fechamento das palhetas, que reflete no menor vazamento dentro da turbina. O esmagamento das palhetas é um ajuste mecânico extremamente importante que tem impacto direto no funcionamento do sistema de regulação de velocidade.

- **Desempenho dinâmico dos atuadores (Abertura e Fechamento)**

A primeira etapa dos ajustes em água morta foi movimentação da válvula proporcional. Essa movimentação foi realizada utilizando a própria unidade de processamento do sistema de regulação, já que a válvula trabalha com valores de comando de 4 a 20mA.

Através de comando direto do RV, foram forçados os valores máximos e mínimos para movimentação total do atuador que corresponde a 20mA para abertura máxima do atuador e 4mA para fechamento máximo.

O ajuste do transdutor de posição do distribuidor é realizado verificando-se os extremos das excursões do atuador quando em abertura e fechamento. O sinal proveniente do transdutor de posição do atuador precisa ser escalonado, isto é, deve ser condicionado de maneira a ser corretamente interpretado pelo controle do regulador de velocidade, considerando que a unidade de processamento admite valores na faixa de 4 a 20mA.

O objetivo destes ajustes é garantir a perfeita realimentação dos componentes mecânicos, garantindo a boa qualidade da regulação. A qualidade da regulação depende diretamente da qualidade das medidas realimentadas e, sendo assim, é muito importante que o ajuste seja realizado com precisão.

Comando de Abertura do Distribuidor

Tempo Total de Abertura do Distribuidor = 14.83 s.

Taxa de Abertura do Distribuidor = 6.74 %/s

Comando de Fechamento do Distribuidor

Tempo Total de Fechamento do Distribuidor = 14.64s.

Taxa de Fechamento do Distribuidor = 6.83 %/s.

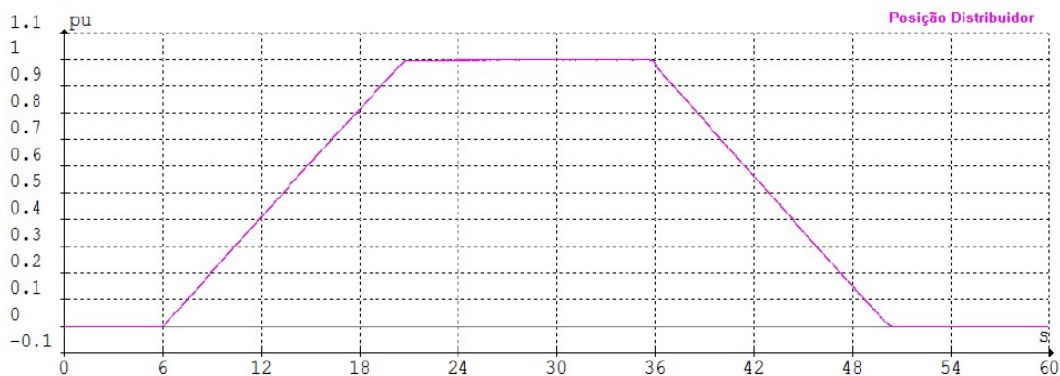


Figura 13 - Oscilografia do ensaio de Abertura e Fechamento do distribuidor

Fonte: Reivax (2020)

- **Máxima velocidade de fechamento do atuador (Fechamento em emergência)**

O ajuste da máxima abertura e fechamento dos servos no RV é de fundamental importância devido às restrições impostas pelos componentes da turbina, tais como, conduto forçado e caixa espiral. Além da sobrepressão causada nos

condutos e na turbina, é importante saber que a resposta do fechamento em máxima velocidade do atuador a uma rejeição de carga é diretamente relacionada a uma maior ou menor sobrevelocidade admitida.

Uma consideração importante é que a máxima velocidade de fechamento do distribuidor, deve ser ajustada de acordo com a pressão admitida no conduto forçado e caixa espiral, de modo a evitar sobre pressões elevadas na caixa espiral e em casos graves o fenômeno do golpe de aríete no conduto.

O ajuste de máxima velocidade de abertura e fechamento do atuador, foi realizado de acordo com os valores admissíveis no projeto por meio de ajuste nas válvulas reguladoras de vazão na saída da unidade hidráulica.

Fechamento do Distribuidor pela Emergência

Tempo Total de Fechamento do Distribuidor = 2.9 s.

Taxa de Fechamento do Distribuidor = 34.36 %/s.

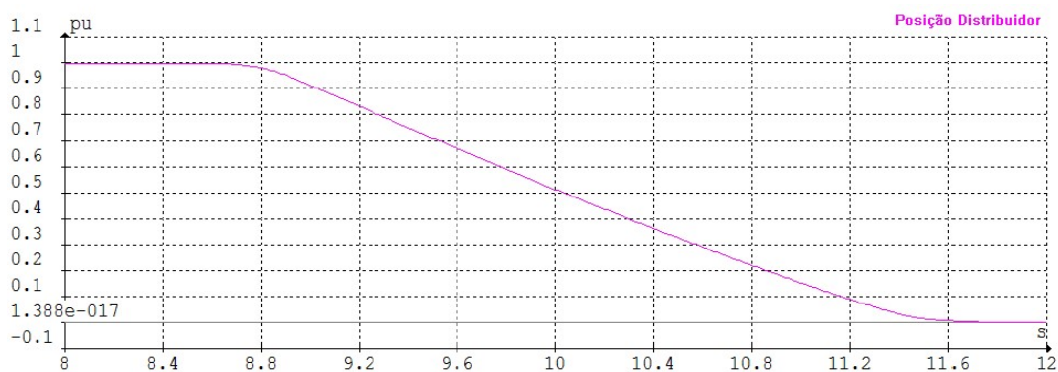


Figura 14 - Oscilografia do Ensaio de Máxima Velocidade de Fechamento do Distribuidor

Fonte: Reivax (2020)

- **Ajuste das malhas de controle do atuador**

A qualidade do controle de velocidade e potência depende diretamente da qualidade do ajuste das malhas de controle do atuador e das válvulas.

Para se obter a melhor resposta, o ajuste das malhas foi feito através da resposta a um degrau aplicado em suas referências, através do comando direto da malha e verificando um posicionamento rápido, com baixo overshoot e mínimo erro em regime.

➤ Regime em Controle de Posição Distribuidor

O ensaio consiste em aplicar uma referência de 0,5 PU no Posicionamento do distribuidor, alcançada a posição em regime, observar se a resposta ao sinal aplicado está de acordo com o esperado.

Regime em Controle de Posição Distribuidor

Condição Inicial do Ensaio: $Y_{ga} = 0.500pu$

Valor Máximo: $Y_{ga} = 0.5007pu$

Valor Mínimo: $Y_{ga} = 0.4991pu$



Figura 15 - Oscilografia Gerada na Ensaio de Controle de Posição do Distribuidor

Fonte: Reivax (2020)

➤ Degrau de Posição do Distribuidor

O ensaio consiste em aplicar um degrau de 0,5 PU na referência de Posicionamento do distribuidor e observar estabilidade de resposta do regulador ao degrau aplicado.

Degrau de Posição do Distribuidor

Aplicação do Degrau = 2.0s. Retirada do Degrau = 14.9s.

Valor do Degrau = 0.05pu.

Sobressinal = 0.00%.

Tempo de Subida = 1.52s.

Tempo de Acomodação (faixa = 0.003pu) = 1.93s.

Condição Inicial do Ensaio: $Y_{ga} = 0.50pu$

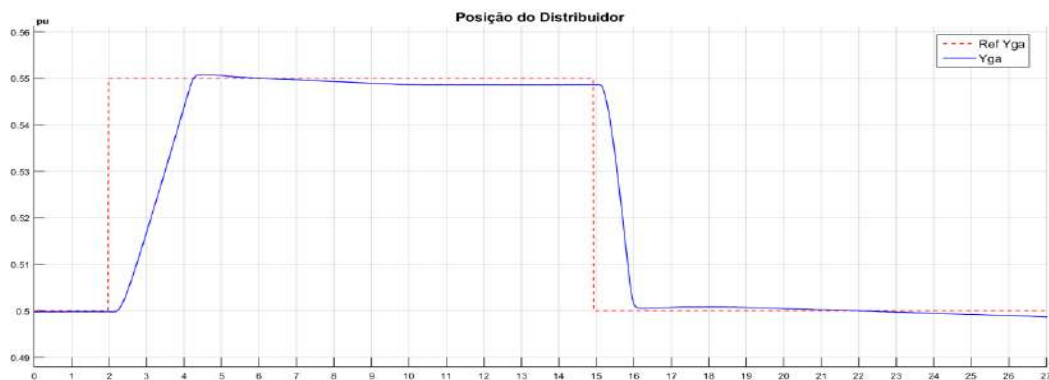


Figura 16 - Oscilografia Gerada no Ensaio de degrau de Posição do Distribuidor

Fonte: Reivax (2020)

- **Degrau de Posição Gradativa do Distribuidor**

O objetivo do ensaio é verificar a resposta de todos os sinais de controle oriundos do campo recebidos pelo regulador. O ensaio consiste em aplicar gradativos degraus de 0,1 PU de forma crescente na referência de Posicionamento do distribuidor até que a referência máxima de 1 PU seja alcançada, após isso aplicar os mesmos degraus de forma decrescente até a referência de 0 PU.

Degrau de Posição Gradativa do Distribuidor

Valor do Degrau = 0.10pu.



Figura 17 - Oscilografia do Ensaio de Degraus Gradativos do Distribuidor

Fonte: Reivax (2020)

4.3.6 Ensaios em vazio.

A etapa de ensaios a vazio visa configurar a lógica de partida automática da turbina e a malha de controle de velocidade nominal a vazio (*speed no load*).

- **Partida limitada - determinação dos limites de Partida 1 e Partida 2**

Este ensaio é realizado a fim de se obter os valores de ajuste dos Limitadores de abertura para as Partida 1 e 2 e a rotação com o qual ocorrerá a comutação da Partida 1 para a Partida 2. O valor ajustado para o Limitador de Partida 1 fará com que durante o processo de partida, o atuador abra até este valor. Chegando até uma determinada rotação, o regulador comutará o limitador do atuador para Partida 2 (que deve ser inferior à Partida 1), fazendo com que a rotação aumente em uma taxa menor. Isto é feito com propósito de impedir grandes *overshoots* de velocidade/frequência.

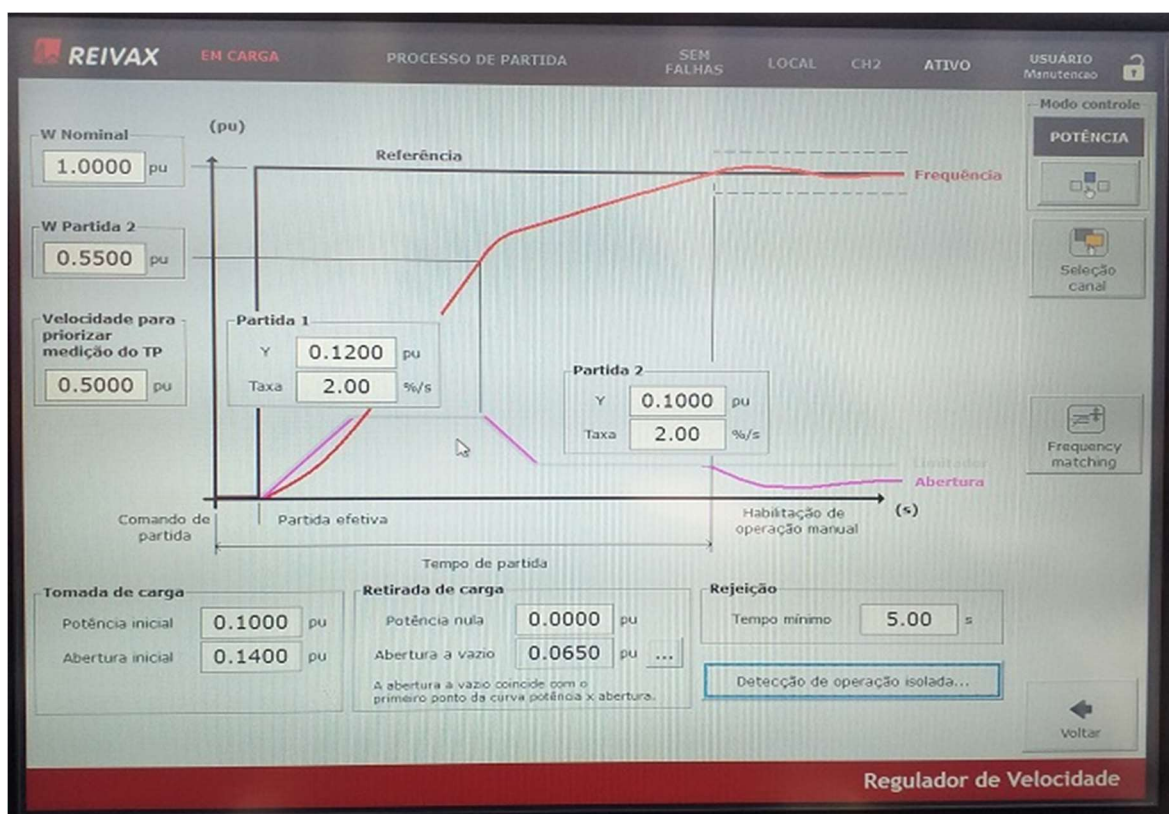


Figura 18 - Lógica de Controle de Partida Automática do Regulador

Fonte: Reivax (2020)

- **Partida Automática**

O ensaio de Partida Automática é a confirmação de uma boa parametrização da lógica de partida do RV e o início dos ensaios dinâmicos para ajustes de malha de controle de velocidade.

Basicamente, este ensaio se propõe a confirmar os valores do Limitador de Partida 1, Partida 2 e Velocidade de Comutação de Partida 1 para Partida 2, de forma a obter rapidez na partida, pouco *overshoot* de velocidade/frequência, nenhuma oscilação e baixo erro em regime.

Partida Automática

Instante do Comando de Partida = 18.00s.

Tempo Total de Partida = 69.4s.

Tempo de Aceleração de 10% até 90% = 47.9s.

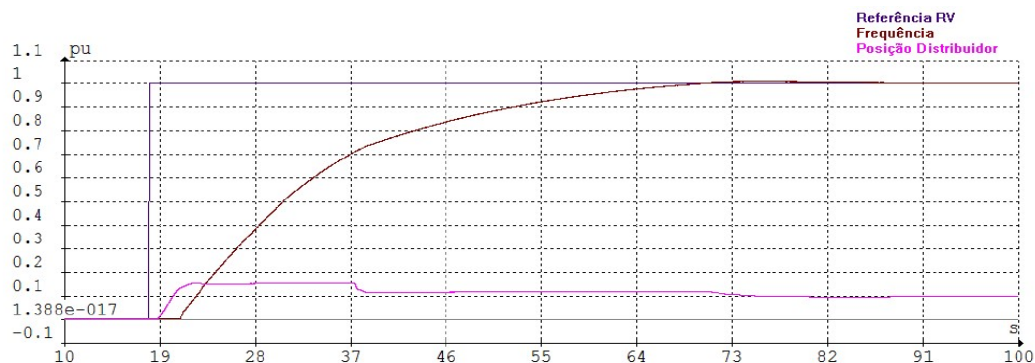


Figura 19 - Oscilografia do Ensaio de Partida Automática do Rgulador

Fonte: Reivax (2020)

- **Ajuste da malha de velocidade**

Para ajustar o desempenho dinâmico do regulador de velocidade, foram realizados ensaios alterando o valor da referência de frequência simulando assim variações de frequência. O comportamento dinâmico foi observado e os parâmetros foram ajustados de acordo com necessidade. Esse controle funciona com a unidade em velocidade nominal a vazio, o que inclui também situações de rejeição de carga, processo de sincronismo e partida da unidade.

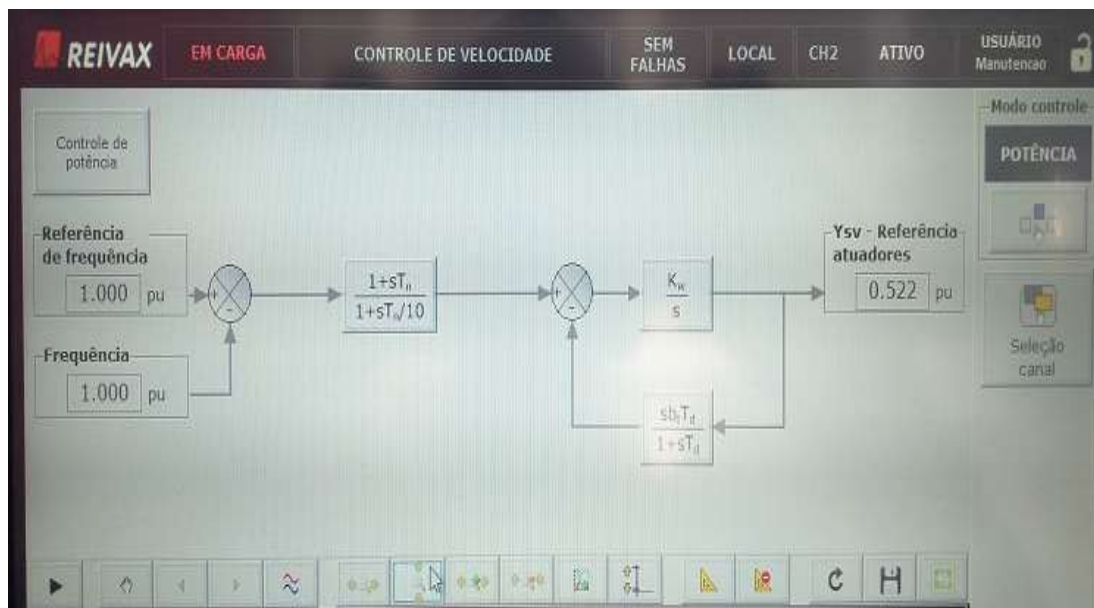


Figura 20 - Malha de Controle de Velocidade a Vazio

Fonte: Reivax (2020)

- **Verificação da estabilidade a vazio**

O objetivo deste ensaio é verificar se o nível de oscilação dos posicionadores e da frequência sem a alteração da referência estão em valores considerados normais. Para isso foi feita a comutação da medição de frequência entre os pickups e os TP's verificando as respostas.

- **Verificação da estabilidade a vazio com controle da frequência por TP**

A medição de frequência através dos sinais dos TP's são os sinais de frequência mais precisos e confiáveis do RV, por esse motivo quando o sistema está operando em regime permanente, os sinais dos TP's são adotados como a medição de frequência principal.

Para que o resultado do ensaio seja considerado satisfatório, o gerador não pode apresentar grandes oscilações e nem overshoot em suas referências.

Regime em Controle de Velocidade por TP

Condição Inicial do Ensaio: $Y_{ga} = 0.076pu$; $w = 1.0000pu$

Valor Máximo: $Y_{ga} = 0.080pu$; $w = 1.0009pu$

Valor Mínimo: $Y_{ga} = 0.072pu$; $w = 0.9993pu$

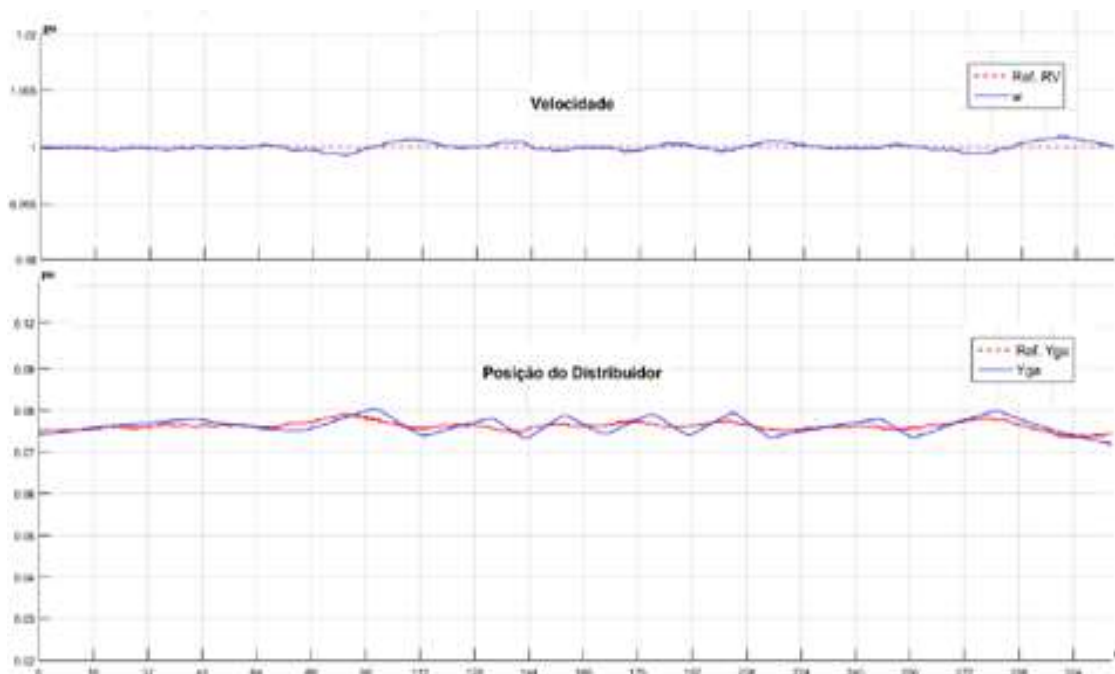


Figura 21 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a vazio por TP

Fonte: Reivax (2020)

➤ Verificação da estabilidade a vazio com controle da velocidade por Pickup

Embora o RV não utilize os sinais de frequência oriundos dos pick-ups com sinais principais, os sinais dos pick-ups são muito importantes durante a partida do gerador, pois nos momentos iniciais quando a velocidade ainda é baixa o remanente do campo não é forte o suficiente para gerar valores de tensão que possam ser convertidos pelos TP's e lidos no RV como referência de frequência.

Como o sinal de frequência gerado pelos pick-ups, são oriundos do chaveamento do sensor, a medição pode apresentar ruídos e causar pequenas oscilações nas referências do RV, que são consideradas normais em valores baixos.

Regime em Controle de Velocidade por Pickup

Condição Inicial do Ensaio: $Y_{ga} = 0.077pu$; $w = 0.9999pu$

Valor Máximo: $Y_{ga} = 0.080pu$; $w = 1.0011pu$

Valor Mínimo: $Y_{ga} = 0.073pu$; $w = 0.9991pu$

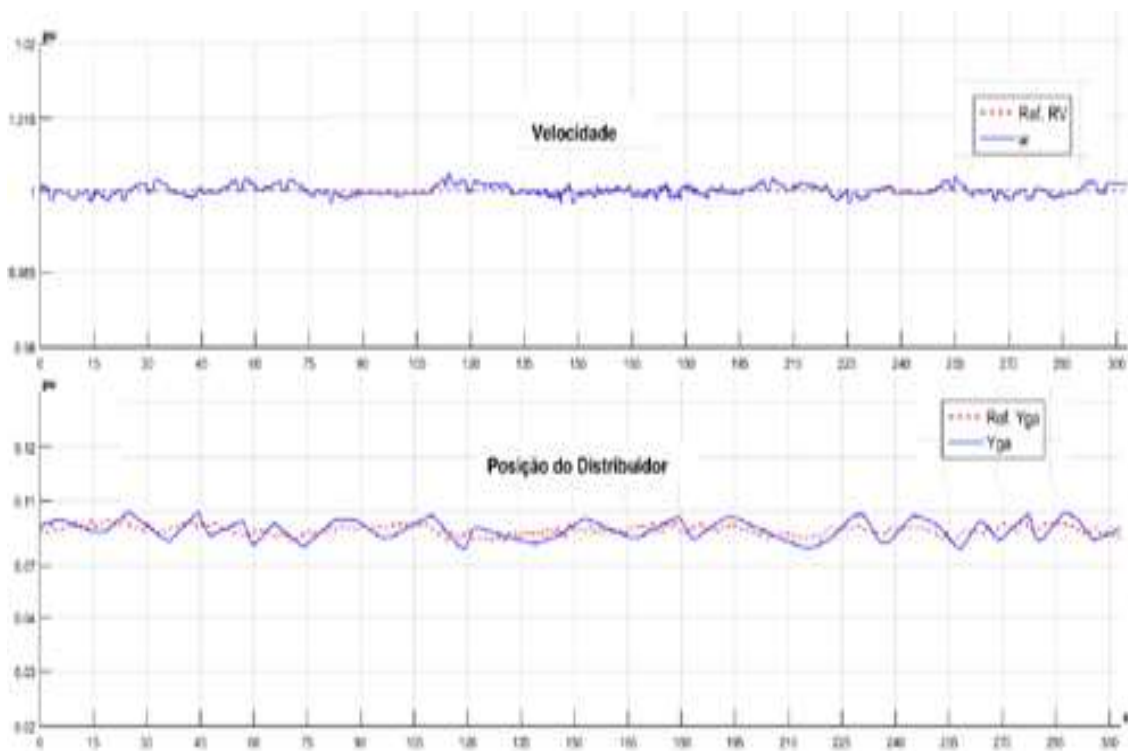


Figura 22 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a Vazio por Pickup

Fonte: Reivax (2020)

- **Verificação da estabilidade a vazio, à um degrau aplicado com controle da velocidade por TP**

Para degrais de velocidade com valores baixos como o adotado no ensaio, devido ao tempo de resposta dos componentes mecânicos do sistema de regulação, são considerados normais overshoots na velocidade com valores inferiores a 20%, entretanto a resposta do RV ao degrau deve ser estável, ou seja, sem gerar oscilações nas referências.

Degrau de Velocidade por TP

Instante da aplicação do degraú = 5.00s.

Valor do Degrau = 0.02pu.

Sobressinal = 16.19%.

Tempo de Subida = 3.00s.

Tempo de Acomodação (faixa = 0.002pu) = 13.26s.

Condição Inicial do Ensaio: $Y_{ga} = 0.08\text{pu}$; $w = 1.00\text{pu}$

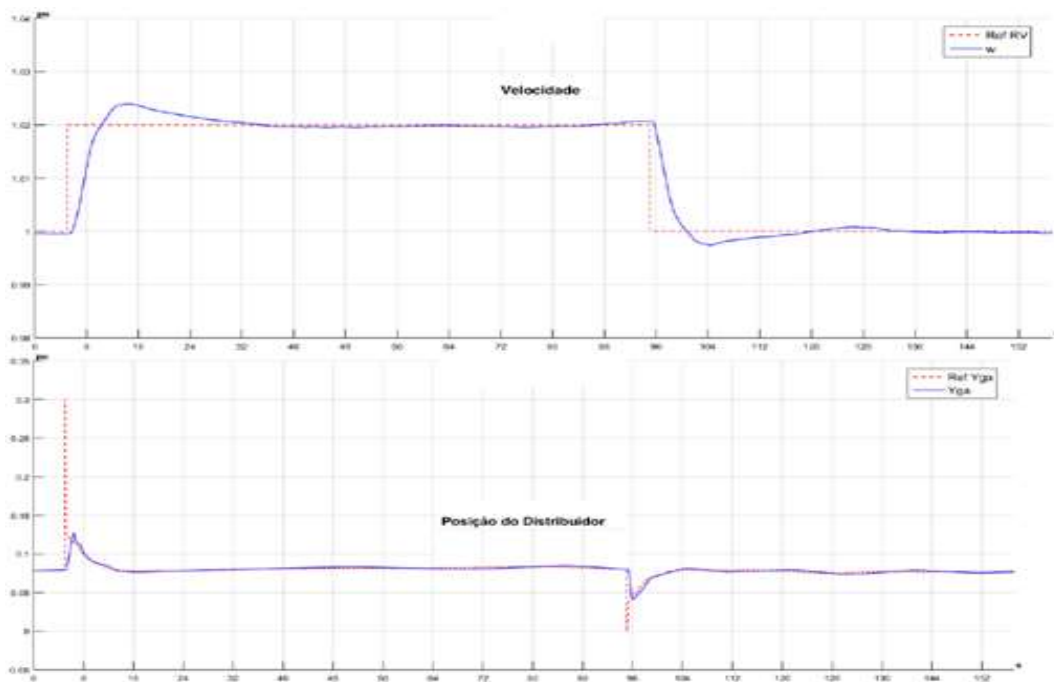


Figura 23 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a vazio a um Degrau Aplicado

Fonte: Reivax (2020).

- **Verificação da estabilidade a vazio, à um degraú aplicado com controle da velocidade por Pickup**

Devido aos ruídos ocasionados na medição de frequência do gerador pelos pick-ups, são considerados normais overshoots de velocidade inferiores a 20% do valor do degraú aplicado e pequenas oscilações nas referências do RV.

Degrau de Velocidade por Pickup

Instante da aplicação do degrau = 5.00s.

Valor do Degrau = 0.02pu.

Sobressinal = 19.11%.

Tempo de Subida = 2.46s.

Tempo de Acomodação (faixa = 0.002pu) = 66.62s.

Condição Inicial do Ensaio: $Y_{ga} = 0.08\text{pu}$; $w = 1.00\text{pu}$

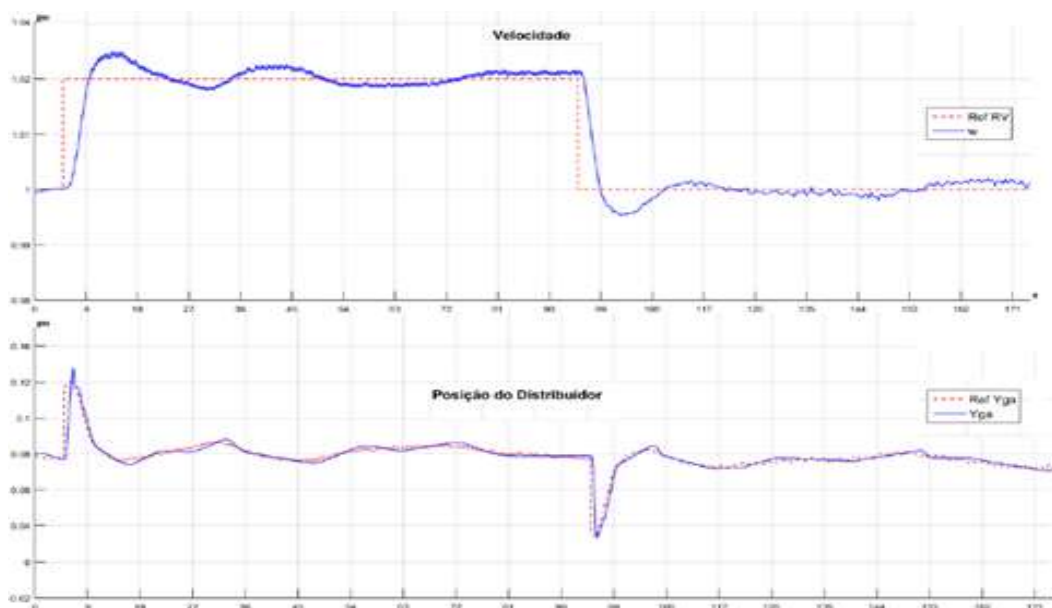


Figura 24 - Oscilografia do Ensaio de Estabilidade a vazio a um Degrau Aplicado

Fonte: Reivax (2020).

- **Comutação do canal de controle**

No caso de perda do canal de controle principal ou de algum sinal de realimentação das malhas de controle, o sistema comutará automaticamente para o canal retaguarda, sem afetar o ponto de operação da unidade.

Por esse motivo, foi importante certificar que a comutação de canais de controle estava funcionando corretamente.

Ensaio de Comutação de Canal em Vazio

Instante da Comutação CH1- CH2 = 31.72s.

Instante da Comutação CH2- CH1 = 63.00s.

Erro da Ref. RV = 0.00008pu.

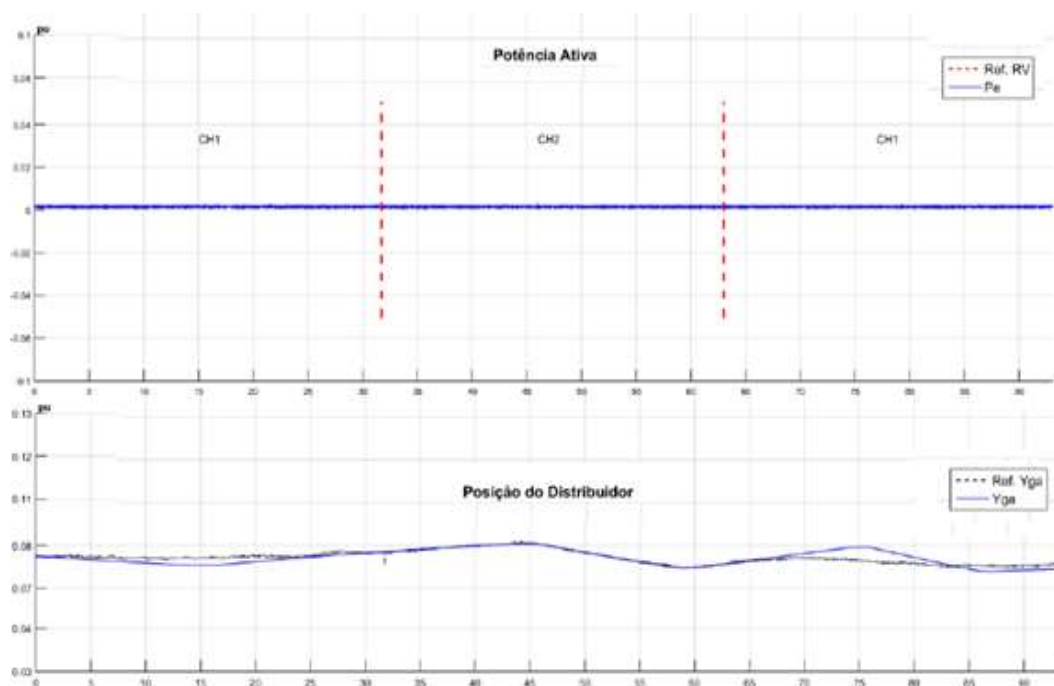


Figura 25 - Oscilografia do Ensaio de Comutação de Canal de Controle

Fonte: Reivax (2020)

- **Ensaio de sobrevelocidade elétrico**

Esta é uma das funções do regulador de vital importância no quesito segurança, pois caso a velocidade do gerador ultrapasse o valor de sobrevelocidade configurado o regulador deve parar o gerador imediatamente. Por esta razão, afim de proteger o gerador contra esforços mecânicos desnecessários o ensaio foi realizado com um nível de sobrevelocidade menor que o ajuste final.

Sobrevelocidade Mecânico

Valor da Velocidade no Instante da Atuação = 1.300pu.

Valor da Sobrevelocidade Máxima do Ensaio = 1.302pu.

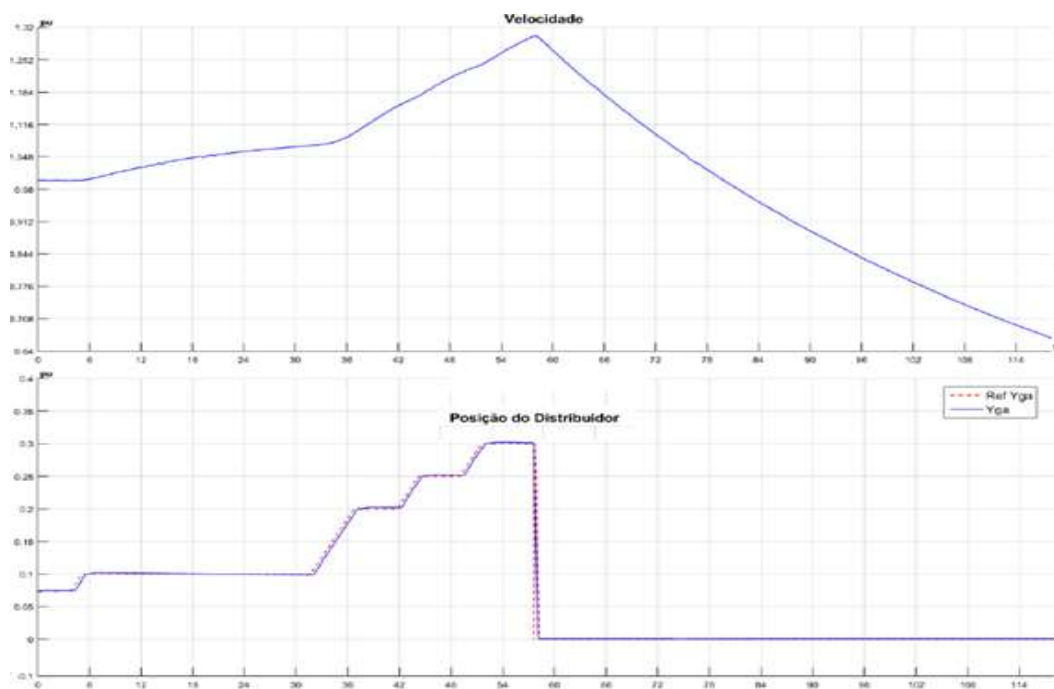


Figura 26 - Oscilografia do Ensaio de Sobrevelocidade Elétrico

Fonte: Reivax (2020)

4.3.7 Ensaio dinâmico em carga

A etapa de ensaios em carga, consiste em ensaios com o gerador sincronizado, é nessa etapa que são realizados os ensaios mais importantes e que exigem o máximo de desempenho do regulador. Para que o regulador obtenha um desempenho satisfatório na etapa de ensaios com carga, as parametrizações anteriores devem ser bem realizadas.

- **Verificação da medição de potência**

Com a unidade sincronizada, foi verificada a medição de potência ativa e reativa no regulador. Essa verificação foi realizada com um oscilógrafo calibrado externo ao regulador, após a verificação os erros de medição foram corrigidos.

Sincronismo em Modo de Controle de Potência

Instante do Sincronismo = 60.0s.

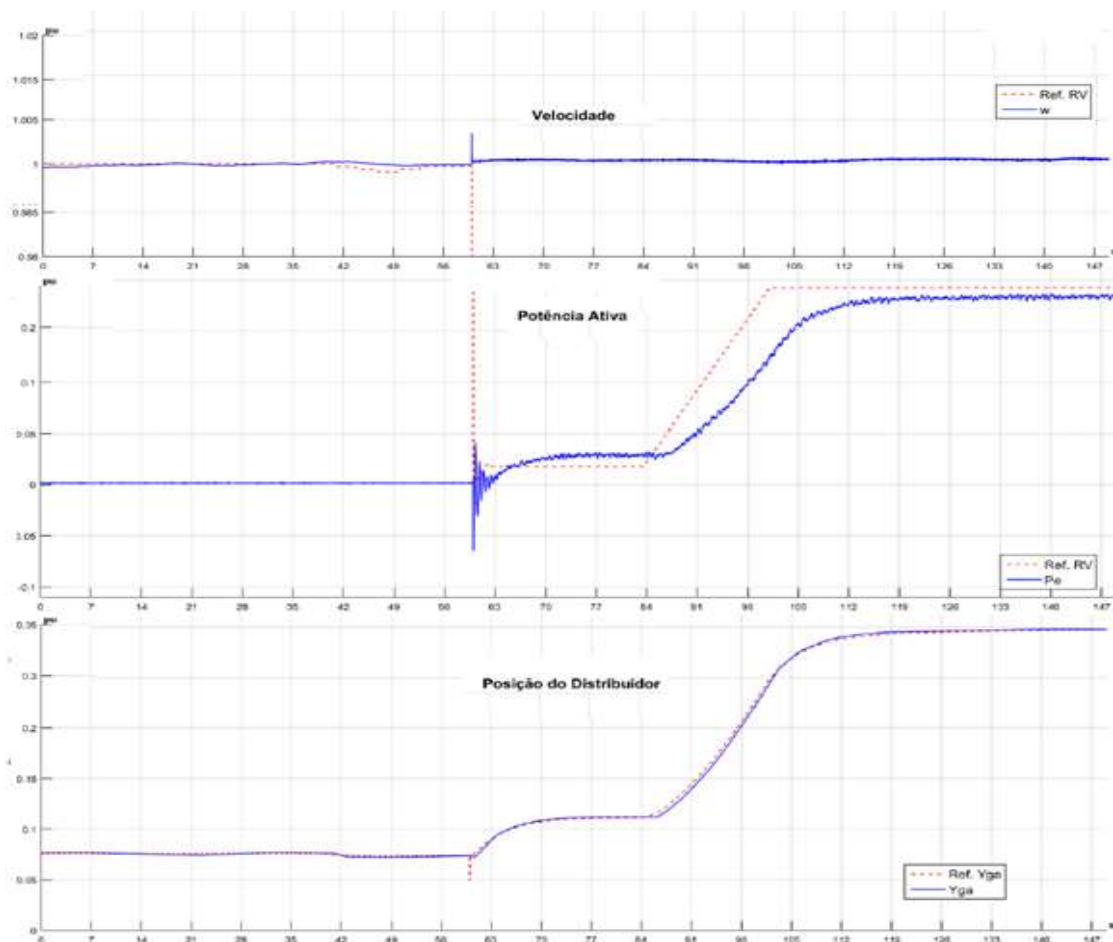


Figura 27 - Oscilografia do Ensaio de Sincronismo e modo de Potência

Fonte: Reivax (2020)

- **Ajuste da malha de controle de potência ativa**

Nesta etapa o objetivo é sintonizar e refinar os ajustes da malha de controle de potência ativa e rampeamento de carga. De maneira similar à malha de velocidade, os parâmetros de controle referem-se ao estatismo transitório. A diferença é que, em condição de carga, os parâmetros do estatismo transitório atuam no sentido de diminuir o efeito do estatismo permanente durante as perturbações.

A dinâmica da malha de controle de potência, tal qual a malha de controle de velocidade, foi sintonizada aplicando um degrau na referência de potência e observando assim, a resposta do sistema com o menor *overshoot* e sem gerar oscilações.

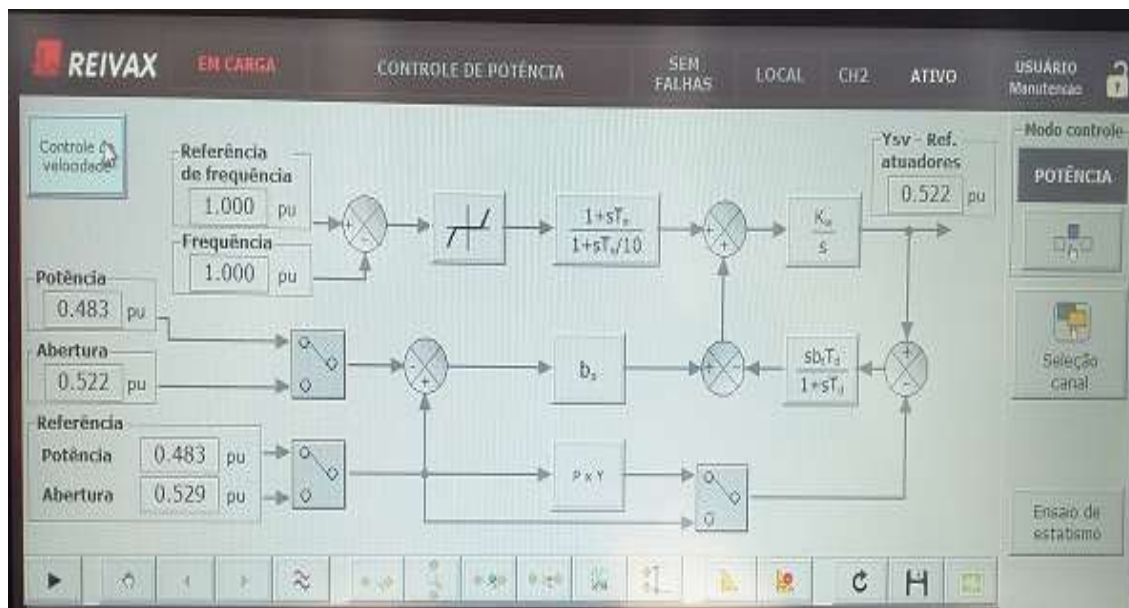


Figura 28 - Malha de Controle e Potência

Fonte: Reivax (2020)

➤ **Ensaio de Degrau de Potência Ativa, com o Regulador em modo de Controle de Potência e Abertura**

O ensaio de degraude potência, é realizado com objetivo de observar a resposta do regulador a essa condição de operação, nos modos de controle de potência e abertura. Embora os modos de controle de potência e abertura atuem da mesma maneira no distruidor, a realimentação de controle é diferente um do outro e isso causa resposta diferente no regulador.

Para o modo de controle de potência a realimentação utilizada na malha de controle de potência, é a potência ativa real no gerador, isso faz com que os ajuste de potência no gerador sejam mais precisos, já no modo de controle de abertura a realimentação utilizada na malha de controle é a posição do distribuidor, com isso o regulador passe a não mais se importar com a potência gerada e sim com a abertura do distruidor, desse modo a potência do gerador pode sofrer alterações se ocorrer variações no nível do reservatório.

Para o ensaio é dado um degraude 0,1Pu na potência ativa do gerador, e posteriormente na posição do distribuidor e observado a resposta com relação a referência aplicada, para o resultado ser considerado satisfatório, não pode haver

overshoot na velocidade e a rampa de potência/ abertura do distribuidor deve ser sem oscilações ou overshoot.

Degrau de Potência Ativa

Aplicação do Degrau = 5.0s. Retirada do Degrau = 125.1s.

Valor do Degrau = 0.10pu.

Sobressinal = 0.00%.

Tempo de Subida = 10.20s.

Tempo de Acomodação (faixa = 0.010pu) = 16.82s.

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 0.55\text{pu}$; $Y_{ga} = 0.66\text{pu}$; $w = 1.000\text{pu}$

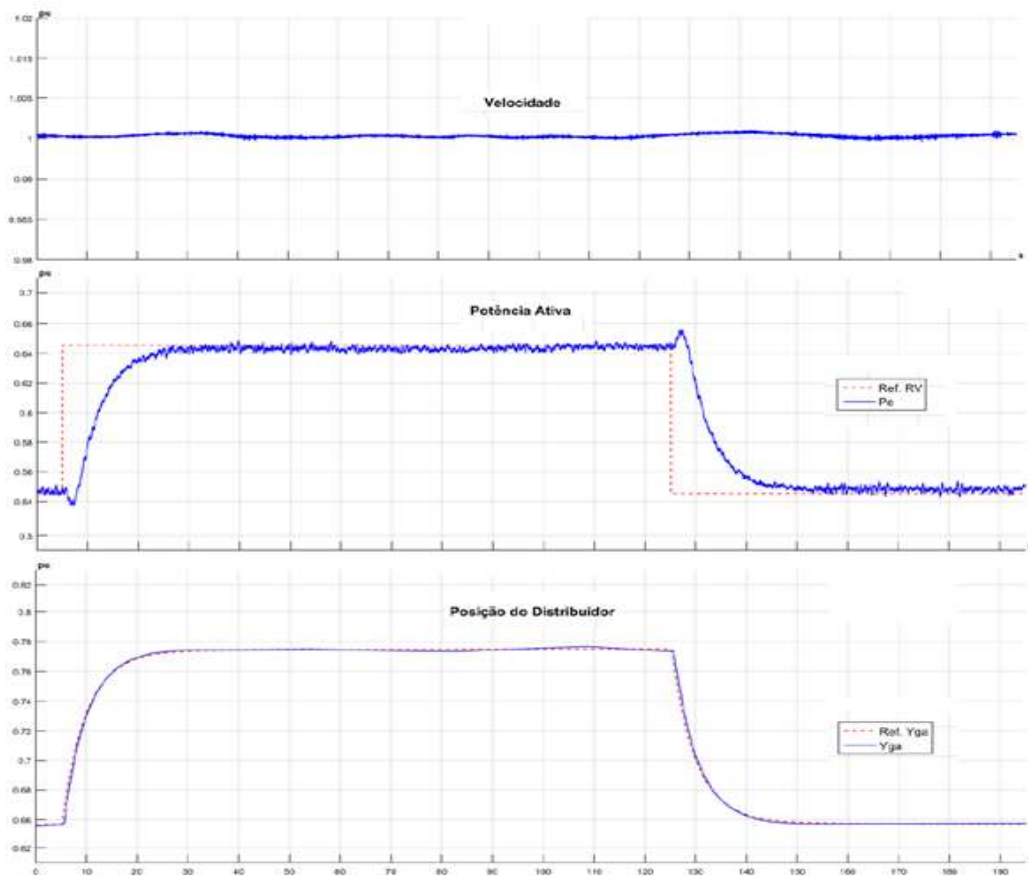


Figura 29 - Oscilografia do ensaio de degrau de potência ativa

Fonte: Reivax (2020)

Degrau de Abertura em Carga

Aplicação do Degrau = 5.0s. Retirada do Degrau = 125.1s.

Valor do Degrau = 0.10pu.

Sobressinal = 0.00%.

Tempo de Subida = 12.47s.

Tempo de Acomodação (faixa = 0.005pu) = 16.99s.

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 0.55\text{pu}$; $Y_{ga} = 0.66\text{pu}$; $w = 1.001\text{pu}$

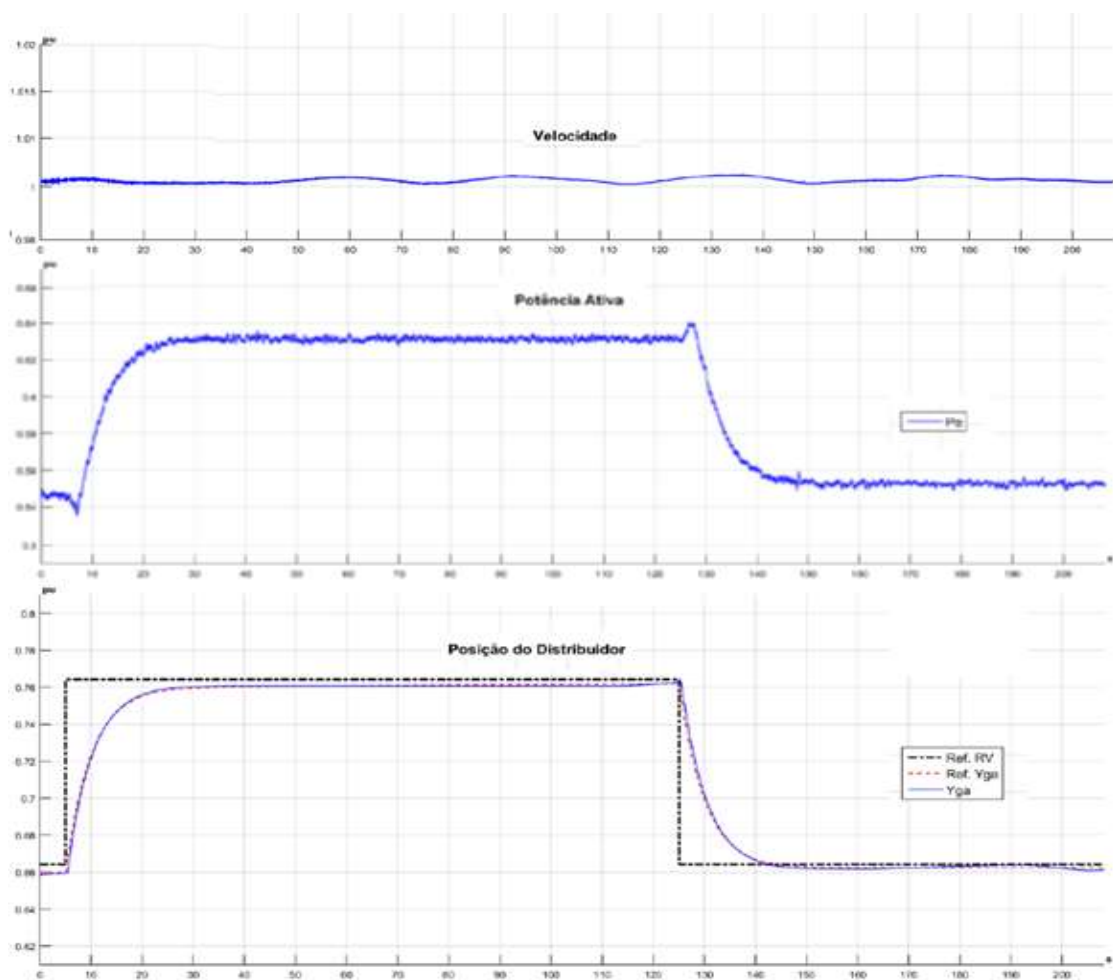


Figura 30 - Oscilografia do Ensaio de Degrau de Potência em modo de Abertura

Fonte: Reivax (2020)

- **Ensaio de Rampa de Carga e Desgarga de Potência, em modo de Controle de Potência**

Rampa de Carga - Controle de Potência

Instante da Tomada de Carga = 10.0s

Duração da Tomada de Carga = 221.2s

Setpoint Inicial = 0.02pu.

Setpoint Final = 0.73pu.

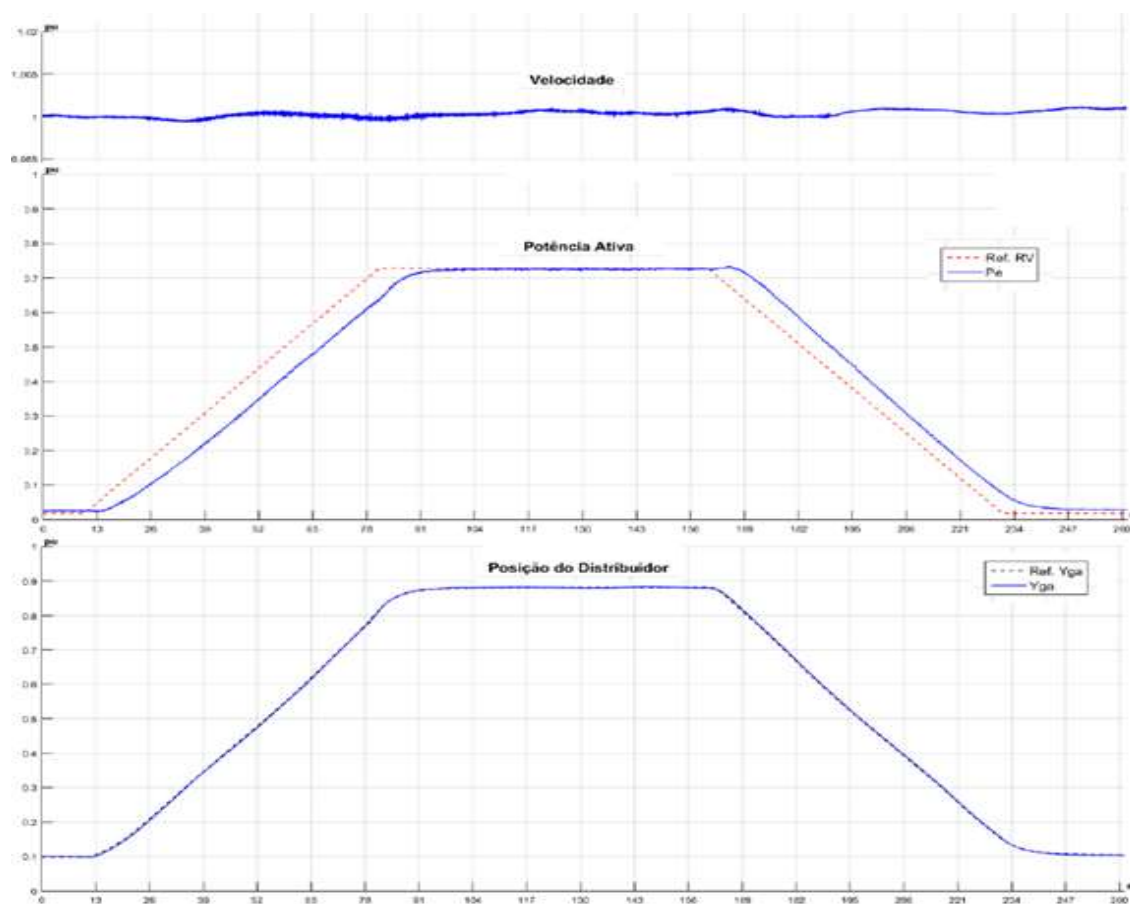


Figura 31 - Oscilografia do Ensaio de Rampa de Carga/Descarga de Potência

Fonte: Reivax (2020)

- **Ensaio de isolamento simulada**

O ensaio de isolamento simulada é realizado para parametrizar a malha de controle de Potência do RV e otimizar seu funcionamento durante o restabelecimento da usina na ocorrência de um blackout.

Quando ocorre o blackout, o processo de reestabelecimento do SIN começa nas usinas de autoreestabelecimento, para que isso ocorra, é necessário que os reguladores de velocidade e tensão sejam capazes de controlar a tensão, a frequência e a potência do gerador de maneira precisa em modo de controle isolado. Quando os geradores das usinas de autoreestabelecimento estão operando, as outras usinas do SIN entram em sincronismo restabelecendo o sistema.

Para o RV de uma usina de autoreestabelecimento, a condição de controle do gerador em modo isolado é crítica para o regulador, pois o sincronismo de outros geradores em paralelo causa oscilações de frequência na rede, e nessa condição os ajustes de estatismo permanente e transitórios devem estar bem parametrizados.

Em condição normal de operação o RV trabalha em modo de controle acoplado ao sistema, para o ensaio o mesmo é colocado em modo de controle isolado e em seguida é dado um degrau de potência no gerador, nessa condição é esperado que a resposta do RV atenda as seguintes situações:

- a) A Frequência apresente comportamento estável;
- b) O pico de frequência não ultrapasse os limites ajustados para a proteção de sub-frequência do gerador, geralmente 90% da nominal;
- c) O tempo de estabilização que é o tempo necessário para que a velocidade do gerador permaneça acima de 95% e abaixo de 105%, devem atender a norma regulamentada para a usina, no Brasil esse tempo deve ser inferior a 60s;
- d) O tempo de resposta que é o tempo necessário para o gerador atingir 90% da velocidade nominal, deve ser inferior a 9s.

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.

Degrau em Simulação de Rede Isolada

Aplicação do Degrau = 5.0s.

Valor do Degrau de Carga = 0.10pu.

Desvio Máximo da Velocidade = 0.90pu em 7.38s.

Tempo de Acomodação (faixa = 0.005pu) = 161.60s.

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 0.56\text{pu}$; $Y_{ga} = 0.67\text{pu}$; $w = 1.003\text{pu}$

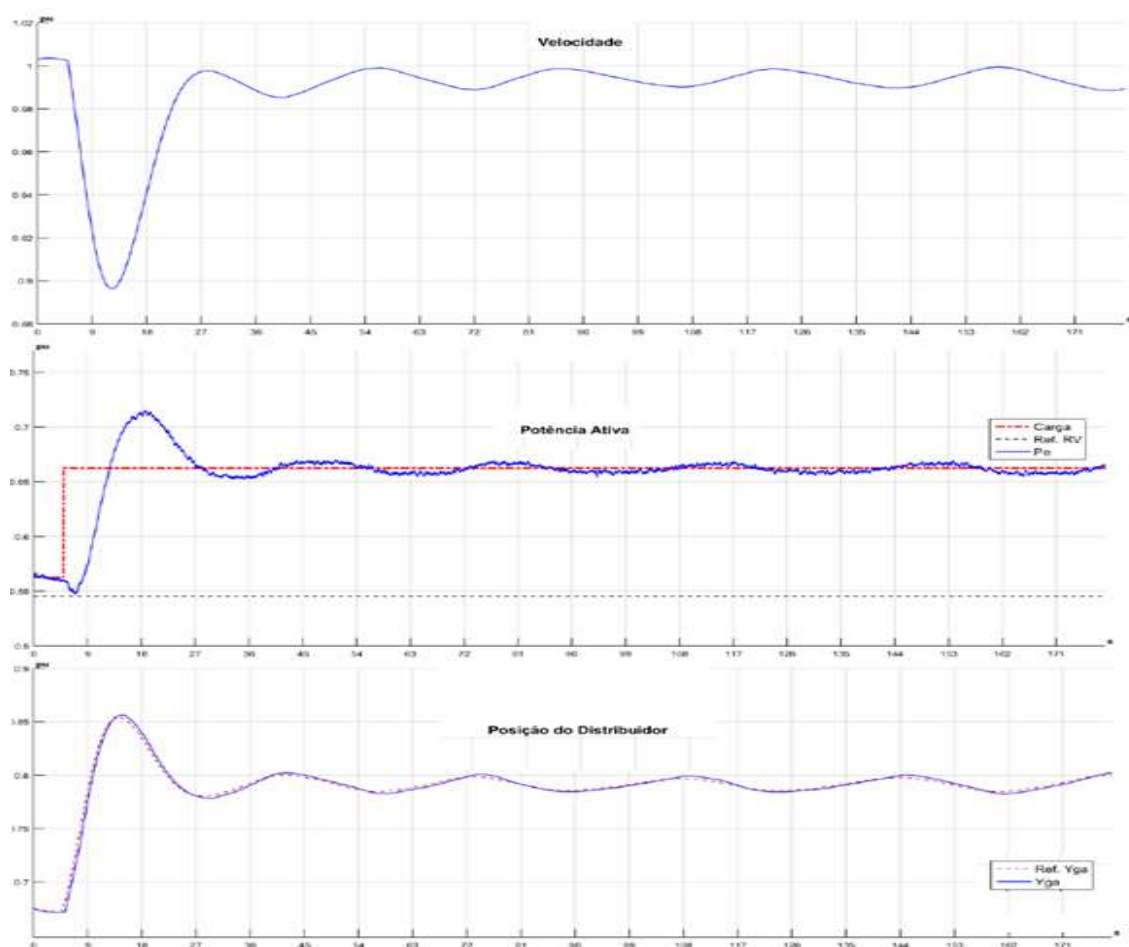


Figura 32 - Ensaio de Isolação Simulada

Fonte: Reivax (2020)

Quando ocorre um acréscimo de potência fornecida pelo gerador, ocorre também um aumento no torque mecânico, esse efeito faz com que a frequência tenda a diminuir. Por ação do RV, ocorre um aumento na referência de abertura do atuador a fim de aumentar a vazão de água na turbina e fornecer um torque mecânico maior ao eixo do gerador, conseqüentemente haverá um aumento na potência mecânica fornecida ao eixo que será convertida em potência elétrica pelo gerador

para compensar a diminuição da frequência até a estabilização em seu valor de referência. Quando ocorre um decréscimo de potência fornecida o efeito descrito acima também ocorre, porém de modo exatamente contrário.

- **Comutação de modo controle**

No caso de perda da medição de potência ativa, o regulador comutará automaticamente para o modo de controle de abertura sem afetar o ponto de operação da máquina. Por esse motivo é importante certificar-se que a mudança de modos de controle esteja funcionando corretamente durante o comissionamento.

Ensaio de Comutação de Modo de Controle

Instante da 1ª Comutação = 60.0s. Comutação de Controle de P_e para Y_g .

Instante da 2ª Comutação = 120.0s. Comutação de Controle de Y_g para P_e .

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 0.73pu$; $Y_g = 0.89pu$; $w = 1.000pu$

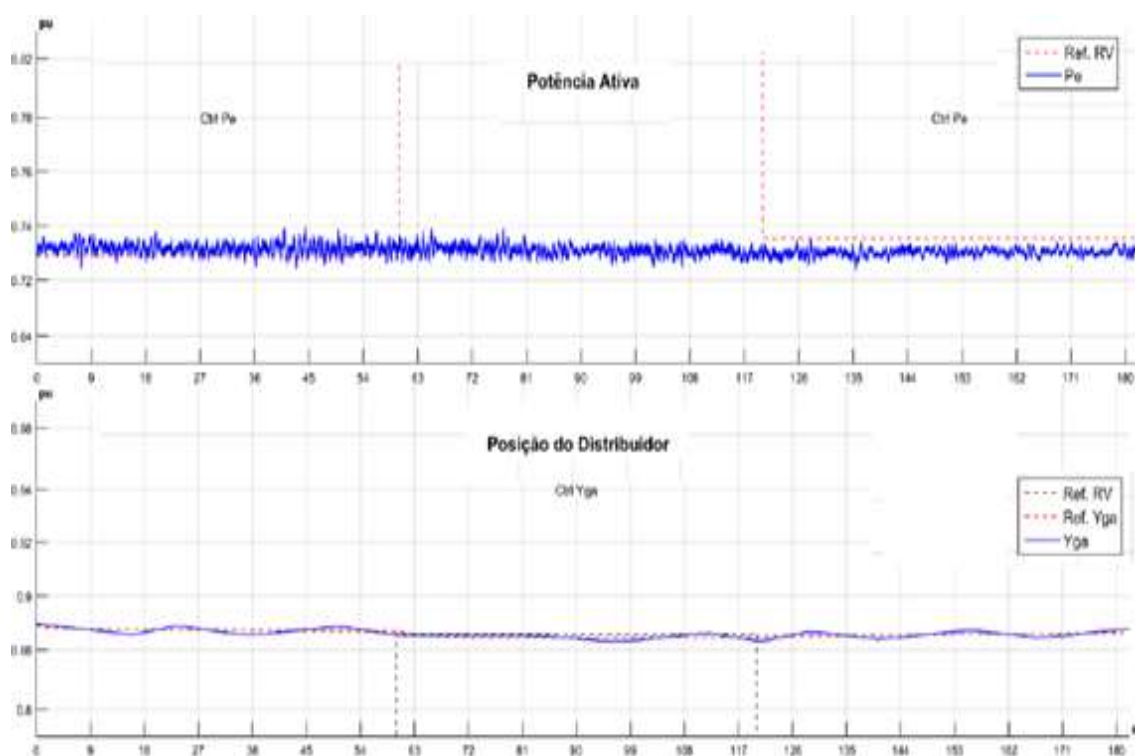


Figura 33 - Oscilografia do Ensaio de Comutação de modo de Controle

Fonte: Reivax (2020)

- **Comutação de canal de controle**

No caso de perda ou falha do canal principal de controle, o sistema transferirá automaticamente o controle do RV do canal em falha para o canal retaguarda sem afetar o ponto de operação da máquina, por esse motivo, é importante certificar-se de que a mudança de canais de controle esteja funcionando corretamente durante o comissionamento.

Comutação de Canal de Controle

Instante da Comutação DRV01- DRV02 = 29.94s.

Instante da Comutação DRV02- DRV01 = 60.42s.

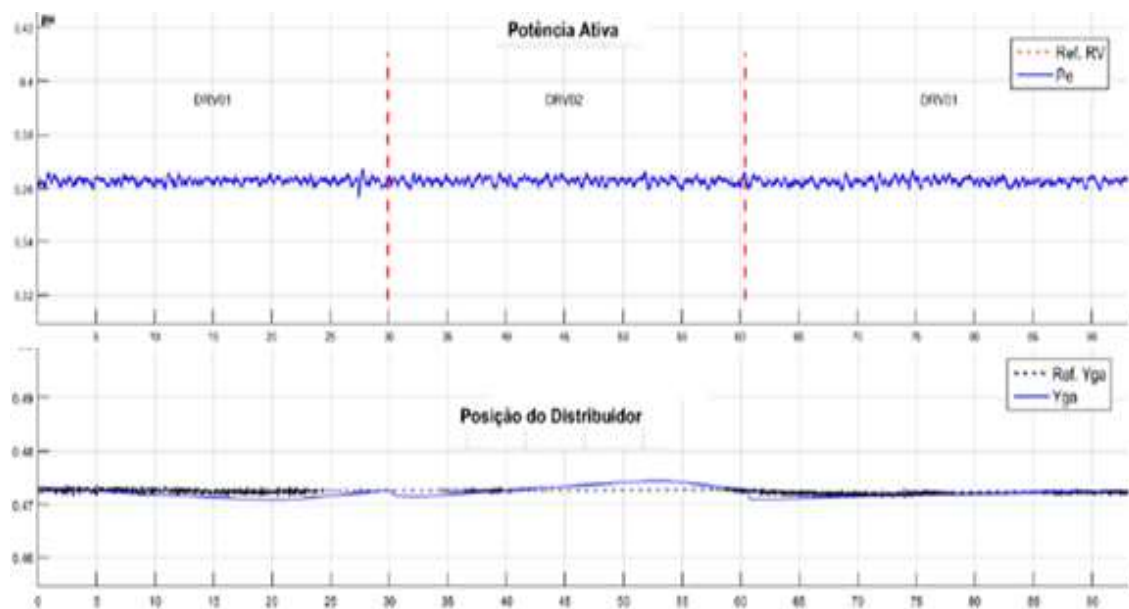


Figura 34 - Oscilografia do Ensaio de Comutação de Canal de Controle

Fonte: Reivax (2020)

- **Ensaio de parada rápida com descarga prévia**

Parada rápida com descarga prévia, consiste no desligamento do gerador por algum defeito de natureza mecânica (temperatura alta em algum mancal, falta de fluxo de óleo ou água no sistema de refrigeração dos mancais, etc....). Quando ocorre o desligamento por essa condição, o regulador começa a retirar a carga ativa do gerador até que a potência assuma valores baixos denominados de potência ativa

nula, entretanto o valor de potência não pode ser completamente zerado para não ocasionar a sensibilização da proteção de potência reversa no gerador.

O objetivo do ensaio é parametrizar a rampa de descarga de potência do gerador na ocorrência de um desligamento, de modo que a descarga não seja muito lenta para não agravar os problemas que originaram o desligamento e também não muito rápida de modo que cause sobrepressões na caixa espiral.

Parada Rápida com Descarga Prévia

Instante do Trip = 34.6s

Rampa de Descarga = 30.2s

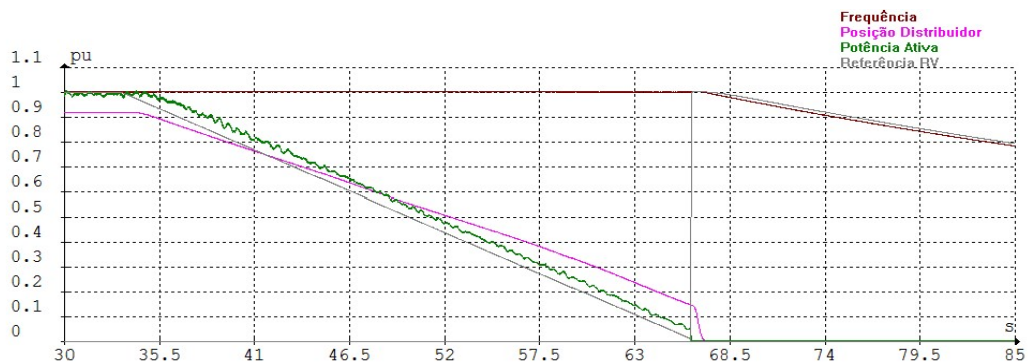


Figura 35 - Oscilografia do Ensaio de Parada Rápida com Descarga Prévia

Fonte: Reivax (2020)

- **Ensaio de rejeição de carga**

Rejeição de carga é a situação onde ocorre a abertura do disjuntor de alta do gerador com o mesmo sincronizado a rede, podendo o gerador estar operando com carga nominal ou não.

Quando o gerador está operando sincronizado, o rotor do gerador está acoplado magneticamente a rede que proporciona um torque elétrico em sentido oposto ao sentido de giro do gerador, nessa condição o distribuidor também encontra-se com abertura superior aos valores necessários para manter o gerador em velocidade nominal. No momento que ocorre a rejeição de carga, o acoplamento magnético do gerador com a rede é perdido e como o distribuidor encontra-se com abertura elevada o gerador tende a aumentar sua velocidade de forma proporcional

a abertura do distribuidor. Para que o gerador não alcance níveis de velocidade prejudiciais ao conjunto, o regulador de velocidade precisa trabalhar de forma precisa, evitando riscos relacionados a sobrevelocidades no gerador.

Esses ensaios foram realizados de forma progressiva, com os seguintes valores de potência ativa em relação á nominal: 25%, 50%, 75% e 100%.

A partir das rejeições, foi possível obter a sobrevelocidade máxima atingida em cada rejeição e o tempo para restabelecimento da velocidade nominal da unidade geradora.

Rejeição de Carga: 25%.

Instante da Rejeição = 1,6s

Sobrevelocidade = 1.026pu.

Tempo para Recuperação da Velocidade ($w = 102\%$) = 1.9s.

Tempo para Estabilização da Velocidade ($98\% < w < 102\%$) = 19.5s.

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 0.26pu$; $Y_{ga} = 0.35pu$; $w = 1.000pu$

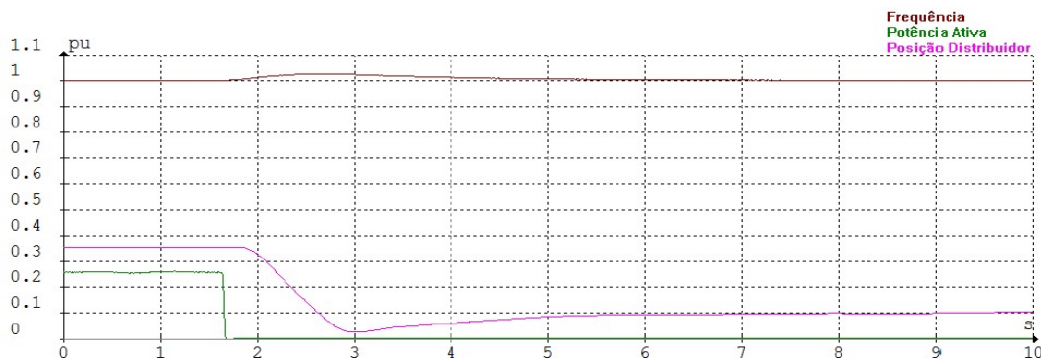


Figura 36 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 25%

Fonte: Reivax (2020)

Rejeição de Carga: 50%.

Instante da Rejeição = 13.4s

Sobrevelocidade = 1.07pu.

Tempo para Recuperação da Velocidade ($w = 102\%$) = 6s.

Tempo para Estabilização da Velocidade ($98\% < w < 102\%$) = 26.9s.

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 0.54pu$; $Y_{ga} = 0.56pu$; $w = 1.001pu$

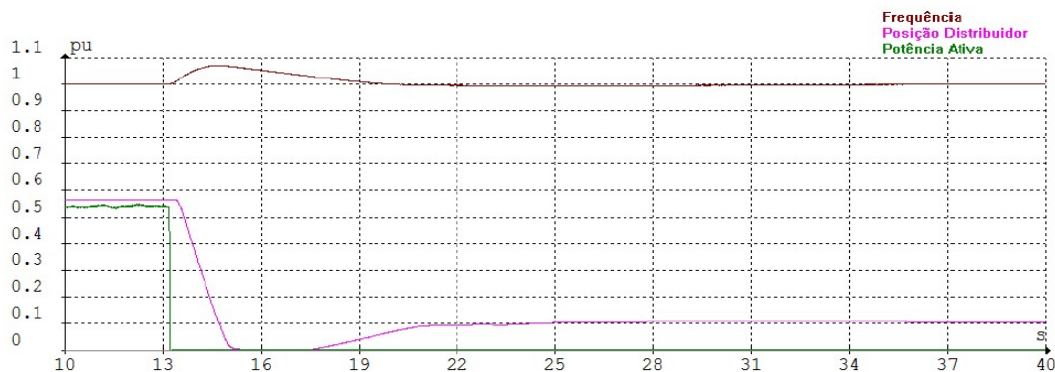


Figura 37 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 50%

Fonte: Reivax (2020)

Rejeição de Carga: 75%.

Instante da Rejeição = 29.2s

Sobrevelocidade = 1.12pu.

Tempo para Recuperação da Velocidade ($w = 102\%$) = 9.8s.

Tempo para Estabilização da Velocidade ($98\% < w < 102\%$) = 31.2s.

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 0.79pu$; $Y_{ga} = 0.76pu$; $w = 1.000pu$



Figura 38 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 75%

Fonte: Reivax (2020)

Rejeição de Carga: 100%.

Instante da Rejeição = 16.0s

Sobrevelocidade = 1.2pu.

Tempo para Recuperação da Velocidade ($w = 102\%$) = 15.3s.

Tempo para Estabilização da Velocidade ($98\% < w < 102\%$) = 43.9s.

Condição Inicial do Ensaio: $P_e = 1.1pu$; $Y_{ga} = 1.0pu$; $w = 1.0pu$

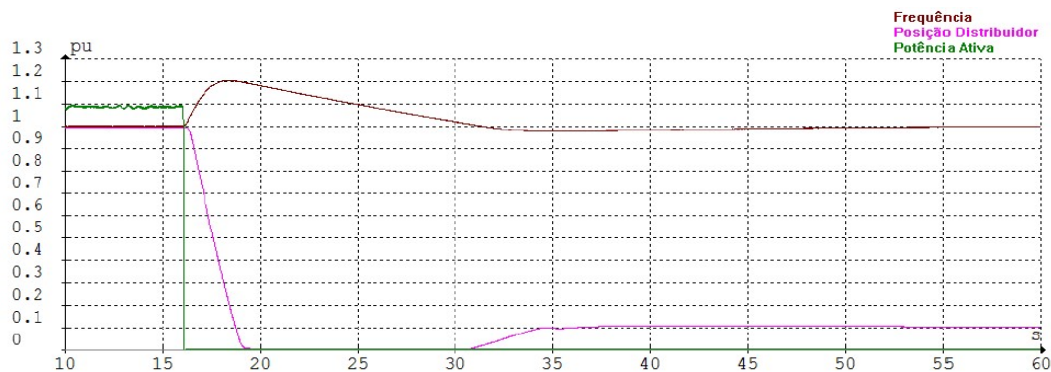


Figura 39 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 100%

Fonte: Reivax (2020)

- **Ajuste da Curva Potência x Abertura**

Considerando que o fluxo de água na turbina tem uma relação linear com a abertura do atuador, é possível assumir uma relação linear direta entre potência ativa e a abertura do distribuidor. Mudanças consideráveis na medição da queda líquida ou outras máquinas dividindo o mesmo conduto forçado podem gerar erros na curva.

Quando o regulador trabalha em controle de potência ativa, esta curva gera a referência de posicionamento primária para os atuadores, isso significa que ajustes errados causam erros entre a referência do regulador e atraso na resposta em alcançar a referência de potência ativa desejada. O mau ajuste aqui é o principal motivo para erros entre medição de potência ativa e sua referência.

Curva potência x abertura

Número de curvas

Número de pontos

Curva 1

	Potência (%)	Abertura (%)
1	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="6.50"/>
2	<input type="text" value="4.20"/>	<input type="text" value="10.00"/>
3	<input type="text" value="13.30"/>	<input type="text" value="20.00"/>
4	<input type="text" value="23.00"/>	<input type="text" value="30.00"/>
5	<input type="text" value="34.40"/>	<input type="text" value="40.00"/>
6	<input type="text" value="46.50"/>	<input type="text" value="50.00"/>
7	<input type="text" value="57.80"/>	<input type="text" value="60.00"/>
8	<input type="text" value="68.50"/>	<input type="text" value="70.00"/>
9	<input type="text" value="79.00"/>	<input type="text" value="80.00"/>
10	<input type="text" value="87.30"/>	<input type="text" value="90.00"/>

Queda (m)

Queda

Constante de tempo filtragem s

Valor de forçamento m

FORÇAMENTO HABILITADO

Ajuste de referência

Referência de abertura %

✓ APLICAR

Status da curva

Queda m

Referência potência %

Referência abertura (saída curva) %

OK **✓ APLICAR CURVA**

Obs: Os pontos devem ser colocados em ordem crescente
O primeiro ponto da curva coincide com a abertura a vazio.

FECHAR

Figura 40 - Curva de Potência x Abertura

Fonte: Reivax (2020)

5 COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE O REGULADOR NOVO E O ANTIGO

Antes da parada do gerador para modernização do sistema de regulação de velocidade, foram realizados alguns ensaios à título de descomissionamento, com o objetivo de mensurar o real desempenho do sistema.

O presente capítulo, vai expor um comparativo de desempenho entre o sistema de regulação empregado na modernização e o sistema substituído, focando no desempenho dos sistemas e comprovando com alguns ensaios em comum. Vale ressaltar que no descomissionamento não foram realizados os ensaios utilizados para parametrização das malhas de controle, e sim os ensaios dinâmicos de operação normal do regulador.

Os registros oscilográficos gerados no descomissionamento do sistema foram adquiridos pelo Registrador Digital de Perturbação Multifunção RPV 350 e os registros do comissionamento foram adquiridos pelo oscilógrafo presente no próprio regulador de velocidade empregado na modernização.

5.1 Ensaio de abertura do distribuidor em água morta

As oscilografias geradas nos ensaios em água morta, mostra o quão bem foi parametrizada a malha de controle dos atuadores. Essa malha atua no controle de abertura e fechamento do distribuidor e a estabilidade deste processo depende do correto funcionamento dessa malha.

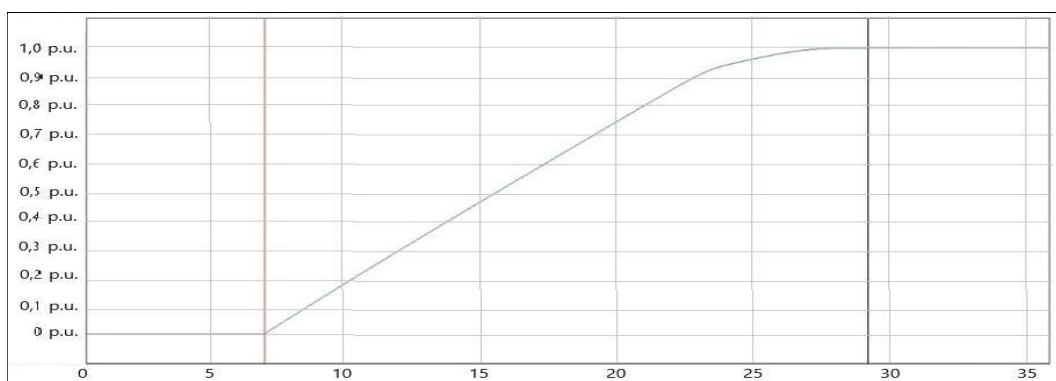


Figura 41 - Oscilografia do Ensaio de Abertura do distribuidor RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

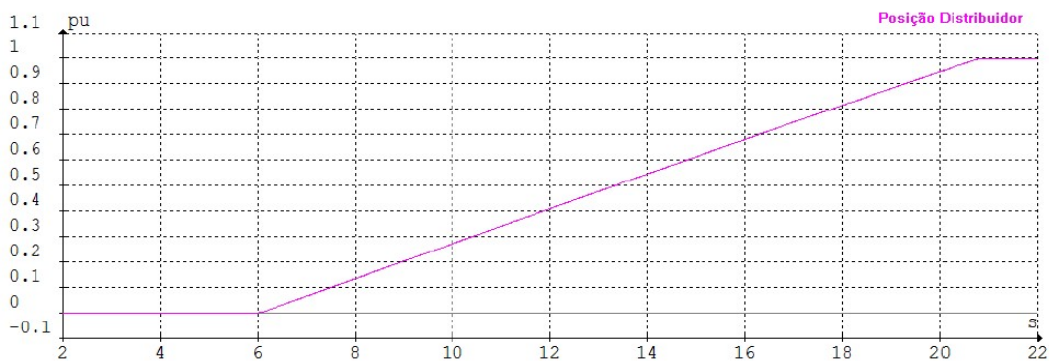


Figura 42 - Oscilografia do Ensaio de Abertura do distribuidor RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 3- Comparativo de Desempenho no Ensaio de Abertura do Distribuidor

TABELA DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS – ENSAIO ABERTURA TOTAL DO SISTRIBUIDO EM ÁGUA MORTA		
	TEMPO TOTAL DE ABERTURA DO DISTRIBUIDOR EM (S)	DIFERENÇA DE TEMPO EM (%)
REGULADOR ANTIGO	20	38,9
REGULADOR ATUAL	14,4	

A tabela 3 mostra um comparativo com relação a eficiência e desempenho da malha de controle dos atuadores no processo de abertura em água morta. Relacionando a eficiência da malha com a estabilidade do processo, a tabela mostra uma diferença de 38,9% no tempo de abertura do distribuidor. Outro fator importante que deve ser levado em consideração, é o estado de obsolescência do regulador antigo.

Observando as oscilografias dos dois reguladores no processo, é possível observar na oscilografia do regulador antigo um amortecimento na abertura do distribuidor no final do processo, esse amortecimento é realizado para que não ocorra overshoot na posição do distribuidor. Já na oscilografia do regulador atual, a curva de abertura não sofre amortecimento ou overshoot, mostrando uma estabilidade e tempo de resposta aos sinais de controle melhor que o regulador antigo, justificando essa grande diferença de desempenho.

5.2 Ensaio de fechamento do distribuidor em água morta

Como a malha de controle dos atuadores também controla o fechamento do distribuidor, as mesmas considerações realizadas no processo de abertura do distribuidor também valem para o processo de fechamento.

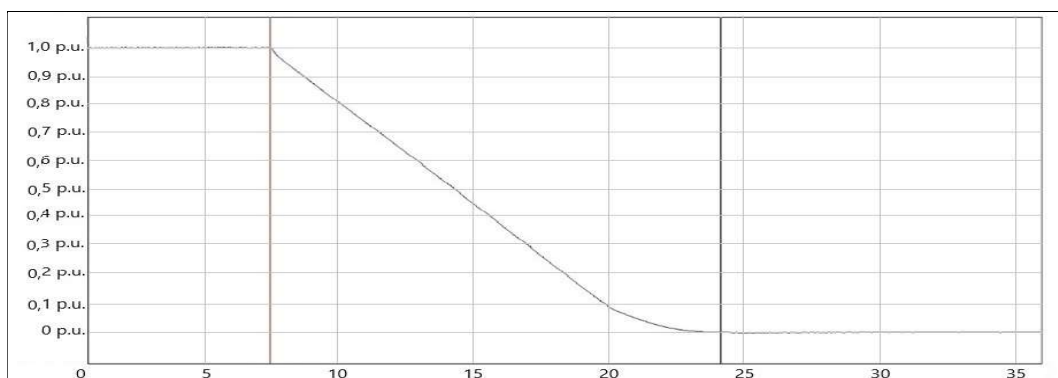


Figura 43 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

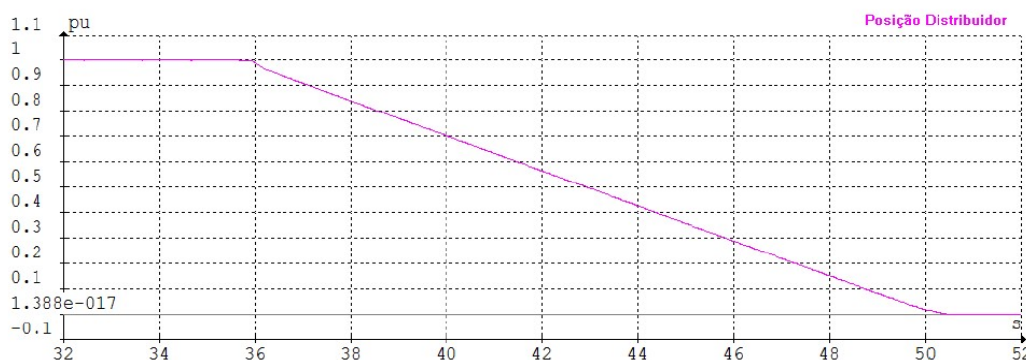


Figura 44 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 4- Comparativo de Desempenho no Ensaio de Fechamento do Distribuidor

TABELA DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS – ENSAIO FECHAMENTO TOTAL DO DISTRIBUIDOR EM ÁGUA MORTA		
	TEMPO TOTAL DE FECHAMENTO DO DISTRIBUIDOR EM (S)	DIFERENÇA DE TEMPO EM (%)
REGULADOR ANTIGO	29,2	19,2
REGULADOR ATUAL	24,5	

Do mesmo modo que no processo de abertura do distruidor, no processo de fechamento, também são apontadas as mesmas observações, entretanto no processo de fechamento, o motivo do amortecimento é para evitar pancadas e golpes de pressão desnecessários no servomotor. Nesse processo, a diferença de tempo no processo observada através da tabela 4 foi um pouco menor, 19,2%.

5.3 Tempo de fechamento do distruidor por trip

O jargão Trip, significa um evento de falta no gerador que necessite do fechamento rápido do distribuidor, entretanto a velocidade de fechamento do distribuidor é limitada pelo tempo de resposta do conjunto mecânico e pela sobrepressão que é causada no caixa espiral da turbina.

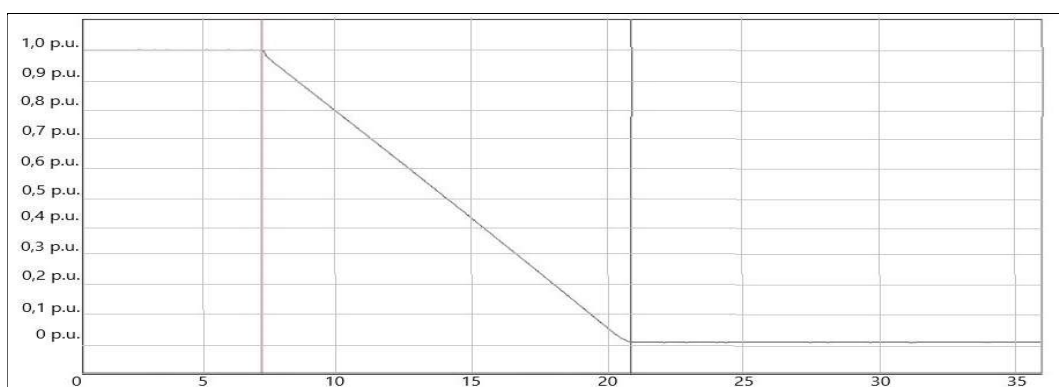


Figura 45 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor Trip RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

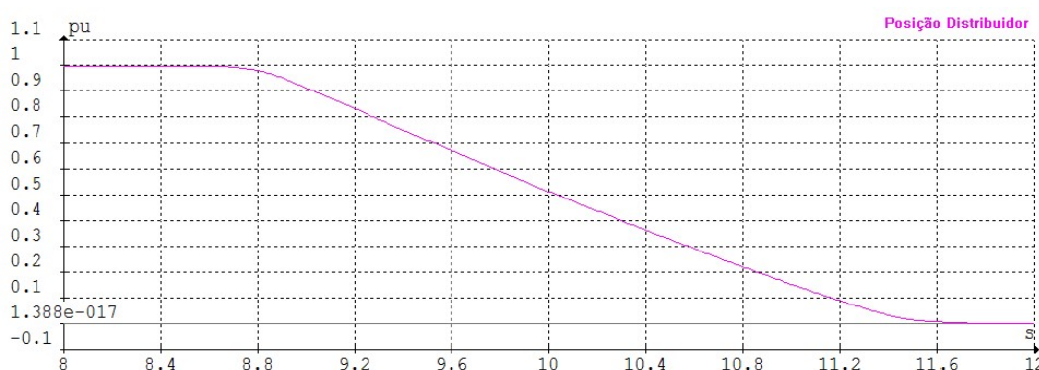


Figura 46 - Oscilografia do Ensaio de Fechamento do Distribuidor Trip RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 5 – Comparativo de Desempenho no Ensaio de Fechamento do Distribuidor por Trip

TABELA DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS – MÁXIMA VELOCIDADE DE FECHAMENTO DO DISTRIBUIDOR EM ÁGUA MORTA POR TRIP		
	TEMPO TOTAL DE FECHAMENTO DO DISTRIBUIDOR EM (S)	DIFERENÇA DE TEMPO EM (%)
REGULADOR ANTIGO	3,2	10,3
REGULADOR ATUAL	2,9	

A diferença de tempo de fechamento mostrada na tabela 5, devem-se ao tempo de resposta da malha de controle aos sinais recebidos e ao tempo de resposta mecânica dos componentes do regulador de velocidade. Nesse ensaio mais uma vez a diferença de desempenho entre os dois sistemas comparados foi grande, 10,3%.

5.4 Ensaio de partida automática

Neste ensaio, a malha de controle dos atuadores responde aos sinais de controle recebidos pela lógica de controle de partida, nesse processo a otimização dos parâmetros da lógica às características mecânicas do gerador fazem toda a diferença na estabilidade e velocidade do processo.

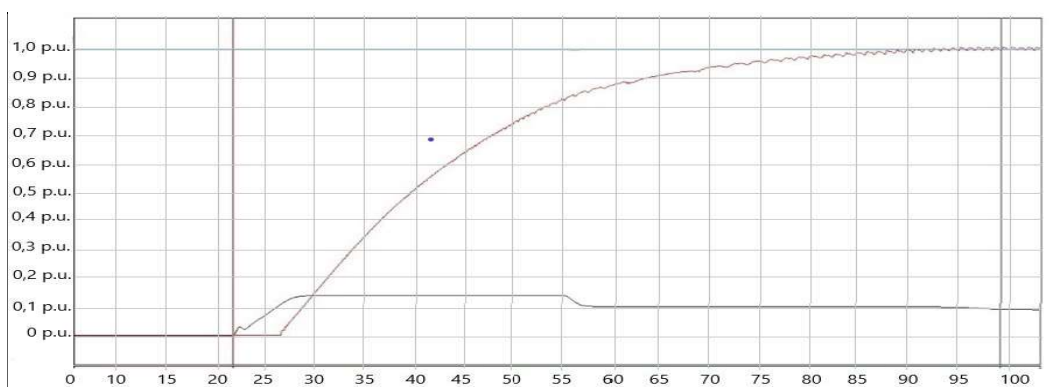


Figura 47 - Oscilografia do Ensaio de Partida Automática RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

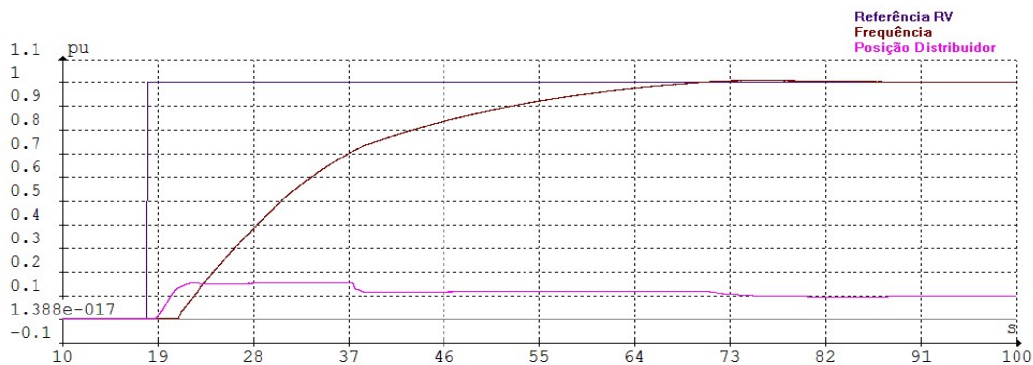


Figura 48 - Oscilografia do Ensaio de Partida Automática RV novo

Fonte: Do autor (2020)

Tabela 6 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Partida Automática

TABELA DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS - ENSAIO DE PARTIDA AUTOMÁTICA				
	ABERTURA DO DISTRIBUIDOR		TEMPO TOTAL PARA ATINGIR A VELOCIDADE NOMINAL (S)	DIFERENÇA DE TEMPO EM (%)
	PARTIDA 1 EM (%)	PARTIDA 2 EM (%)		
REGULADOR ANTIGO	13,8	10	81	16,7
REGULADOR ATUAL	16	10	69,4	

Os resultados expostos na tabela 6, mais uma vez mostra uma grande diferença de tempo no processo, 16,7%. Pode se notar na tabela, uma diferença no parâmetro partida 1, esse parâmetro foi alterado com objetivo de acelerar a partida do gerador e reduzir o estresse mecânico (Vibrações) ocasionado durante a partida do gerador.

A alteração no parâmetro da partida 1 só foi possível, porque nos ensaios de abertura e fechamento do distribuidor em água morta a malha de controle dos atuadores apresentou uma estabilidade grande no controle dos atuadores e esse desempenho gerou confiabilidade para alterar os parâmetros do processo.

Observando a oscilografia do regulador atual, é possível notar um processo de partida sem nenhum overshoot, embora a oscilografia do regulador antigo também não apresente overshoot, o processo de partida foi bem mais lento.

5.5 Ensaio de parada rápida com descarga prévia

Parada rápida com descarga prévia, consiste no desligamento do gerador por algum defeito de natureza mecânica (temperatura alta em algum mancal, falta de fluxo de óleo ou água no sistema de refrigeração dos mancais, etc....). Quando ocorre o desligamento por essa condição, o regulador começa a retirar a carga ativa do gerador até que a potência assuma valores baixos denominados de potência ativa nula, entretanto o valor de potência não pode ser completamente zerado para não ocasionar a sensibilização da proteção de potência reversa no gerador.

Os valores para reconhecimento do regulador a condição de potência ativa nula podem ser configurados, porém o tempo e estabilidade do processo de descarga de potência depende da dinâmica das malhas de controle do regulador.

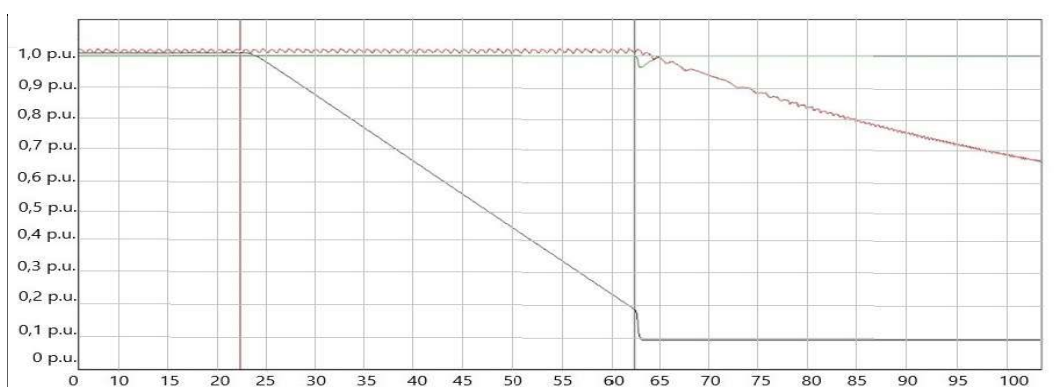


Figura 49 - Oscilografia do Ensaio de Parada Rápida com Descarga Prévia RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

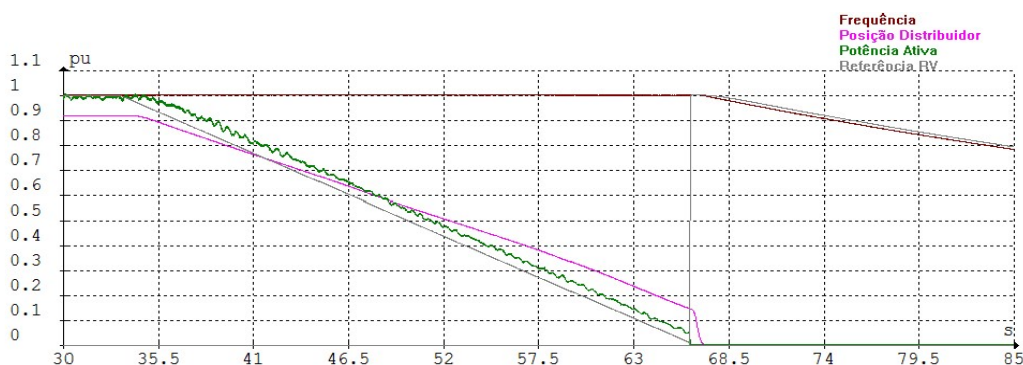


Figura 50 - Oscilografia do Ensaio de Parada Rápida com Descarga Prévia RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 7 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Parada Rápida com Descarga Prévia

TABELA DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS - ENSAIO DE PARADA RÁPIDA COM DESCARGA PRÉVIA			
	POTÊNCIA ATIVA (MW)	ABERTURA DISTRIBUIDOR (%)	TEMPO DE DESCARGA EM (S)
REGULADOR ANTIGO	45	12	40,5
REGULADOR ATUAL	45	15	30,2

A tabela 7 mostra uma diferença de 34,1% no tempo de descarga previa entre os dois reguladores, pode-se notar também uma diferença na abertura do distribuidor, essa diferença se deve ao ajuste de referência de potência ativa nula. Mais uma vez os resultados obtidos nos ensaios, demonstram o desempenho superior do regulador atual.

5.6 Ensaio com rejeição de carga

Rejeição de carga é a situação onde ocorre a abertura do disjuntor de alta do gerador com o mesmo sincronizado a rede, podendo o gerador estar operando com carga nominal ou não.

Quando o gerador esta operando sincronizado, o rotor do gerador esta acoplado magneticamente a rede que proporciona um torque elétrico em sentido oposto ao sentido de giro do gerador, nessa condição o distribuidor também encontra-se com abertura superior aos valores necessários para manter o gerador em velocidade nominal. No momento que ocorre a rejeição de carga, o acoplamento magnético do gerador com a rede é perdido e como o distribuidor encontra-se com abertura elevada o gerador tende a aumentar sua velocidade de forma proporcional a abertura do distribuidor. Para que o gerador não alcance níveis de velocidade prejudiciais ao conjunto, o regulador de velocidade precisa trabalhar de forma precisa, evitando riscos relacionados a sobrevelocidades no gerador.

A rejeição de carga é uma situação que pode ocorrer de duas maneiras, e cada uma delas provoca uma resposta diferente no regulador: a primeira situação

é por falha elétrica no gerador, nessa situação o gerador precisa ser desligado completamente com isso o regulador de velocidade precisa fechar o distribuidor rapidamente evitando sobrevelocidades excessivas. Na segunda situação o gerador precisa ficar na condição de giro mecânico desecitado, e essa situação exige muito do regulador, porque além de evitar sobrevelocidades o regulador também precisa estabilizar a velocidade do gerador mantendo-o na velocidade nominal, afim de acelerar o restabelecimento do gerador ao sistema.

5.6.1 Rejeição de carga com 25% da carga nominal

Uma observação importante com relação aos ensaios de rejeição de carga, é a diferença de potência ativa no gerador, essa diferença se deve ao nível do reservatório no momento do ensaio.

Dos níveis de rejeição de carga testados, a rejeição com 25% da carga nominal é um nível que causa pouca perturbação no sistema e por isso as diferenças de desempenho nos dois reguladores são menores, mas ainda assim perceptíveis. Pode-se notar através da tabela de comparativo uma pequena diferença na sobrevelocidade do gerador.

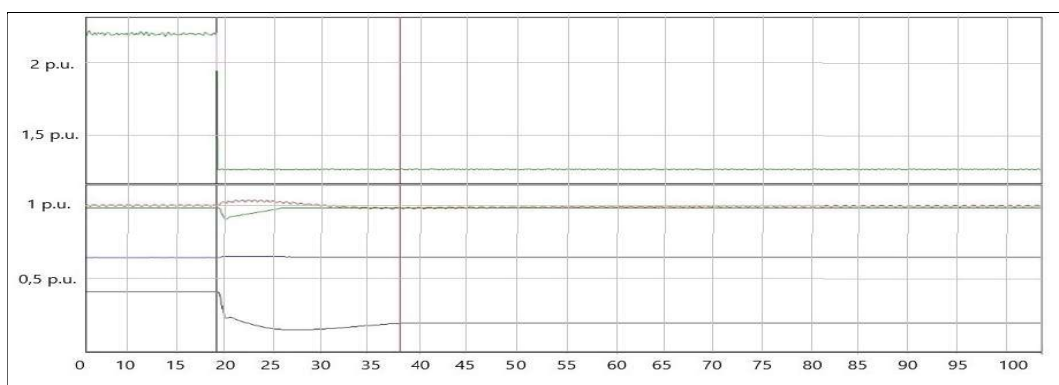


Figura 51 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 25% RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

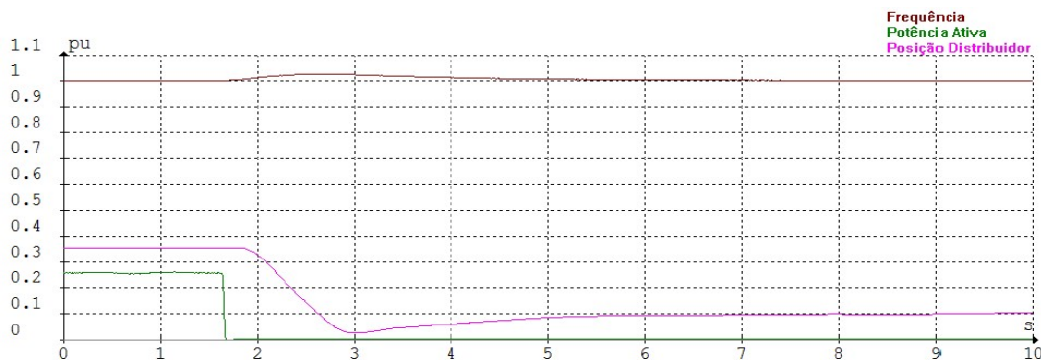


Figura 52 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 25% RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 8 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 25%

TABELA DE COMPARAÇÃO - ENSAIO DE REJEIÇÃO DE CARGA 25%					
	POTÊNCIA ATIVA (MW)	ABERTURA DISTRIBUIDOR (%)	VELOCIDADE MÁXIMA (%)	PRESSÃO MÁXIMA CAIXA ESPIRAL (BAR)	TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DA VELOCIDADE NOMINAL (S)
REGULADOR ANTIGO	11,75	34,9	104,4	31,52	19,6
REGULADOR ATUAL	13,79	35	102,6	31,04	19,5

5.6.2 Rejeição de carga com 50% da carga nominal

As perturbações causadas no gerador por uma rejeição com 50% da carga são mais perceptíveis e a partir daqui será possível notar uma diferença de desempenho maior entre os dois reguladores. Observando a tabela de comparação de resultados é possível notar que o regulador atual apresentou rendimento melhor e mais notável nos quesitos sobrevelocidade e tempo de estabilização da velocidade.

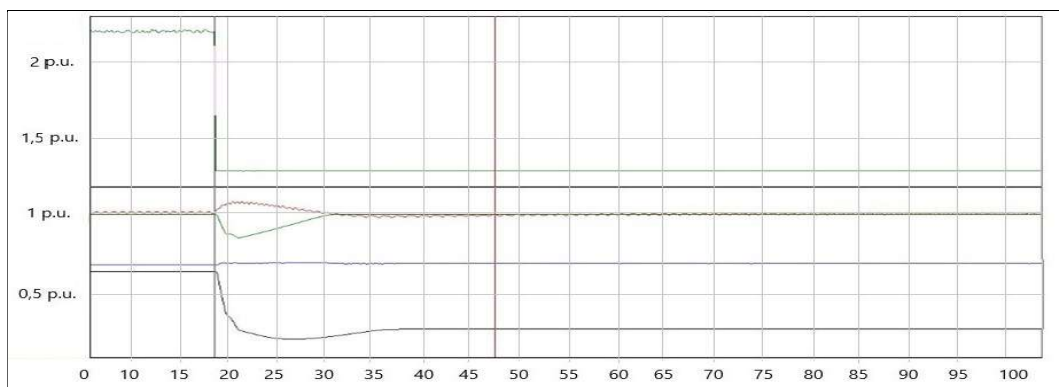


Figura 53 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 50% RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

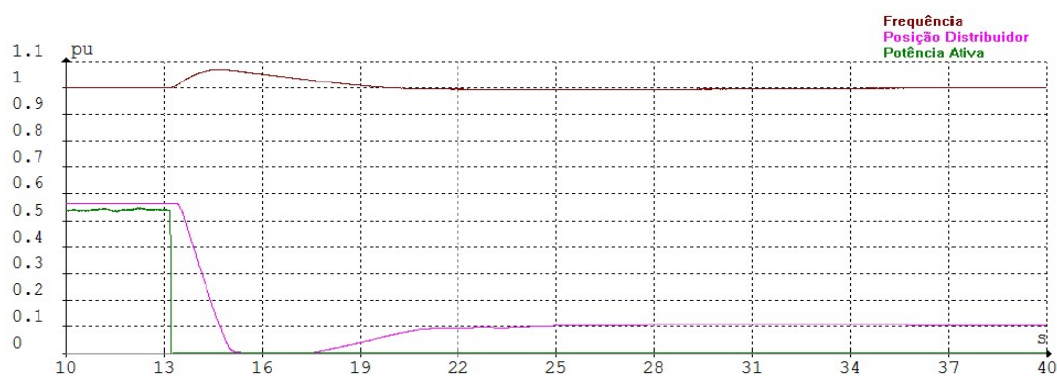


Figura 54 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 50% RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 9 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 50%

TABELA DE COMPARAÇÃO - ENSAIO DE REJEIÇÃO DE CARGA 50%					
	POTÊNCIA ATIVA (MW)	ABERTURA DISTRIBUIDOR (%)	VELOCIDADE MÁXIMA (%)	PRESSÃO MÁXIMA CAIXA ESPIRAL (BAR)	TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DA VELOCIDADE NOMINAL (S)
REGULADOR ANTIGO	23,5	54,9	108,4	30,95	30
REGULADOR ATUAL	29,4	56,6	107	31,04	26,9

5.6.3 Rejeição de carga com 75% da carga nominal

Com o aumento da carga na rejeição a diferença de desempenho entre os dois reguladores vão ficar cada vez maiores, e no nível de 75% da carga a diferença no tempo de estabilização mostra a uma grande diferença de desempenho entre os dois reguladores.

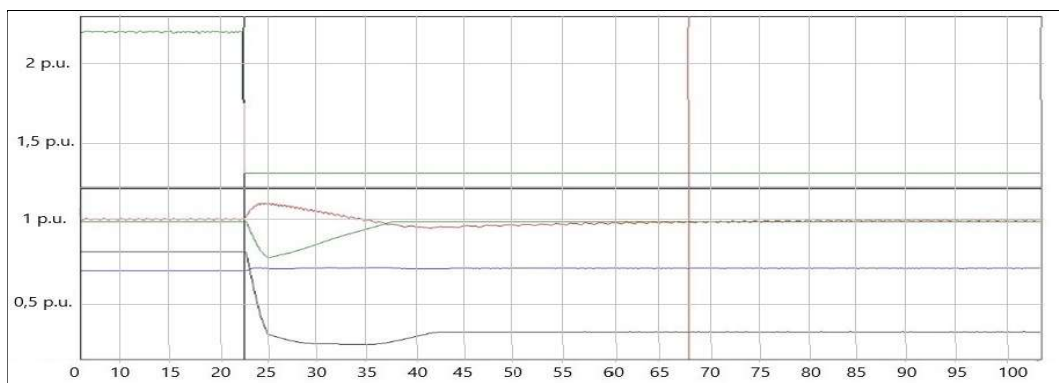


Figura 55 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 75% RV antigo

Fonte: Do autor (2020)



Figura 56 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 75% RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 10 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 75% da Nominal

TABELA DE COMPARAÇÃO – ENSAIO DE REJEIÇÃO DE CARGA 75%					
	POTÊNCIA ATIVA (MW)	ABERTURA DISTRIBUIDOR (%)	VELOCIDADE MÁXIMA (%)	PRESSÃO MÁXIMA CAIXA ESPIRAL (BAR)	TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DA VELOCIDADE NOMINAL (S)
REGULADOR ANTIGO	35,25	74,2	113,3	30,9	47,2
REGULADOR ATUAL	42,5	75,3	112,1	31	31,2

5.6.4 Rejeição de carga com 100% da carga nominal

A maior diferença de desempenho entre os dois reguladores será comprovada com a rejeição à 100% da carga. Mostrado pela tabela de comparação de resultados é notado que o regulador antigo não conseguiu estabilizar a velocidade do gerador após a perturbação causada e desligou o gerador, entretanto o regulador atual conseguiu estabilizar a velocidade sem problemas, comprovando seu desempenho superior ante o regulador antigo.

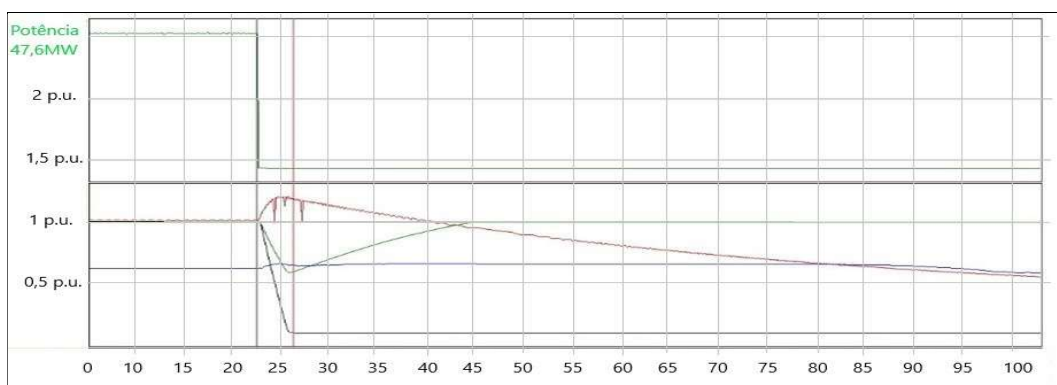


Figura 57 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 100% RV antigo

Fonte: Do autor (2020)

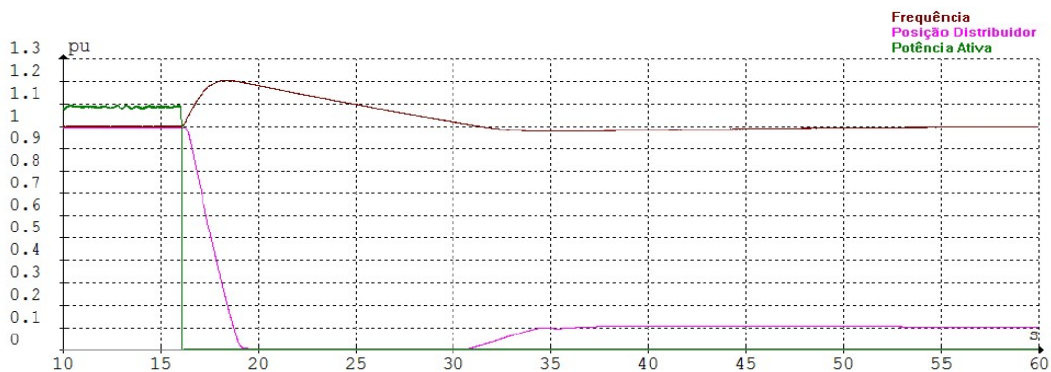


Figura 58 - Oscilografia do Ensaio de Rejeição de Carga à 100% RV novo

Fonte: Reivax (2020)

Tabela 11 - Comparativo de Desempenho no Ensaio de Rejeição de Carga à 100%

TABELA DE COMPARAÇÃO - ENSAIO DE REJEIÇÃO DE CARGA 100%					
	POTÊNCIA ATIVA (MW)	ABERTURA DISTRIBUIDOR (%)	VELOCIDADE MÁXIMA (%)	PRESSÃO MÁXIMA CAIXA ESPIRAL (BAR)	TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DA VELOCIDADE NOMINAL (S)
REGULADOR ANTIGO	47	99,4	121,6	30,9	∞
REGULADOR ATUAL	50	100	120,3	31,1	43,9

6 CONCLUSÃO, COMENTÁRIOS E PROJETOS FUTUROS

Conclui-se que, com o passar dos anos e o avanço da tecnologia, passou-se a ter um sistema desatualizado e obsoleto, principalmente pelo fato de não estar mais disponível no mercado industrial peças para reposição, e com a modernização, foi possível obter uma gama de benefícios em relação ao sistema que estava instalado anteriormente.

A substituição do sistema de controle dos reguladores de velocidade solucionou os graves problemas relacionados a estabilidade do sistema, dando mais confiabilidade, reduzindo o número de falhas provenientes do sistema de regulação bem como aumentando a disponibilidade do sistema de geração das unidades onde foram instalados o novo sistema.

Esta nova topologia, com a implementação de redundâncias, tanto no sistema de controle (canal principal e canal retaguarda, podendo haver a comutação de canal a qualquer momento sem paralisar o controle), como também redundância de velocidade/frequência (aquisição de dados através de sensores pick-up e/ou transformador potencial) aliado à possibilidade de visualizar oscilografias em tempo real através da IHM local e realizar a troca de qualquer parâmetro do processo com o gerador em pleno funcionamento, foi determinante para atingir o objetivo deste trabalho.

Dentre os ensaios comparativos do sistema modernizado, puderam-se observar ganhos de respostas mais rápidas em todos os ensaios apresentados neste trabalho, o que comprova também a eficácia do projeto, trazendo benefícios no processo de reestabelecimento operacional dos geradores que são de suma importância para os processos da usina hidrelétrica.

Como trabalhos futuros, pode-se citar a modernização do Regulador de Tensão, da Unidade de Aquisição e Controle (UAC) e também da Unidade Terminal Remota (UTR) conciliando assim, com esta modernização do Regulador de Velocidade, um sistema de alta confiabilidade no que diz respeito à operação de longa distância.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Análise Estatística de Desempenho. Belo Horizonte - Mg: Abrage, 2014

ANDIA, C. G. (2005). Centrales Eléctricas. 1º ed. Arequipa: Universidad Católica de Santa Maria.

ALMEIDA, Antonio Tadeu Lyrio de. Máquinas Síncronas. Itajuba: Grupo de Estudo em Manutenção Eletro-eletrônica e Instalações, 2000. 87 p.

DÍEZ, P. F. (1996). Turbinas Hidráulicas. Espanha: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Catarina.

INEPAR-IESA, <http://www.inepar.com.br/>, acessado em junho de 2020.

ITAIPU BINACIONAL. <https://www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras>, acessado em julho de 2020.

LINSINGEN, 2008 Irlan von Linsingen, “Fundamentos de Sistemas hidráulicos”, 2ª. Edição, Editora da UFSC, 2003.

MAZZORANA, R.H.F. Modelagem dinâmica via fluxo de potência de Reguladores de Velocidade em Usinas Hidroelétricas, 2008. 140p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

KUNDUR, P. (Prabha); BALU, Neal J.; LAUBY, Mark G. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill Medical, 1993. xxiii, 1176p.

ONS, <http://www.ons.org.br/>, acessado em outubro de 2019.

PORTAL PCH. Turbinas Hidráulicas. Disponível em: <http://www.portal-pch.com.br/93-informacoes-portal-pch/turbinas-hidraulicas.html>. Acesso em: 22 set. 2020.

PORCIÚNCULA, G; DE NEGRI V; DIAS A. Reliability of ElectroHydraulic equipment systematization and analysis. ABCM Symposium Series in Mechatronics-2. p.393-400, 2006.

REIVAX AUTOMAÇÃO E CONTROLE S/A, “Regulador de Velocidade de Turbinas Hidráulicas - Aspectos de Controle”, 2000.

REIVAX AUTOMAÇÃO E CONTROLE S/A. Geração de Energia Elétrica. Reguladores de velocidade e sistemas de excitação. Março, 2007.

REIVAX, catálogo, 2020

Stone Greg C., Edward A. Boulter, et. al. Electrical insulation for rotating machines, IEEE Press Series on Power Engineering. 2004.

SANTIAGO, Cesar; BECKER, Gilson; KERN, Mário. Regulador hidráulico de velocidade REV1H. Curitiba: COPEL, 2004. Relatório técnico.

VINADE, C.A.C. Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a Sistemas Hidráulicos e implementação de um sistema especialista. 2003. 233p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

VOITH HYDRO, Catálogo, 2001.

YESID, E. A. M. Desenvolvimento de um sistema servopneumático para Regulação Velocidade de turbinas em pequenas centrais Hidroelétricas. 2006. 150p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

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.