



**GRUPO - 1**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH**

**Desempenho de Turbinas Pelton em Ilhamentos**

**Lucas M. da Silva (\*)**  
**REIVAX S/A**

**Henrique A. Menarin**  
**REIVAX S/A**

**Rafael B. de Paiva**  
**REIVAX S/A**

**Bruno B. Brandl**  
**REIVAX S/A**

**RESUMO**

Este Informe Técnico apresenta as dificuldades de controle de turbinas Pelton em condições onde a carga é reduzida rapidamente, como em Ilhamentos e rejeições de carga. Nessas ocorrências o torque mecânico precisa se adaptar à nova carga. Quando a velocidade atinge o novo regime permanente as agulhas estão posicionadas de forma a fornecer a vazão de água necessária para o novo ponto de operação. Como, em geral, o tempo de fechamento das agulhas é longo, é necessário utilizar os defletores para reduzir rapidamente o torque mecânico, a fim de reduzir a sobrevelocidade da máquina. Logo que os defletores fecham, desviando completamente o jato d'água, a velocidade cai de forma abrupta. Dessa forma, é preciso abrir novamente os defletores para que a máquina não desacelere abaixo de um limite pré-determinado. Nessa situação tem-se um problema de controle muito distinto daquele para o qual a malha de controle de velocidade convencional foi projetada e sintonizada.

Neste Informe Técnico será discutida a influência dos defletores em casos de Ilhamentos e rejeições de carga e será proposta uma topologia alternativa de controle utilizando Defletores Proporcionais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Ilhamento, Rejeição, Pelton, Controle e Regulação Primária de Frequência.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A turbina Pelton é uma turbina hidráulica de ação projetada para operar em altas quedas e baixas vazões. É constituída por um rotor com pás em formato de concha e possui um ou mais injetores. Os jatos de água provenientes dos injetores ao se chocarem com as pás do rotor geram o torque mecânico que é aplicado ao eixo da turbina.

Quando dotada de múltiplos injetores, dependendo da potência que se queira gerar a turbina Pelton pode operar com todos os injetores conjuntamente ou com um número variável de injetores ativos de acordo com o patamar de potência ativa. Esta comutação de agulhas visa aumentar a eficiência, otimizando o consumo de água. Para controlar a vazão da água nos injetores dentro deles está instalada uma válvula do tipo agulha, ou simplesmente agulha, que altera a área da seção pela qual a água passa. A posição da agulha é controlada pelo regulador de velocidade.

Quando a vazão é reduzida pelo fechamento das agulhas, a pressão da coluna d'água aumenta localmente nos injetores. Esse aumento de pressão se propaga ao longo de todo o conduto causando golpe de aríete. O tempo de propagação das ondas de pressão no conduto é proporcional ao comprimento do conduto. Quanto maior esse tempo de propagação maior é a sobrepressão gerada no conduto. Para manter a sobrepressão abaixo do limite de operação segura no conduto a abertura e o fechamento das agulhas são lentos, com tempos muito mais longos quando comparados aos tempos de fechamento dos distribuidores em turbinas Francis e Kaplan.

Devido ao lento fechamento das agulhas, as turbinas Pelton são dotadas de defletores, cuja finalidade é desviar o jato d'água que sai dos injetores antes de atingir o rotor. Os defletores podem atuar muito rapidamente sobre o jato

d'água, reduzindo o torque mecânico sem causar o golpe de aríete. Essa ação permite que em situações de redução brusca de carga, como rejeição e ilhamento, se possa evitar a sobrevelocidade da turbina. O controle de posição do defletor também é realizado pelo regulador de velocidade. Tipicamente são utilizadas duas opções de controle para o defletor: atuação do tipo ON/OFF, com o defletor totalmente aberto ou totalmente fechado; e atuação proporcional, em que o defletor pode ser colocado em posições intermediárias. Nesse último caso a posição do defletor é determinada a partir da posição da agulha de modo que o defletor fica próximo do jato sem desviar a água.

Essas características das turbinas Pelton fazem com que esse tipo de turbina possua respostas dinâmicas bem distintas de outros tipos, como as turbinas de reação Kaplan ou Francis.

Para discutir a influência dos defletores em condições de rejeições de carga e ilhamentos serão apresentados os modelos de simulação adotados, resultados de ensaios reais e simulados comparando a estrutura de controle convencional com a estrutura de controle alternativa proposta nesse trabalho.

Este trabalho será organizado da seguinte maneira: Na seção 2 descreve-se o modelo matemático utilizado para representar a turbina Pelton. Na Seção 3 é apresentado o problema a ser estudado sobre a influência dos defletores em Ilhamentos. Na seção 4 é proposta uma topologia alternativa de controle de defletores. Por fim, na seção 5 serão apresentadas as conclusões.

## 2.0 - MODELO DE SIMULAÇÃO DE TURBINA PELTON

Em [1] é apresentado um modelo de simulação para turbinas Francis conforme apresentado na FIGURA 1. Para a correta modelagem de turbina Pelton, a entrada *Gate* deve ser substituída pela posição da agulha, representada pela variável  $Y_a$ . Em [2] é mostrado que no caso em que há mais de uma agulha é possível fazer a simplificação de utilizar uma agulha equivalente que represente o comportamento do conjunto de agulhas. Neste trabalho será utilizada esta abordagem.

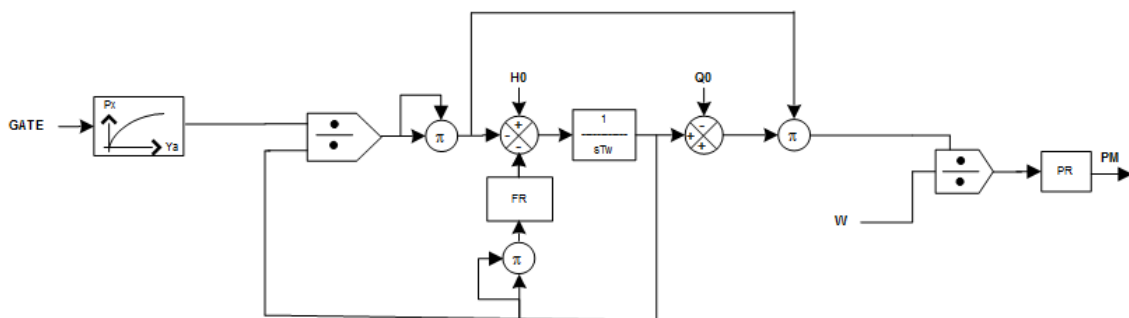


FIGURA 1 – Modelo Francis com Conduto Forçado Simples

Em [2] é apresentado que a relação Agulha X Defletor tem influência no torque mecânico final entregue pela turbina: a atuação do defletor faz com que o jato d'água que sai da agulha choque no defletor de maneira que há uma rápida diminuição do torque mecânico. Para representar esta rápida diminuição do torque é necessário que o ponto de entrada do Defletor no modelo do Conduto/Turbina esteja após a dinâmica da coluna d'água que é representada neste modelo pelo integrador  $1/sT_w$ .

Será utilizado o modelo de Conduto/Turbina conforme apresentado na FIGURA 2.

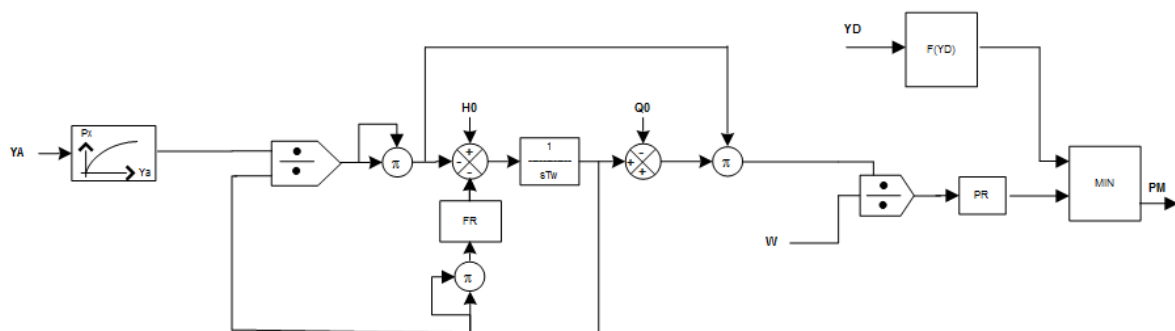


FIGURA 2 – Modelo Pelton com Conduto Forçado Simples

A função  $f(Yd)$  no modelo segue a seguinte equação:

$$F(YD) = A * Yd^B$$

Foram utilizados os seguintes valores nas simulações.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo do Conduto/Turbina

Parâmetro	Valor
Tw	1,0
Fr	0
Q0	0,0138
H0	1,0
Pr	0,785
A	1,4
B	2,0

### 3.0 - INFLUÊNCIA DOS DEFLETORES EM ILHAMENTOS

O problema estudado neste trabalho foi originado pelo desempenho insuficiente do defletor no controle de Velocidade/Frequência em uma turbina de 20 MW após ocorrer uma rejeição de carga. A turbina em questão tem as seguintes características:

- Tempo de fechamento das Agulhas = 62 segundos
- Constante de Inércia = 3,82 segundos

Estas características fazem com a turbina tenha uma variação da velocidade muito alta, fazendo com que o controle da velocidade dependa muito da estratégia utilizada para posicionar o defletor.

Na FIGURA 3 é mostrado o caso real de uma rejeição de 90% da carga, onde é possível observar o comportamento oscilatório do defletor, além do afundamento da frequência.

Após a rejeição de carga, as agulhas estão fechando em sua máxima taxa de fechamento para alcançar uma posição condizente com a posição em vazio. A velocidade de fechamento das agulhas é limitada mecanicamente. Durante este movimento da agulha o defletor permanece fechado até que a agulha chegue a um valor de posição perto da posição em vazio. Esta é uma estratégia tradicional e pode causar sub-frequência, pois os defletores permanecerão fechados até as agulhas alcançarem o patamar em vazio. Se a máquina tiver constante de inércia baixa, a velocidade vai decrescer de maneira rápida podendo até mesmo ocasionar bloqueio da unidade pela atuação da proteção elétrica função 81U.

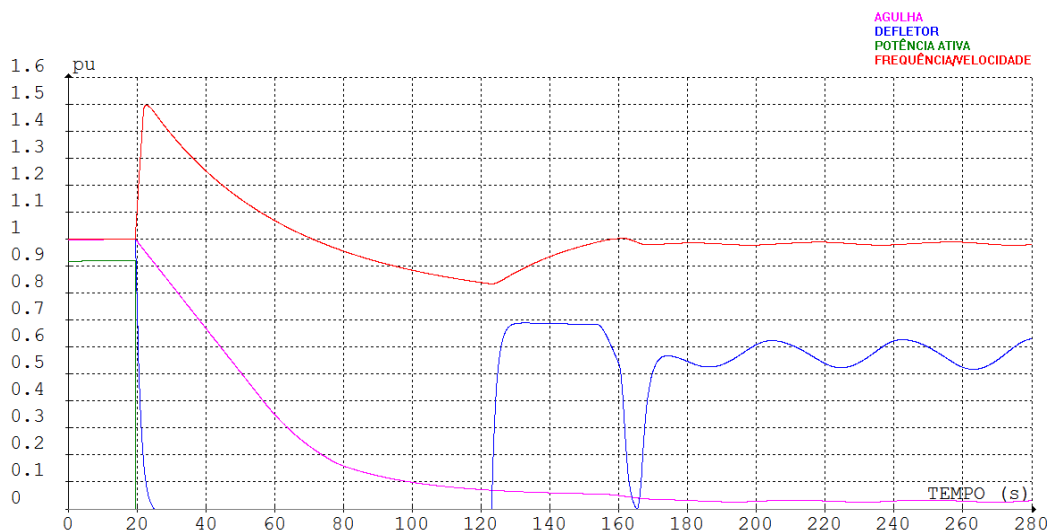


FIGURA 3 – Caso Real – Rejeição de Carga – 90%

O desempenho insuficiente do defletor no controle de velocidade também pode acontecer no caso de uma abertura de linha que conecta a planta a um sistema interligado, onde após a abertura da linha a planta continua a gerar potência para um sistema ilhado com carga muito menor do que a geração anterior à ocorrência. Foi simulado um

caso de ilhamento onde foi aplicado um degrau de -65% na carga simulada. A metodologia do teste conhecida por rede isolada simulada é encontrada em IEEE STD 1207 [3] e IEC 60308 [4]. A resposta desta simulação de ilhamento pode ser observada na FIGURA 4.

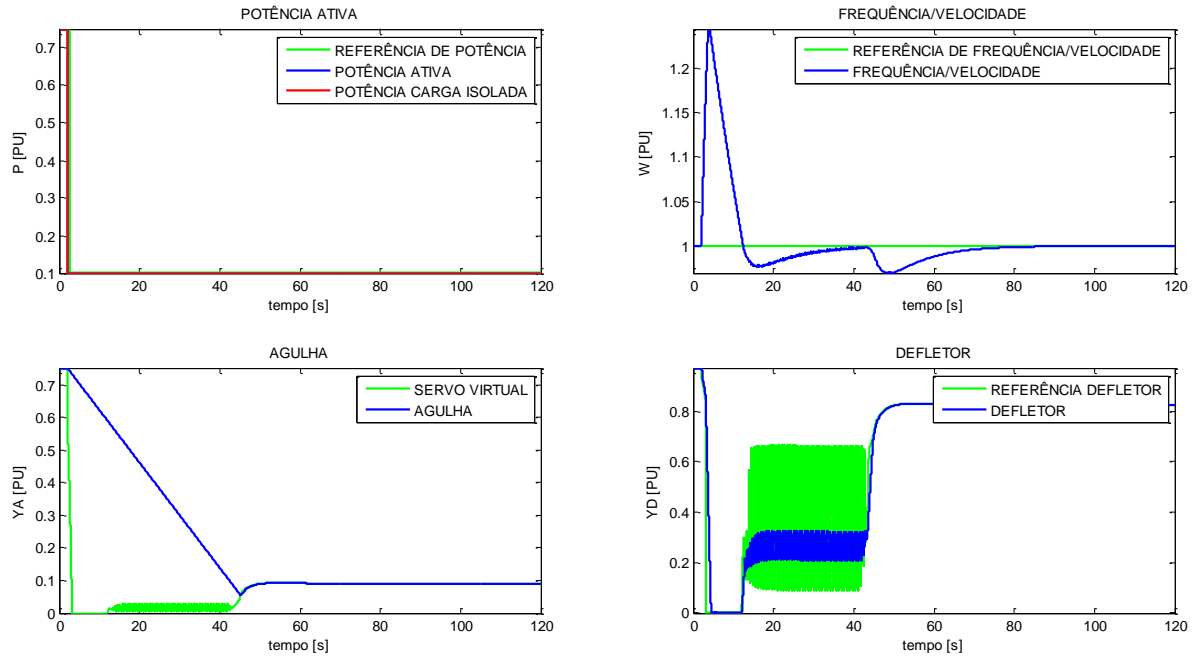


FIGURA 4 – Simulação de Ilhamento com Topologia tradicional de Posicionamento do Defletor

Na FIGURA 5 é possível observar que, com os mesmos ajustes que provocaram o comportamento oscilatório do defletor durante o ilhamento, para uma pequena perturbação de um degrau de -10% na carga simulada a Regulação Primária de Frequência é satisfatória.

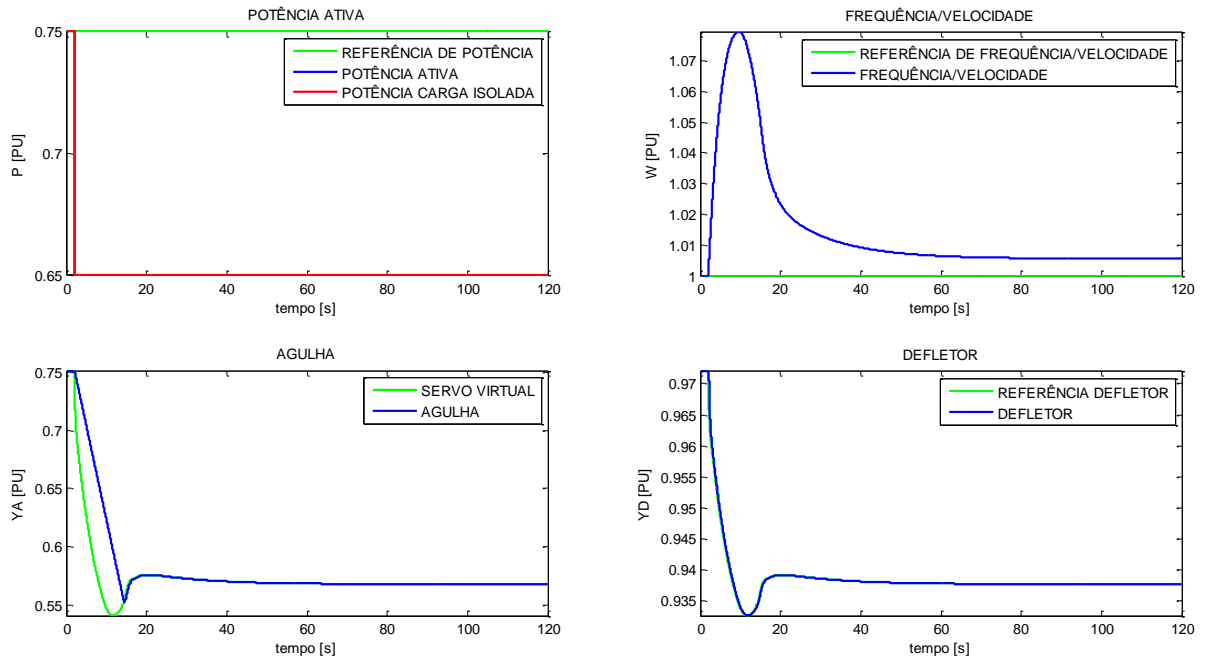


FIGURA 5 – Simulação de ilhamento com perturbação pequena

No caso real de rejeição de carga, apresentado na FIGURA 3 e no caso simulado de ilhamento, apresentado nas

FIGURAS 4 e 5, os parâmetros de controle do Regulador de Velocidade (RV) estavam ajustados de acordo com o método de ajuste proposto em [3] e [4]. A oscilação da potência ativa observada na FIGURA 4 foi causada pelo fato de o defletor ser posicionado através de uma curva de conjugação.

Em turbinas Pelton cujos defletores são comandados por válvulas proporcionais, é possível posicionar os defletores em qualquer ponto do seu curso. Esta conjugação é realizada através de uma relação pré-determinada de Agulha x Defletor. No caso de defletores conjugados a referência da malha de posição do defletor é determinada conforme a FIGURA 6.

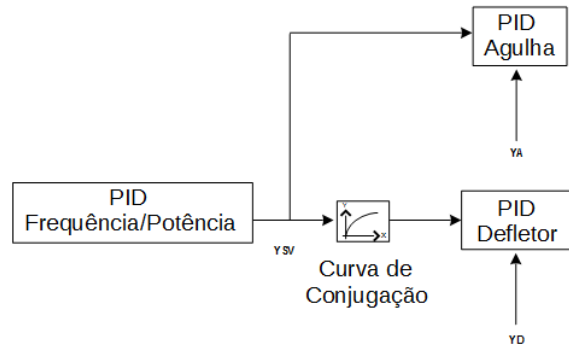


FIGURA 6 – Esquema de controle com defletor conjugado

Como se pode observar acima, a referência de posição do defletor é dependente do sinal de saída da malha de controle de frequência/potência, denotado pela variável  $Y_{sv}$ , que também corresponde ao sinal de referência de posição do PID das agulhas.

#### 4.0 - TOPOLOGIA DE CONTROLE PROPOSTA PARA DEFLETORES PROPORCIONAIS

Nesta seção será apresentada uma estratégia alternativa de posicionamento do defletor, que tem como objetivo melhorar o desempenho do RV perante rejeições de carga e ilhamentos. Uma alternativa para posicionar o defletor é fazer com que a referência de sua malha seja independente da curva de conjugação. Esta mudança de estratégia seria utilizada em situações que a atuação do defletor através da curva de conjugação não tem desempenho satisfatório no controle de frequência. Na FIGURA 7 é apresentado o diagrama de blocos do esquema de controle alternativo do defletor com detecção de ilhamento.

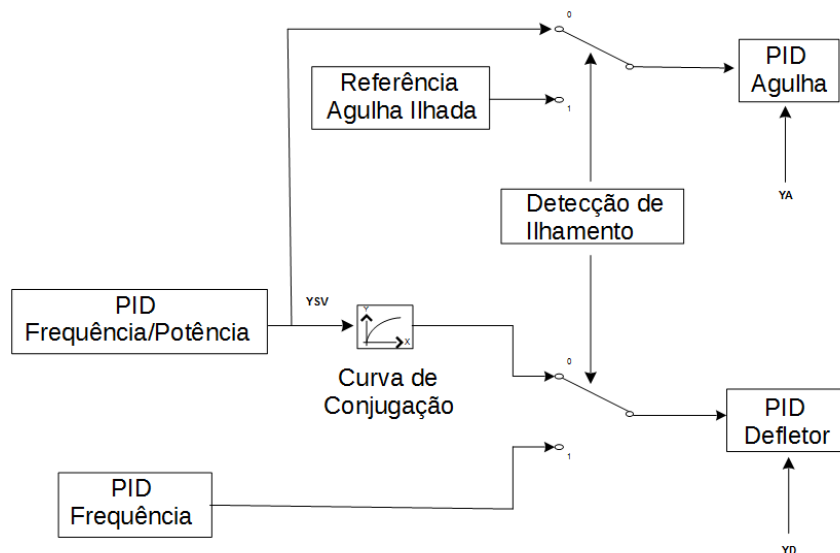


FIGURA 7 – Esquema de Controle Alternativo do Defletor com Detecção de Ilhamento

A comutação da referência de posição do defletor é feita a partir da detecção de estado de ilhamento. O RV, ao detectar que a unidade está ilhada, faz automaticamente a desconexão da curva de conjugação, assim a referência de posição do defletor é determinada agora pela saída de uma malha PID que controla frequência/velocidade. Uma maneira proposta para detectar o ilhamento é a monitoração das variáveis: potência ativa e frequência de tal maneira que as seguintes condições sejam satisfeitas:

- frequência fora de uma faixa ajustável, por exemplo, 1,02 e 0,98 pu;
- potência ativa abaixo de valor ajustável;
- as duas condições acima satisfeitas por tempo mínimo, também ajustável.

Adicionalmente ao chaveamento da referência de posição do defletor, a comutação para o modo ilhado faz com o RV tome as seguintes ações:

- mudança do estatismo permanente para um valor menor que o ajustado para o modo Interligado;
- mudança da banda morta de frequência permanente para um valor menor que o ajustado para o modo interligado;
- mudança da referência de potência.

Para testar a lógica adicional de posicionamento do defletor, foi simulado um evento com um degrau na carga simulada de -65%, mesmo evento que foi simulado e mostrado na FIGURA 4. O resultado da simulação com a nova estratégia é apresentada na FIGURA 8.

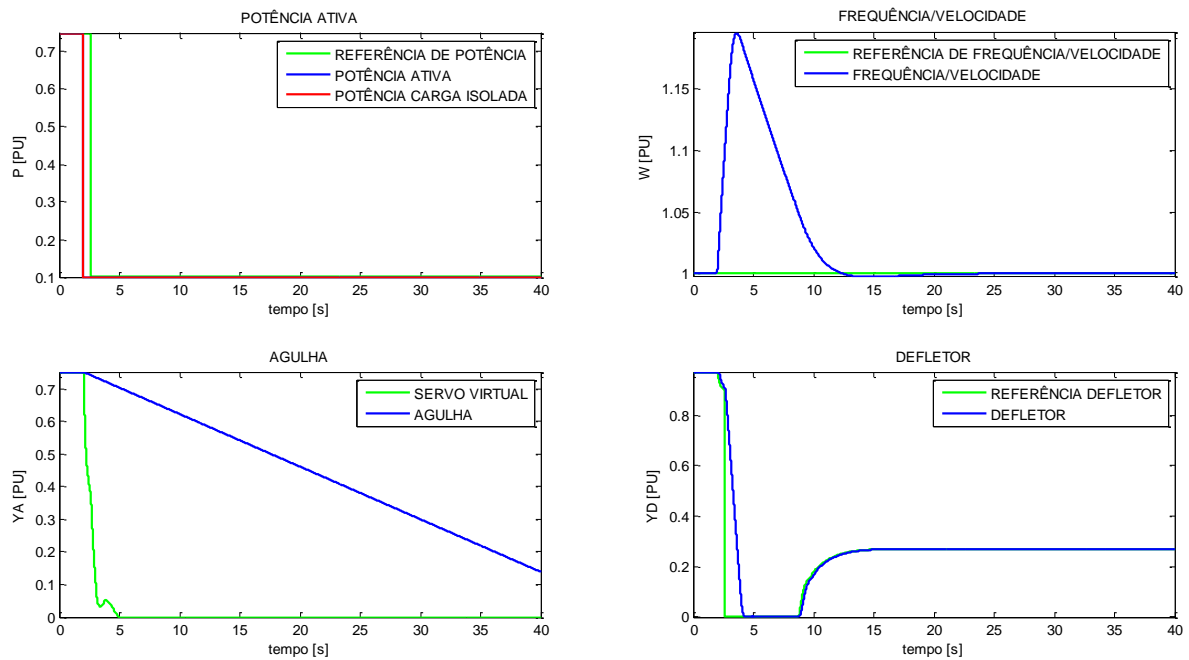


FIGURA 8 – Ilhamento com Lógica Adicional para Posicionamento do Defletor

Com a lógica adicional o tempo de restabelecimento da velocidade foi aproximadamente 10 segundos menor que o encontrado com a filosofia tradicional. A partir da comutação, o defletor passa a ser posicionado pela saída de uma malha PID de velocidade. No período onde o RV está com o modo alternativo de controle do defletor habilitado, a agulha é comandada por uma referência condizente ao valor do novo ponto de operação. Na comutação de modo também houve a ação do regulador para mudar os valores de estatismo permanente de 5% para 1% e da banda morta de 0,0005 pu para 0 pu.

Este controle alternativo do defletor foi aplicado no caso real mencionado na seção 3. Foi realizada uma rejeição de carga de 50% da nominal. Neste ensaio ao invés do teste realizado com defletor posicionado através de curva de conjugação, não houve oscilação da frequência e do defletor e, tampouco, sub-frequência.

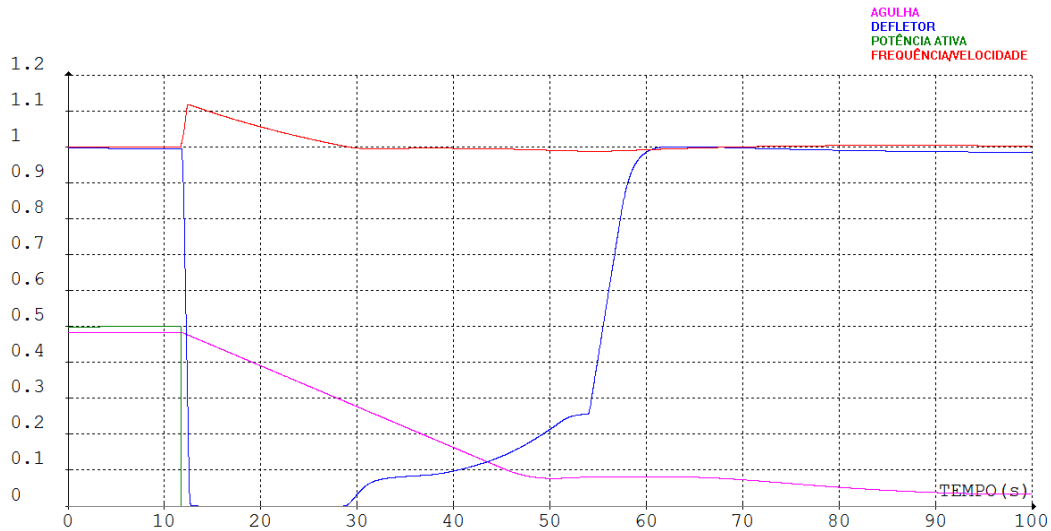


FIGURA 9 – Ilhamento com lógica adicional para posicionamento do defletor – rejeição de 50% de carga

## 5.0 - CONCLUSÃO

A estratégia de posicionamento do defletor nas turbinas Pelton é vital para o desempenho da unidade em eventos como ilhamento e rejeição de carga. Tradicionalmente o posicionamento de defletores que são comandados por válvulas proporcionais é feito através de uma curva de conjugação. Foi demonstrado neste trabalho que em casos onde o tempo de fechamento das agulhas é elevado e adicionalmente a constante de inércia do conjunto Turbina/Gerador é pequena, a regulação primária de frequência pode ter desempenho insuficiente quando o defletor é posicionado somente através da curva de conjugação.

Foi proposta neste trabalho uma topologia alternativa de controle para posicionamento de defletores nas condições de ilhamento e rejeição de carga, onde foi mostrado através de simulações e aplicação real em uma Turbina Pelton de 20MW que a topologia proposta tem desempenho superior àquela convencional que utiliza somente a curva de conjugação. Isso caracteriza uma contribuição ao controle de turbinas Pelton, uma vez que os reguladores convencionais não adotam estratégias específicas para essas condições, o que com frequência, leva ao desligamento das unidades por sub-frequência.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PAIVA, R., BUHLER, C., PAIVA, P.M.P., SOARES, J.M.C., SILVA, L.M. *Importância da Validação de Modelos Através de Ensaios de Campo para Estudos de Regulação Primária e Repotencialização em Usinas Hidrelétricas*. XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, 2015.
- [2] JOHNSON, R. M. Pelton Turbine Deflector Overspeed Control for a Small Power System. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004
- [3] IEEE Std 1207-2011, IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units. EUA.
- [4] IEC60308 – Hydraulic Turbines – Testing of control systems. CEI/IEC 60308:2005. Suíça.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Autor 1:  Nome: Lucas Manso da Silva  Local/Ano nascimento: São Paulo/SP, 1989.  Formação: Graduação em Engenharia Elétrica (UFSC, 2012), Mestrado em Engenharia Elétrica (UFSC, em andamento)  Experiência profissional: Atua desde 2012 na Reivax S/A como engenheiro, tendo atuado em diferentes funções: engenheiro de campo (testes e comissionamento de sistemas de proteção e regulação), estudos especiais (modelagem de unidades geradoras e controladores), estudos de transitórios eletromecânicos.</p>
	<p>Autor 2:  Nome: Henrique A. Menarin  Local/Ano nascimento: Castro/PR, 1986.  Formação: Graduação em Engenharia de Controle e Automação (UFSC, 2010), Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas (UFSC, 2013), pela aplicação de Controle Preditivo Baseado em Modelo em sistemas de excitação e reguladores de velocidade para usinas hidrelétricas.  Experiência profissional: Atua na REIVAX S/A desde 2008 com Pesquisa e Desenvolvimento de sistemas de controle para geração de energia elétrica.</p>
	<p>Autor 3:  Nome: Rafael Bertolini de Paiva  Local/Ano nascimento: Florianópolis/SC, 1982.  Formação: Graduação em Engenharia Elétrica (UFSC, 2009), Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (UNIFEI, 2014), Mestrado em Engenharia Elétrica (UNIFEI, em andamento)  Experiência profissional: Atua desde 2009 na Reivax S/A como engenheiro, tendo atuado em diferentes funções: engenheiro de campo (testes e comissionamento de sistemas de proteção e regulação), estudos especiais (modelagem de unidades geradoras e controladores), estudos de transitórios eletromecânicos, seletividade e curto-circuito.</p>
	<p>Autor 4:  Nome: Bruno Burigo Brandl  Local/Ano nascimento: Florianópolis/SC, 1986.  Formação: Graduação em Engenharia de Controle e Automação (UFSC, 2008),  Experiência profissional: Atua desde 2008 na Reivax SA como engenheiro projetista de software, trabalhando com o desenvolvimento de sistemas de controle e automação para geração de energia elétrica, com foco em sistemas SCADA, arquiteturas de rede, comunicação industrial, projeto de lógicas e malhas de controle, automação discreta, testes e comissionamento.</p>