

CONTROLADOR DE VELOCIDADE APLICADO A UMA TURBINA HIDRÁULICA DE FLUXO CRUZADO EM SISTEMA ISOLADO

Anderson Lopes Jacondino – jacondino@ig.com.br

Cristian Rogério Guidotti Aguiar – cristian_guidotti@hotmail.com

Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência

Murilo Vargas da Cunha – murilovcunha84@gmail.com

Universidade Católica de Pelotas, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. *Este trabalho mostra o desenvolvimento e montagem de um sistema automatizado de controle de velocidade em malha fechada, aplicado a uma turbina de fluxo cruzado, tipo Banki, para funcionamento como parte de uma Micro Central Hidrelétrica (MCH), em pequenos sistemas isolados. Utilizando como parâmetros os valores de variação da frequência descritos nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8, da Agência Nacional de Energia Elétrica, partiu-se para o desenvolvimento da lógica do programa do controlador e desenvolvimento do transdutor de velocidade. Com a finalidade de validar o sistema desenvolvido, foi montada uma planta em laboratório, sendo aplicado o protótipo do sistema de controle realimentado a uma turbina. Desta forma, foi observado que o sistema desenvolvido satisfaz todos os critérios estabelecidos na norma.*

Palavras-chave: *Sistema Automatizado, Controle de Velocidade, Sistema Isolado*

1. INTRODUÇÃO

Em um sistema isolado, o conjunto turbogerador necessita para o seu adequado funcionamento de controladores para manter os valores de frequência e tensão dentro dos parâmetros desejados. As variações de carga no gerador podem ocasionar distúrbios na frequência (velocidade de rotação da turbina) e na tensão de saída do gerador (Vanfretti, 2005). As variações de potência reativa afetam basicamente a amplitude da tensão enquanto que a variação da potência ativa afeta basicamente a frequência do sistema. Portanto, é possível controlar a potência ativa de forma independente da potência reativa (Vanfretti, 2007). O sistema de controle de potência ativa monitora a frequência (velocidade de rotação do gerador) e atua de maneira a variar o torque disponibilizado no eixo da máquina primária (turbina).

A função básica do sistema de controle em malha fechada (SCMF) de potência ativa é corrigir a frequência do sistema na ocorrência de um distúrbio, comparando o sinal de erro com um valor de referência, realimentando o controlador de maneira a acertar a saída do sistema ao valor desejado (Pallás Areny e Webster, 1991).

Conforme Negri (2002), o controle em pequenas e micro centrais hidrelétricas em sistemas isolados pode ser feito por Controlador Lógico Programável (CLP), através da leitura do processo por sensores e transdutores e por meio de uma lógica programada, o processo é monitorado e corrigido através de atuadores.

Neste trabalho é apresentada a concepção de um sistema de controle de velocidade de uma turbina hidráulica do tipo Banki para micro central hidrelétrica e validada em planta montada em laboratório

2. SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE DA TURBINA

O diagrama do sistema de controle exibido na Fig. 1 foi projetado para corrigir a velocidade de rotação do eixo da turbina na ocorrência de distúrbios, de forma a não permitir que os valores de frequência ultrapassem os limites inferior e superior, e também, não permitindo que o tempo de correção ultrapasasse o valor correspondente à faixa de operação de frequência, estabelecido pelo PRODIST. Caso o sistema de controle não corrija a velocidade do eixo da turbina, de forma que os parâmetros de frequência não sejam satisfeitos em tempo pré-estabelecido, a carga é desconectada dos terminais do gerador.

O Sistema desenvolvido pode ser descrito da seguinte maneira: através de um transdutor, que consiste em um disco acoplado diretamente ao eixo da turbina, com 30 ranhuras capazes de interromper o sinal de um fotoacoplador, é gerado um trem de pulsos com frequência diretamente proporcional ao número de ranhuras do disco e da velocidade do eixo da turbina. Por intermédio de um conversor de frequência/ tensão, exibido na Fig. 2, este trem de pulsos é convertido em um nível de tensão diretamente proporcional a frequência de entrada, ou seja, da velocidade do eixo da turbina. Desta forma, é realizado o monitoramento da planta, que na ocorrência de qualquer distúrbio verificado na velocidade do eixo da turbina, o sistema atua por intermédio de um motor de passo acoplado diretamente a uma válvula de controle de fluxo, assim, variando de forma gradativa a vazão de fluido que translada a turbina, e por conseguinte, variando a frequência de saída do gerador de energia elétrica.

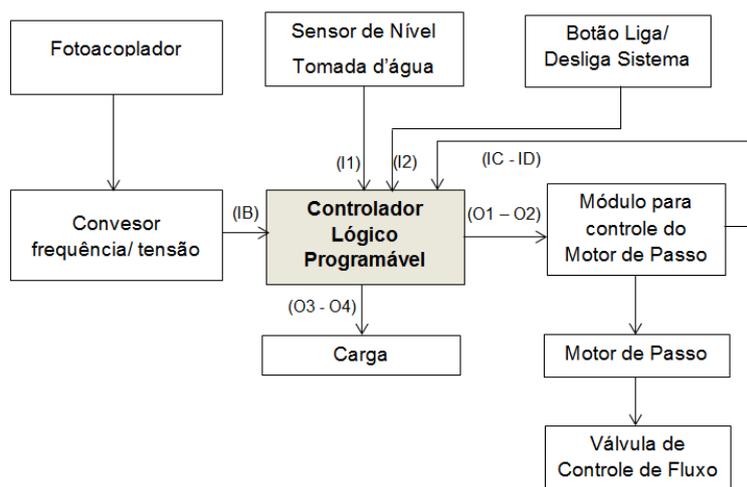


Figura 1 - Diagrama do sistema de controle de velocidade.

Como se pode verificar nas Fig. 1 e 3, os indicadores I1 e I2 correspondem a entradas digitais do Controlador Lógico Programável referentes ao contato normalmente aberto (NA) do sensor de nível da tomada d'água e do botão de acionamento do sistema, bem como IB, IC e ID correspondem respectivamente as entradas analógicas relacionadas ao conversor frequência/ tensão cuja tensão varia de 0 à 10V e ao módulo para controle do motor de passo, sendo que as entradas IC e ID recebem sinais de tensão de 0 ou 5V, ou seja, quando a válvula está totalmente fechada a entrada IC recebe um sinal de 5V do módulo de controle do motor de passo e ID também recebe um sinal de mesma amplitude quando a válvula está totalmente aberta. Estes contatos tem a finalidade de informar a posição da válvula ao controlador, evitando assim, que o motor seja acionado quando o seu eixo se encontra bloqueado. Os contatos das saídas digitais O1, O2 acionam o motor de passo para respectivamente abrir ou fechar a válvula do conjunto atuador, e também, os contatos O3 e O4 correspondem ao acionamento da carga, sendo acionada somente quando todos os parâmetros pré-estabelecidos no controlador forem satisfeitos.

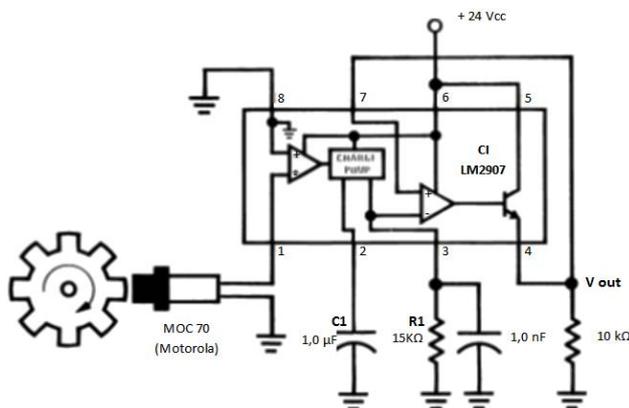


Figura 2 - Esquema básico de ligação do conversor frequência/ tensão.

A relação da frequência de entrada pela tensão de saída (V_{out}) do conversor frequência/ tensão pode ser calculada pela multiplicação das seguintes grandezas:

- f_{IN} - valor de frequência de entrada desejada por um Volt de saída;
- V_{cc} - tensão de alimentação do circuito (V) ;
- R_1 - valor da resistência elétrica do resistor (Ω); e
- C_1 - valor da capacitância (F).

Esta relação entre frequência/ tensão pode ser entendida também conforme o descrito na Eq. (1) (National, 2009).

$$V_{out} = f_{IN} \cdot V_{cc} \cdot R_1 \cdot C_1 \quad (1)$$

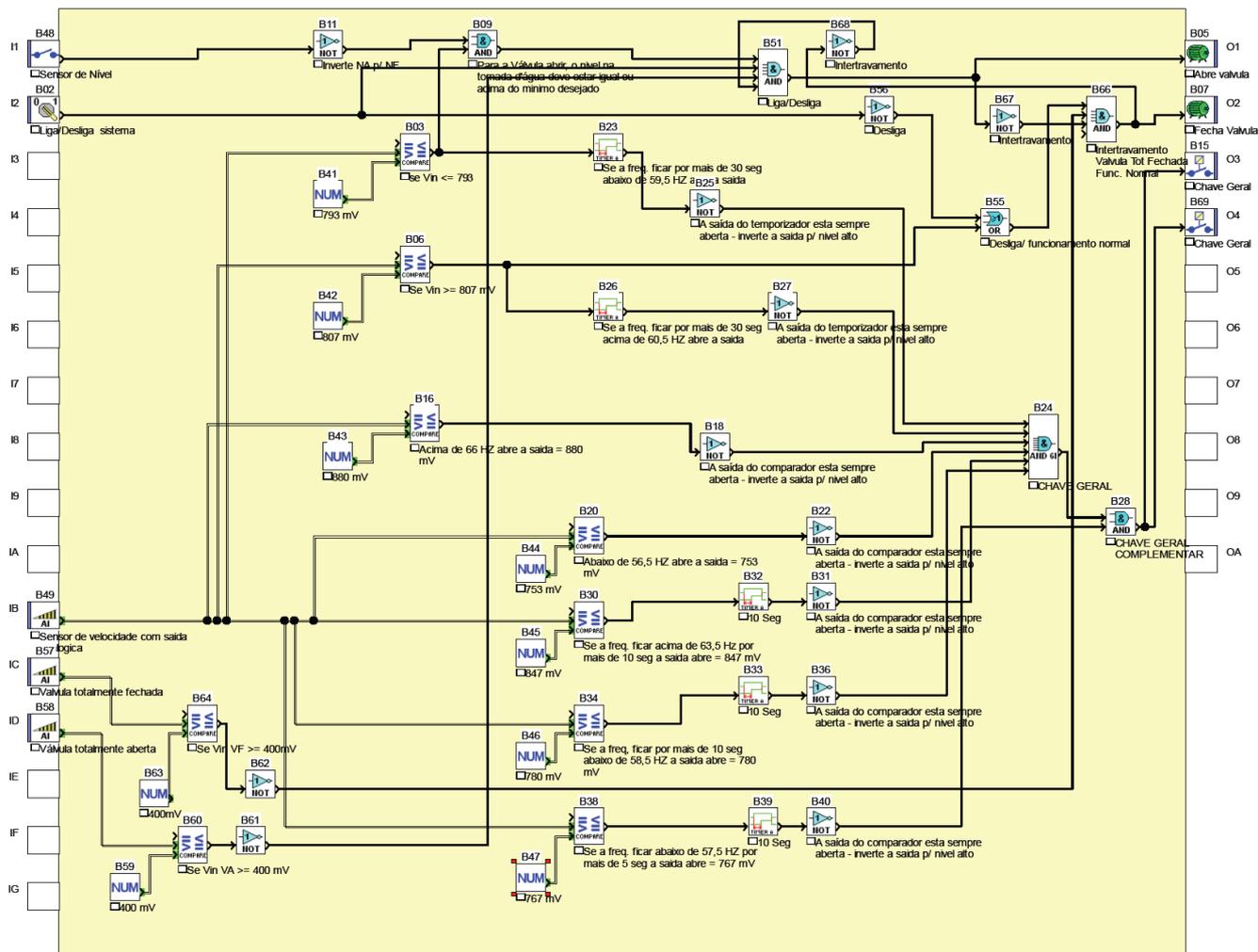


Figura 3 - Lógica do programa.

O Controlador Lógico Programável da marca Crouzet, modelo XD26, de fabricação italiana, monitora o estado do processo através do nível de tensão do conversor e de acordo com a lógica estabelecida, conforme exibido na Fig. 3, atua no processo variando o fluxo d'água que passa pela turbina. A lógica foi construída através da Linguagem gráfica de programação FBD (Function Block Diagram), no software de programação do controlador lógico programável, e tem como parâmetros os valores de frequência e os períodos de operação nos respectivos níveis de frequência descritos nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2011).

O conjunto atuador, exibido na Fig. 4, é constituído por uma válvula do tipo gaveta de 50 mm de diâmetro, diretamente acoplada ao eixo de um motor de passo híbrido, unipolar, da fabricante Minebea, com torque de 32 kgf.cm juntamente com seu o módulo de controle programado para operar à 60 rpm.



Figura 4 - Conjunto atuador.

2.1 Funcionamento do Sistema de Controle

O sistema de controle foi desenvolvido para atuar diretamente sobre a vazão de água que passa pela turbina hidráulica, assim, conseqüentemente, agindo sobre a velocidade do eixo da turbina, que corresponde diretamente à frequência e tensão nos terminais do gerador. Considerando que esta turbina foi projetada para ser acoplada através de um conjunto de polias, com uma relação de 1:4, em um gerador elétrico de 4 polos, 1800 rpm, deve-se manter a velocidade do eixo da turbina entre 446,25 e 453,75 rpm, ou seja, entre 59,5 e 50,5 Hz. A velocidade do eixo da turbina é monitorada pelo Controlador Lógico Programável através do nível de tensão V_{out} nos terminais do conversor frequência/ tensão, e atua sobre o processo com os requisitos pré-estabelecidos exibidos na Tab. 1.

Como se pode notar na Tab. 1, para cada faixa de operação de frequência exibido na Tab. 2, há uma faixa de tensão V_{out} correspondente nos terminais do conversor frequência/ tensão.

Tabela 1 - Parâmetros do Sistema de controle.

Freq. [Hz]	Tensão V_{out} Conversor [V]	Velocidade do eixo da turbina [rpm]
56,5	7,53	423,75
57,5	7,67	431,25
58,5	7,80	438,75
59,5	7,93	446,25
60,0	8,00	450,00
60,5	8,07	453,75
63,5	8,47	476,25
66,0	8,80	495,00

Como se pode notar na Tab. 2, para o nível de frequência que esteja fora da faixa de operação estabelecida pelo PRODIST, ou seja, entre 59,5 Hz e 60,5 Hz, demanda-se a atuação do sistema de controle, abrindo ou fechando a válvula do conjunto atuador para respectivamente aumentar ou diminuir a vazão d'água e conseqüentemente variar a velocidade do eixo do gerador (ANEEL, 2011).

Tabela 2 - Ações do sistema de controle.

Freq. [Hz]	Ação desejada	
	Válvula de Controle	Contatos de saída (Gerador)
$f < 56,5$	Abre	Abrem
$56,5 \leq f < 57,5$	Abre	Abrem após 5 seg.
$57,5 \leq f < 58,5$	Abre	Abrem após 10seg.
$58,5 \leq f < 59,5$	Abre	Abrem após 30seg.
$59,5 \leq f \leq 60,5$	Mantém aberta	Mantém fechado
$60,5 < f \leq 63,5$	Fecha	Abrem após 30seg.
$63,5 < f \leq 66,0$	Fecha	Abrem após 10seg.
$66,0 < f$	Fecha	Abrem

Os períodos de tempo estabelecidos para correção do nível de frequência na Tab. 2, correspondem ao tempo máximo de operação do sistema com nível de frequência fora da faixa de operação, que também estão estabelecidos no PRODIST. Nota-se também, que a carga é desconectada dos terminais do gerador caso o nível de frequência fique fora da faixa de operação por tempo superior ao estipulado.

3 ELEMENTOS DA PLANTA MONTADA

Turbina . Nos testes em laboratório foi utilizada uma turbina de fluxo cruzado, também conhecida como Turbina Banki, de velocidade de operação de 450 rpm, para uma tubulação forçada de 50 mm de diâmetro, desenhada para uma altura de queda d'água de 20 m e com potencia no eixo de 0,2 kW.



Figura 5 - Turbina Tipo Banki.

Planta Montada. Na Fig. 6, é exibido o esquema da planta montada para experimentação em laboratório; deve-se ressaltar que em todas as provas a carga aplicada aos terminais do gerador é simulada por um sistema de freio, conhecido como Freio de Prony; isto foi feito visto que o sistema de controle de velocidade da turbina é independente, ou seja, o controle de tensão e velocidade pode ser feito de forma independente.

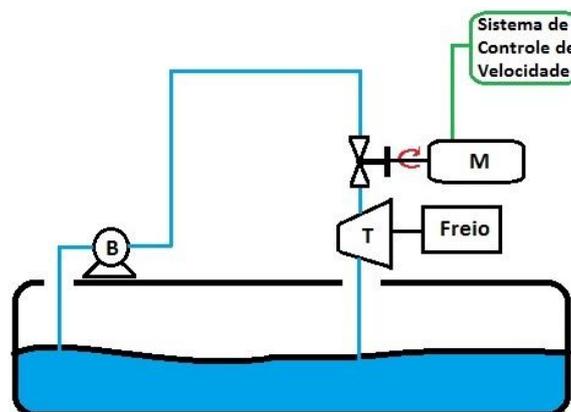


Figura 6 - Esquema da planta montada.

Os parâmetros a serem estimados nos ensaios são os seguintes: tempo de resposta do sistema e o percentual da carga máxima que o sistema suporta sem que a velocidade (frequência) fique abaixo dos níveis estabelecidos pelo PRODIST.

4 RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

A validação do sistema de controle aplicado a uma turbina Banki foi realizada em duas etapas; na primeira etapa foi aferido o conversor frequência/ tensão com o auxílio de um gerador de funções, um multímetro e um osciloscópio; o disco com 30 ranhuras foi acoplado ao eixo de um motor com velocidade controlada, logo após foi instalado o fotoacoplador e colocado o motor em funcionamento, variando a velocidade de 0 à 2000 rpm com espaçamentos de 100 rpm, desta forma, foi verificada a amplitude, forma de onda e frequência do sinal gerado. A forma de onda verificada, que foi uma onda quadrada com amplitude de 3,81 V, foi reproduzida em seus diversos níveis de frequência pelo gerador de funções e aplicada no conversor frequência/ tensão, assim, com o auxílio dos equipamentos de medição e através do potenciômetro instalado como resistor R1, conforme expõe a Fig. 2, foi calibrada a saída de tensão (V_{out}), sendo gerado o gráfico exibido na Fig. 7.

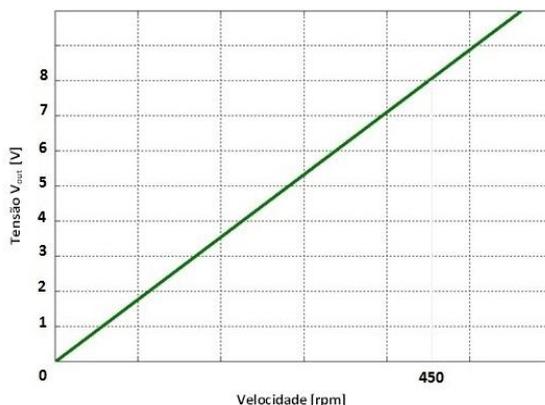


Figura 7 - Gráfico de relação entre Tensão V_{out} e velocidade do eixo da turbina.

A segunda etapa consistiu em validar o sistema de controle de forma integral, verificando o valor de carga máxima suportada pela turbina, comportamento do sistema em resposta a distúrbios e o percentual de carga suportada sem que o sistema ultrapasse os níveis de frequência estipulado pelo PRODIST. Para tanto, foi montado o esquema da planta exibido na Fig. 6. O valor de carga máxima suportada pela turbina foi obtido da seguinte forma: a planta montada foi reconfigurada de forma que o sistema de controle foi suprimido, ou seja, a válvula de controle foi mantida totalmente aberta, em seguida o sistema foi colocado em funcionamento, e após a velocidade do eixo da turbina entrar em regime permanente, ou seja, atingindo a velocidade máxima sem aplicação de carga, foi aplicado o freio ao eixo da turbina, conhecido como Freio de Prony, e foi verificada a força de 560 gf para reduzir a velocidade ao valor mínimo aceitável, correspondente à 60 Hz, que é de 450 rpm conforme é exposto na Tab. 1.

Para análise do comportamento do sistema em resposta a distúrbios e verificação do percentual de carga suportada sem que o sistema ultrapasse os níveis de frequência estipulado pelo PRODIST, a planta foi montada de forma integral. Após aplicado vários percentuais da carga máxima suportada pela turbina, através do freio, foi verificado que o sistema exibido na Fig. 3 atuou de forma a suprir todos os parâmetros estabelecidos. Através destes testes, se obteve o percentual de carga máxima suportada pelo sistema sem que a carga fosse desconectada dos terminais do gerador, sendo este percentual de 9%, sendo que ocorreu a redução de velocidade da máquina primária ao limite inferior, de 423,75 rpm representando 56,5 Hz. Desta forma, o sistema atuou de forma a corrigir a frequência (velocidade da máquina primária), elevando esta grandeza até o valor desejado, contido entre 59,5 e 60,5 Hz ou velocidade contida entre 446,25 e 453,75 rpm, num período inferior a 10 segundos, ou seja, como pode-se verificar na Fig. 8, ao aplicar a carga ocorreu um afundamento da velocidade do eixo da turbina, correndo assim, um afundamento de tensão da saída do conversor frequência/ tensão até o valor limite inferior de 7,53 V e devido a ação do sistema de controle, a velocidade foi elevada, de forma que 9,8 segundos após a ocorrência do distúrbio a velocidade ultrapassou o valor desejado, sendo após 1 segundo corrigida até valor desejado de 8,07V, que corresponde ao limite superior da faixa de frequência desejada (60,5 Hz).

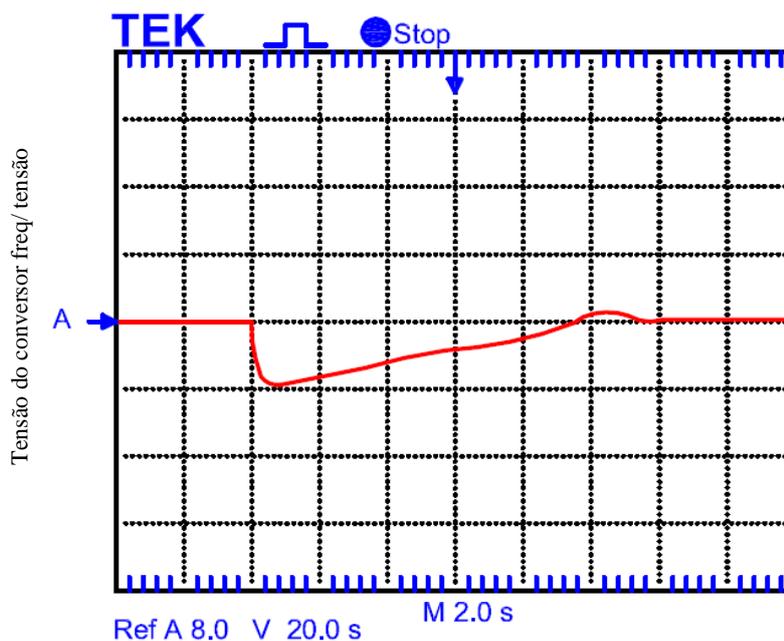


Figura 8 - Resposta do sistema de controle de velocidade com 9% de carga - Tensão do conversor Freq/tensão x tempo.

Ressalta-se que o índice "A", como se pode verificar na Fig. 8, indica a referência do sistema, que é de 8 V, referente a velocidade do eixo da turbina de 450 rpm ou 60 Hz. Ressalta-se também, que o motor de passo do conjunto atuador operou com velocidade de 60 rpm, grandeza esta que influencia diretamente na resposta do sistema de controle. Com a variação desta velocidade, o percentual de carga suportada pelo sistema num único passo foi reduzido, com o aumento de 10 rpm, ou seja, com velocidade de 70 rpm, o percentual de carga foi reduzido para 7,5%. Com a redução da velocidade do motor para 50 rpm, a carga suportada sofreu maior redução, sendo apenas 6%.

Conforme Gonçalves 2010, um grupo gerador diesel, de mesma potência do sistema utilizado neste estudo, com controle de velocidade automatizado através de um sistema similar, composto por Controlador Lógico Programável para monitoramento e atuador acionado por um motor de passo, utilizando também, os mesmos parâmetros de frequência, suporta 12% de carga por passo sem ultrapassar os limites estabelecidos. Desta forma, o sistema mostrado neste estudo suporta 25% menos carga por passo em comparação a um sistema composto por gerador diesel.

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado possui aplicação direta em sistemas de controle de velocidade em Micro Centrais Hidrelétricas, mais especificamente, em turbinas de fluxo cruzado, também conhecidas como turbinas do tipo Banki. A seguir são apresentadas as principais conclusões do sistema. O conversor de frequência/ tensão com o CI LM2907 se mostrou uma boa alternativa como transdutor, pois apresenta uma tensão de saída diretamente proporcional à frequência de entrada. Durante os ensaios foi possível comprovar a eficácia do sistema de controle desenvolvido através do gráfico de resposta do sistema a uma perturbação (Fig. 8). Com a planta montada foi possível também, verificar o percentual aceitável de carga aplicada em um único passo, que foi de 9% com intervalo mínimo de tempo entre a inserção de novas cargas de 10 segundos. Período este, que corresponde ao tempo de recuperação do sistema, pois devido a atuação do sistema de controle, o nível de frequência é elevado até a faixa contida entre 57,5 e 58,5 Hz num período inferior a 5 segundos e em ação contínua do sistema, o nível de frequência é elevado até a faixa contida entre 56,5 e 57,5 Hz em período inferior a 5 segundos, totalizando assim, um período máximo de 10 segundos para aplicação de novas cargas. Desta forma, comprova-se que um sistema hidráulico apresenta um tempo de resposta inferior a um sistema composto por gerador diesel de mesma potência.

O sistema desenvolvido em sua forma integral satisfaz as necessidades relativas à qualidade da energia elétrica, abordando especificamente a qualidade do produto, e também, tornou claro as limitações de um micro sistema isolado de geração hidroelétrico quanto ao tempo de resposta do sistema a distúrbios, ou seja, a aplicação de carga. O sistema de controle proposto pode ser empregado em qualquer sistema de geração isolado com potência na faixa das Micro Centrais Hidrelétricas, alterando apenas o conjunto atuador.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Energias Renováveis da Universidade Luterana do Brasil - Campus Canoas/ RS que viabilizou a implementação do sistema e também, ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Católica de Pelotas/ RS.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2011). PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_4.pdf>. Acesso em: 29 abril 2012.
- Gonçalves, K. M., 2010. Análise Estudo e Implementação de um Grupo Gerador Diesel de Baixa Potência Automatizado, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Católica de Pelotas, Pelotas.
- National (2009). Catálogo Semicondutor LM 2907. Disponível em: <<http://datasheetcatalog.com/>>. Acesso em: 15 julho 2012.
- Negri, V. L. (2004), Capacitação Industrial para Construção de Sistemas Hidráulicos de Controladores de Turbinas e Modelagem para Automação de Pequenas Centrais Hidrelétricas, UFSC, Brasil.
- Pallás-Areny, R.; Webster, J. G. (1991). Sensors and Signal Conditioning. New York: John Wiley & Sons.
- Ribeiro, M. A. (2003), Válvulas de Controle e Segurança. 5ª ed. Salvador/ BA.
- Turchetti, V. A., (2007), Estudo de Encoder's Ópticos Baseados no Efeito Moiré e Projeto de um Kit de Encoder's Didático, UEC, Brasil.
- Vanfretti, L. (2005), Modelación y Simulación de la Máquina Síncrona y su Operación em Sistemas de Potencia, USAC, Guatemala.
- Vanfretti, L. (2007), Sistemas de Control de Excitación y Estabilizadores de Sistemas de Potencia RPI, USA

SPEED CONTROL APPLIED INTO A CROSS-FLOW HYDRAULIC TURBINE IN ISOLATED SYSTEM

Abstract. *The study shows the development and assembly of a automated system of speed control of closed loop, applied into a cross-flow turbine, Banki type, to operate as part of a Micro Hydro Plant (MHP), in small isolated systems. Once verified the operation parameters of the system, it was initiated the development of the controller program logic and the development of the speed transducer. With the purpose of validate the developed system, it was implemented a plant in laboratory, being applied the prototype of a feed-back control system in a turbine. The developed system satisfied all established criteria in the Procedures for Distribution of Electrical Energy in the National Electric System (PRODIST) Module 8, from the National Agency of Electrical Energy.*

Key words: Automated System, Speed Control, Isolated System