



GRUPO – 001

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH

**ESTUDO PARA APROVEITAMENTO DE POTENCIAIS REMANESCENTES EM PEQUENAS CENTRAIS
HIDRELÉTRICAS POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE GRUPOS DE BAIXO CUSTO – BFT (BOMBA
FUNCIONANDO COMO TURBINA)**

Igor Renan Braga dos Santos (*)
UNIFEI

Geraldo Lúcio Tiago Filho
UNIFEI

Oswaldo Honorato de Souza Júnior
UNIFEI

Bruna Tayla Cabral Vasconcellos
UNIFEI

Luiz Alberto Jorge Procopiak
COPEL

RESUMO

Este artigo propõe a implementação de Bombas Funcionando como Turbinas (BFT) e Geradores de Indução (GI) como alternativa de exploração do potencial remanescente em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH). Esta alternativa pode ser aplicada também nos casos de instalações de máquinas novas, complementação e/ou em substituição a unidades geradoras mais antigas de menor rendimento, ou mesmo máquinas cuja operação tenha sido limitada a condições parciais de funcionamento devido a fatores externos relacionados à afluência de vazão. Objetiva-se também avaliar os gargalos e os problemas inerentes à esta implementação, propondo soluções que visem a manutenção dos padrões pré-estabelecidos de geração para usinas hidrelétricas.

PALAVRAS-CHAVE

Bomba-funcionando-como-turbina, Aproveitamento de Potenciais Remanescentes, Centrais Hidrelétricas.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais países em potencial hidráulico do mundo. Em várias regiões do território nacional, por apresentarem topografia e um regime hidrológico favorável, possibilita-se o desenvolvimento dessa fonte energética, dos quais os pequenos potenciais de geração hidráulica desempenham um importante papel. As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) representam um montante considerável de energia ao sistema, sendo que de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (7), a geração prevista para o ano de 2024 é de 8 GW, representando cerca de 3,8% da matriz energética nacional.

Atualmente, o Brasil conta com um grande número de centrais hidrelétricas, em especial PCHs e CGHs, construídas há mais de 30 anos, que dispõem de potenciais remanescentes para o incremento de sua geração. Além disso, mudanças nas condições hidrológicas ao longo dos últimos anos pode ter ocasionado alterações na vazão de operação dessas centrais, fazendo com que suas máquinas passassem a funcionar fora do ponto de projeto. Isso implica em perdas de eficiência e aumento no custo de manutenção em decorrência de problemas mecânicos e elétricos que podem surgir dessa condição de operação, a exemplo, o fenômeno de cavitação e de vibração. Acrescenta-se outra situação importante nesse contexto, relacionado ao fornecimento de outorgas de uso da água à montante de centrais existentes. Em ambas as situações apresentadas, tanto para máquinas fora do ponto de projeto bem como para alterações na afluência da vazão, a utilização de BFT pode ser uma solução tecnologicamente bastante interessante, uma vez que os custos envolvidos num processo de substituição ou repotenciação de turbinas, dependendo da central hidrelétrica, pode ser proibitivo. Com isso, a utilização de um grupo gerador de menor custo como a BFT e GI poderiam viabilizar estes processos.

O princípio de funcionamento de uma BFT está na operação em reverso de uma bomba, isto é, o fluxo passa pelo rotor em sentido contrário a operação normal da bomba. Analisando-se os aspectos construtivos e hidráulicos de bombas e turbinas, percebe-se que estes equipamentos são bastante semelhantes, desempenhando, porém, processos opostos. Bombas são máquinas geratrizes, ou seja, convertem a energia mecânica, fornecida pelo motor, primeiramente em energia cinética e, finalmente, em energia de pressão. Já uma turbina realiza o processo

oposto, convertendo a energia hidráulica disponível em potência de eixo, sendo então considerada uma máquina motriz. (Figura 1)

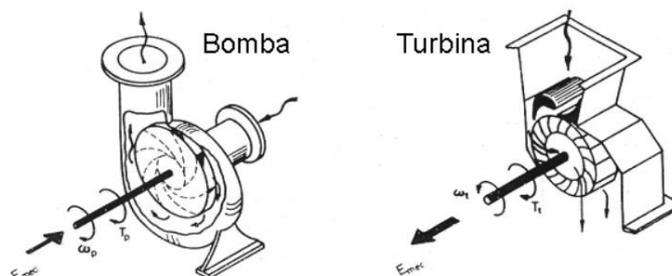


FIGURA 1 – Analogia entre bombas e turbinas.
Fonte: (5)

Além do mais, as bombas, diferentemente das turbinas hidráulicas, por serem produzidas em escala industrial, apresentam um custo de aquisição significativamente menor ao de turbinas. O custo de manutenção também de tais equipamentos é relativamente menor, havendo uma maior facilidade de obtenção de peças de reposição no mercado.

O emprego de BFT e GI como solução simples de baixo custo para geração de energia elétrica em aproveitamento de baixa potência já é conhecida em países como a Alemanha, França e os EUA. No Brasil, os primeiros trabalhos no tema foram desenvolvidos por (15), havendo a aplicação prática de BFT para a geração em sistemas isolados, tal como o caso da Fazenda Boa Esperança/MG e Ilha Anchieta/SP. No entanto, com a consolidação da metodologia e dos parâmetros de seleção das bombas e motores, esta alternativa tecnológica começou a ganhar espaço em outros tipos de aplicação, além do sistema isolado, como por exemplo, a microgeração distribuída. Entretanto essa técnica ainda é pouco explorada no formato que está sendo proposto neste artigo, como sendo uma alternativa de substituição de uma turbina hidráulica e do gerador nas situações operacionais já explicitadas anteriormente, havendo necessidade de estudos mais aprofundados. O desafio é buscar soluções para a regulação de velocidade e controle da máquina, tão seguros quanto em uma turbina hidráulica, que permitam ao operador manter os padrões pré-estabelecidos de geração das usinas hidrelétricas.

2.0 - JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A grande disponibilidade de potenciais hidroenergéticos no Brasil fez com que, historicamente, esta fonte se desenvolvesse mais rápida e intensamente quando comparada a outras fontes de energia. Apesar de que nos últimos anos tem se verificado um aumento na participação das usinas termoeletricas, porém, a matriz elétrica brasileira é composta em sua maioria por fontes hidroelétricas. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (6), a fonte hidrelétrica correspondeu a 75,5% da geração de energia elétrica para o ano base de 2015. Entretanto, a vulnerabilidade do setor energético frente a uma crise hídrica, tal qual a vivenciada na última década no Brasil, faz com que a importância do melhor aproveitamento de suas fontes energéticas, em especial as de origem hidráulica, venha novamente a se tornar prioridade nos próximos anos.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem revisado as regras para sistemas de geração de pequeno porte a partir de fontes renováveis. As revisões tiveram como objetivo ampliar a participação destas fontes na matriz energética, bem como definir as regras para acesso ao sistema de distribuição. Assim a Resolução Normativa nº 482/2012, posteriormente modificada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 trouxe novos horizontes para a implantação de pequenos potenciais de geração hidráulica, classificados como microgeração para centrais com potência instalada de até 75 kW e como minigeração para potência instalada de 75 kW a 3 MW. Logo, os pequenos aproveitamentos hídricos, inclusive as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), agora para potências instaladas de 3MW a 30MW, voltaram a receber substancial atenção por parte dos órgãos federais.

Como já salientado, o Brasil apresenta uma considerável participação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) em sua matriz energética, no entanto, muitas dessas centrais operam com grupos geradores mais antigos ou fora de suas condições de projeto, em decorrência de condições adversas, tais como desgaste mecânico ou alterações das condições operacionais da usina. As BFTs e GIs podem ser uma solução para a substituição desses grupos geradores, sejam aplicadas na substituição dessas unidades geradoras mais antigas de menor rendimento, ou na substituição de máquinas cuja operação tenha sido limitada a condições parciais de funcionamento; bem como na complementação da geração, e no caso de instalação de máquinas novas.

Além do mais, os custos envolvidos num processo de substituição ou repotenciação de turbinas, dependendo da central hidrelétrica, podem ser proibitivos, a tal ponto que o incremento de geração advindos desta substituição por uma turbina, podem não ser suficientes para viabilizar o projeto. A alternativa em questão neste trabalho pode

viabilizar uma boa solução, visto que as bombas hidráulicas por serem produzidas em maior escala industrial e com relativa facilidade de obtenção de peças de reposição no mercado, apresentam um custo de aquisição e manutenção significativamente menor. Analogamente, a aplicação de geradores de indução assíncronos na geração de energia, ou simplesmente gerador de indução (GI), os quais operam com frequência variável pode ser uma alternativa de custo reduzido quando comparado aos geradores síncronos tradicionalmente utilizados. Os geradores assíncronos apresentam como vantagens o custo reduzido e a simplicidade de sincronismo ao sistema interligado. Além do mais, estes já vêm sendo amplamente empregados em sistemas eólicos, e sua aplicação em centrais hidrelétricas pode trazer vantagens econômicas e operacionais, especialmente em sistemas de micro e minigeração.

Trata-se, portanto, de uma alternativa de baixo custo, tanto para a substituição de novas instalações de turbinas hidráulicas, bem como para o processo de aproveitamento de potencial remanescente, visando agregar mais potência instalada a central, bem como um ganho de eficiência na geração.

3.0 - DESAFIOS E APLICAÇÃO EM POTENCIAIS REMANESCENTES DE USINAS

O artigo em questão visa levantar os desafios e benefícios para consolidação da aplicação de Bombas Funcionando como Turbinas (BFT) em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), na qual será avaliada a possibilidade de utilização de grupo gerador de menor custo denominado Bombas Funcionando como Turbinas (BFT) e Geradores de Indução (GI). A literatura científica traz, nos seus últimos anos, diversos avanços em relação à utilização das bombas funcionando como turbinas, tais como: a melhoria da eficiência da operação da BFT, como apresentado por (12), (14) e (16); previsões da curva de desempenho, a qual a maioria das vezes não é fornecida pelo fabricante, como estudado por (4) e (17); possíveis adaptações na BFT buscando sua otimização, como (3), (8) e (9) apresentaram; e das inúmeras adaptações realizadas em BFTs e dos diversos controladores e geradores que são implementados em diferentes países do mundo, abordados por (10) e (11). No entanto, não há ainda a utilização da BFT no aproveitamento de potenciais remanescentes de usinas, bem como à sua adaptação no sistema interligado, sendo estes um diferencial apresentado em relação à pesquisa realizada pelos referidos autores.

Em relação às publicações em referência, estas foram avaliadas e seus principais aspectos são relatados a seguir: (12), (14) e (16) desenvolveram importantes estudos sobre técnicas para a melhoria da eficiência de uma BFT. Estes trabalhos são relevantes na constituição da base científica do tema em questão neste artigo, permitindo avaliações mais minuciosas sobre as técnicas utilizadas para otimização, a qual é de interesse na alternativa proposta. No entanto, o que é proposto no artigo se difere dos estudos supramencionados quando se considera que estas avaliações são para casos particulares, não sendo estendidas para toda a vasta gama de bombas, portanto, será necessária o levantamento dos critérios técnicos e das condições encontradas para realizar este tipo de avaliação. Além do mais, visa-se também com esta proposta, a otimização voltada para a adaptação da BFT no sistema interligado, sendo este fator uma inovação. Os principais aspectos avaliados nestes estudos são: (14) que estudaram os efeitos do arredondamento das pás do rotor de uma BFT apresentaram relevante avaliação sobre melhorias no desempenho de uma BFT, indicando um impacto positivo na eficiência global em diferentes pontos de operação com uma melhoria entre 1 e 3%. (16), no trabalho sobre os efeitos da geometria do rotor no desempenho de uma BFT do tipo centrífuga e de um único estágio, realizaram importantes investigações sobre quatro parâmetros geométricos (diâmetro do rotor, ângulo da pá, largura de entrada do rotor e ângulo de entrada da pá) e exploraram os motivos para a variação nas curvas de desempenho da BFT após modificações geométricas no rotor; e (12), em seus estudos sobre a instalação de palhetas guias fixas em uma BFT do tipo centrífuga, garantindo melhorias para BFT com rotor de 200mm de diâmetro e 8 palhetas guias fixas em um ângulo de 75°.

Quanto a previsão da curva de desempenho da BFT, (17), no estudos sobre a relação entre o desempenho de uma bomba e dessa funcionando como turbina, permite uma importante avaliação sobre métodos mais precisos de previsão de desempenho de BFT, visto que muitos fabricantes não fornecem esta curva de desempenho para uma BFT. Ainda na mesma linha de raciocínio, (4) comprovou a obtenção dessa curva de desempenho assim como das características de uma bomba comercial funcionando como turbina.

(9), em seu trabalho de otimização dos parâmetros geométricos e operacionais de uma bomba centrífuga funcionando como turbina, realizou importantes avaliações quanto a operação de uma BFT sobre cargas parciais e reforçou a melhoria no desempenho quanto ao arredondamento das pás do rotor. No entanto, a alternativa proposta neste artigo se diferencia quanto ao estudo do motor de indução funcionando como gerador, e, ao melhor controle do fluxo de entrada aliado a condições parciais de vazão, fatores os quais não foram avaliados pelo referido estudo.

(3) e (8), em seus respectivos trabalhos, apresentam estudos e testes sobre o design (adaptações na geometria do rotor ou na caixa espiral) e o desempenho de BFTs adequadas para PCHs ou CGHs. O primeiro comprovou através de simulação em CFD e de uma bancada de ensaios que uma bomba axial pode trabalhar como turbina perfeitamente em CGHs de baixa queda. O segundo realizou adaptações em um rotor de bomba comercialmente disponível, e verificou-se que a eficiência máxima da unidade adaptada é de 79%. No artigo em questão, visa-se a mesma linha de raciocínio, no entanto, não se trata de usinas em sistemas isolados como campo de aplicação, como foi abordado pelos autores.

(10) e (11), em seus referidos trabalhos, permitem uma avaliação das diversas adaptações realizadas em BFTs e dos diversos controladores e geradores que são implementados em diferentes países do mundo. No presente artigo, visa-se a utilização da BFT no aproveitamento de potenciais remanescentes de usinas, e, portanto, à sua adaptação no sistema interligado de energia elétrica.

Embora existam várias pesquisas da utilização de BFT como alternativa de geração, não há estudos específicos no tocante a esse tipo de aplicação em substituição a uma unidade geradora convencional em uma central hidrelétrica. Isto porque os níveis de exigência na qualidade de geração e controle são distintos.

A viabilidade econômica de um empreendimento hidrelétrico, seja para implantação ou repotenciação, é um dos principais fatores que ditam a realização de ações que visam à utilização ótima do recurso hídrico. Uma das formas de otimizar a geração de energia elétrica é torná-la mais viável economicamente através da redução de custos para sua produção. Um dos principais custos associados a centrais hidrelétricas, em especial as pequenas centrais com potências inferiores a 30 MW, está relacionado à aquisição de seus grupos geradores. Dessa forma, uma das maneiras de tornar um empreendimento desta natureza mais atrativo é por meio da utilização de equipamentos de menor custo. Esse fato converge com a utilização de grupos geradores do tipo Bomba Funcionando como Turbina (BFT), já empregados em geração isolada, os quais podem se apresentar como alternativa para viabilizar investimentos em repotenciação de PCH's e CGH's conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Em alguns casos, a simples inversão de funcionamento da máquina, trabalhando com vazão plena, já resulta em potências economicamente interessantes e que viabilizam o investimento. No entanto, em alguns casos, caso se objetive melhores rendimentos e condições de funcionamento da máquina, exige-se que mudanças sejam realizadas no rotor e na caixa espiral da bomba. Como demonstrado na literatura científica, esse processo pode ser aprimorado por meio da utilização de modelagem computacional, tais como o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), e posteriormente, validação dos resultados em modelo e bancada de ensaios em laboratório de comprovada idoneidade e capacidade técnica. (Figura 2)

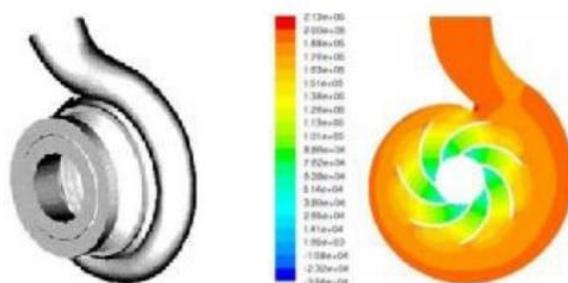


FIGURA 2 – Modelo computacional de uma bomba centrífuga funcionando como bomba.
Fonte: (13)

Realizada esta avaliação hidromecânica, estuda-se as adequações necessárias da parte elétrica para o motor funcionar como gerador sincronizado ao Sistema Interligado, considerando inclusive a utilização de geradores síncronos como uma alternativa.

A utilização de geradores de indução na geração de energia tem crescido nos últimos anos, principalmente com a expansão dos geradores eólicos, os quais operam com carga variável. Comparado ao gerador síncrono tradicionalmente utilizado, o gerador assíncrono apresenta como vantagens o custo reduzido e a simplicidade de sincronismo ao sistema interligado. No entanto, o controle de tensão e frequência devem ser analisados, visto que o gerador de indução é mais susceptível a variações de carga. Com isso, sua aplicação em sistemas de geração hidráulica deve ser melhor analisada, buscando definir as especificidades desta aplicação e visando sua viabilidade técnica e econômica.

Salienta-se que, para atingir o objetivo proposto, é importante a realização de uma minuciosa pré-seleção das centrais com potencial de utilização da tecnologia BFT e GI, identificando-se aquelas usinas hidrelétricas com melhor perfil e possibilidades para este tipo de aplicação, visto que a utilização ótima de um potencial hidroelétrico deve levar em consideração diferentes aspectos tais como a quantidade de energia gerada pela central, os impactos socioambientais e o custo do investimento necessário.

4.0 - BENEFÍCIOS ESPERADOS

Verifica-se, pela pesquisa de anterioridade, bem como nos trabalhos publicados nas referências nacionais e internacionais, a inexistência de trabalhos cujo objetivo é a utilização da tecnologia Bombas Funcionando como Turbinas (BFT) para aproveitamento de potenciais remanescentes em PCH's ou CGH's. Portanto, primeiramente,

espera-se que o presente artigo contribua para o estado da arte na área de geração de energia elétrica, apresentando uma nova alternativa para aproveitamento de potências remanescentes em usinas, tendo em vista que não se tem um entendimento ainda bem definido sobre o tema no âmbito internacional.

O estudo de alternativas de geração de energia hidrelétrica a baixo custo é de suma importância dado o cenário atual do país. A decisão pela repotenciação ou não de uma central é uma decisão na qual a questão econômica é primordial, devendo ser avaliado o momento ideal para a realização desse processo em vista das variações na garantia física e, conseqüentemente, da receita produzida pela usina. Uma das formas de se viabilizar economicamente a repotenciação, ou até mesmo a implantação, é através da redução de custos nesse processo, em especial na utilização de grupos geradores mais baratos.

As crescentes pressões socioambientais dificultam o licenciamento e a construção de novas usinas hidrelétricas mesmo de pequeno porte, de modo que, o ganho de geração decorrente da repotenciação ou aproveitamento do potencial remanescente de centrais já existentes se tornam a cada dia mais atrativos. Com isso, espera-se que a utilização do grupo gerador denominado Bomba Funcionando como Turbinas (BFT) e Geradores de Indução (GI) facilite a viabilização destes projetos hidrelétricos já que esta tecnologia é significativamente mais econômica que um grupo gerador convencional. Além do mais, com a adequação e otimização da BFT e GI, principalmente na parte elétrica, para o funcionamento em usinas atreladas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), permitirá novos estudos de viabilidade econômicas e o levantamento de potenciais remanescentes em uma série de centrais, de modo a refletir em um ganho de potência no quadro energético nacional.

Esta alternativa tecnológica apresentada se portanto, como uma opção para postergação de investimentos em repotenciação de turbinas hidráulicas, ou mesmo como complemento à potência instalada da usina hidrelétrica.

5.0 - CONCLUSÃO

A aplicação e benefícios da BFT já estão mais consolidados em sistemas isolados, de modo a proporcionarem uma solução prática e de baixo custo. Entretanto, ao se tratar de usinas pertencentes ao sistema interligado, o uso de BFT ainda precisa ser estudado. Este artigo buscou levantar os principais desafios encontrados para essa implementação no Sistema Interligado e, especialmente, quais seriam os benefícios logrados. Conclui-se que, quando se trata das adequações necessárias, tem-se que para o motor funcionar como gerador sincronizado ao Sistema Interligado o principal desafio reside na parte elétrica. Nas bombas funcionando como turbina os maiores galgos se encontram nas adaptações necessárias na geometria do rotor ou na caixa espiral e no sistema de recalque que funcionaria como sistema adutor. Finalmente, a boa vantagem econômica de se utilizar grupos geradores de baixo custo para aproveitamento de potenciais remanescentes e repotencialização de usinas hidrelétricas torna-se o principal motivador desta aplicação.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 481, 2012.
- (2) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 687, 2015.
- (3) BOZORGI, A. et al. Numerical and experimental study of using axial pump as turbine in Pico hydropower plants. *Renewable Energy*, v. 53, p. 258-264, 2013.
- (4) BUONO, Dario et al. Study of a Pump as Turbine for a Hydraulic Urban Network Using a Tridimensional CFD Modeling Methodology. *Energy Procedia*, v. 82, p. 201-208, 2015.
- (5) CHAPALLAZ J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; Manual on Pumps Used as Turbine; MHPG Series; v. 11; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany; 1992.
- (6) EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2016 – BEN 2016. Ano Base: 2015. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2015.
- (7) EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 – PDE 2024. Brasília: EPE/MME, 2015.
- (8) GIOSIO, D. R. et al. Design and performance evaluation of a pump-as-turbine micro-hydro test facility with incorporated inlet flow control. *Renewable Energy*, v. 78, p. 1-6, 2015.
- (9) JAIN, Sanjay V. et al. Effects of impeller diameter and rotational speed on performance of pump running in turbine mode. *Energy Conversion and Management*, v. 89, p. 808-824, 2015.

- (10) JAIN, Sanjay V.; PATEL, Rajesh N. Investigations on pump running in turbine mode: a review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 30, p. 841-868, 2014.
- (11) LAGHARI, J. A. et al. A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 20, p. 279-293, 2013.
- (12) PATEL, V. A. et al. Numerical optimization of guide vanes and reducer in pump running in turbine mode. *Procedia Engineering*, v. 51, p. 797-802, 2013.
- (13) PEDROSO, J. P. C. Estudo Econômico para a Repotenciação da Central Geradora Hidrelétrica Pitangui. 2014. Trabalho Final de Graduação (Engenharia Hídrica). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2014.
- (14) SINGH, Punit; NESTMANN, Franz. Internal hydraulic analysis of impeller rounding in centrifugal pumps as turbines. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 35, n. 1, p. 121-134, 2011.
- (15) VIANA, A. N. C.; TIAGO, F. G. L.; LEITE, F. Viabilidade das Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas para Microcentrais Hidreletricas. *Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico*, v. XI – N, p. 53 – 62, 1985.
- (16) YANG, Sun-Sheng; DERAKHSHAN, Shahram; KONG, Fan-Yu. Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. *Renewable Energy*, 2012, 48: 507-513.
- (17) YANG, Sun-Sheng, et al. Effects of impeller trimming influencing pump as turbine. *Computers & Fluids*, 2012, 67: 72-75.