



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/12
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE QUANTIDADE DE GRUPOS GERADORRES PARA
PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

**ABREU, T.M. (*)
UNIFEI/BRASIL PCH S.A**

**BORTONI, E.C
UNIFEI**

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia para determinação da quantidade de grupos geradores para concepção de Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs, utilizando como critérios de dimensionamento, a vazão mínima histórica, bem como a vazão inferior turbinável, além da realização de uma análise de custo *versus* benefício da melhor solução tecnicamente obtida entre três tipos de turbinas hidráulicas: Kaplan, Francis Simples e Francis Dupla. Adicionalmente, será considerada, para fins de cálculo da energia média, a utilização das vazões afluentes cujos valores situam-se abaixo da vazão inferior turbinável da máquina, chamada operação excepcional, por uma determinada quantidade de horas anuais.

PALAVRAS-CHAVE

Pequenas Centrais Hidrelétricas, Turbina Hidráulica, Grupos Geradores, Análise Econômica

1.0 - INTRODUÇÃO

Até meados da década de 80, as PCHs eram construídas prioritariamente com a finalidade de atendimento às comunidades isoladas ou então de suprir o consumo de pequenos produtores rurais e industriais, sendo na maioria das vezes, desenvolvidas de forma subdimensionada, para atendimento da demanda localizada.

A partir do início dos anos 90, o Governo Federal passou a incentivar o desenvolvimento de estudos para identificação de novos potenciais com até 30 MW de capacidade instalada, como por exemplo, a criação do Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia – PROINFA, o que permitiu a expansão da oferta de empreendimentos desse porte no país, propiciando o desenvolvimento da indústria nacional de equipamentos, como turbinas e geradores.

Porém, no atual cenário do Setor Elétrico Brasileiro, as pequenas centrais hidrelétricas vêm apresentando perda de competitividade perante outras fontes renováveis de energia, notadamente a energia eólica. Isto pode ser comprovado comparando-se o volume de energia negociado nos leilões realizados pelo Governo Federal no Ambiente de Contratação Regulada - ACR, uma vez que, a política de contratação de energia prioriza aqueles empreendimentos que negociam volumes pela menor tarifa, e com isso, acaba por desestimular a viabilização de novos projetos de PCHs, além do fato de que o preço-teto estipulado para os leilões, de acordo com agentes de mercado, não se mostra suficientemente atrativo para remunerar os investimentos.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende contribuir para com o desenvolvimento de metodologia para otimização da escolha do número de grupos geradores de pequenas centrais hidrelétricas, como ferramenta para melhor definição das estimativas de custos para implantação do empreendimento. Em um segundo momento, propõe-se, para o cálculo da energia média do empreendimento, a utilização das vazões abaixo da inferior

(*) Av. Prudente de Moraes, n° 1250 – 11º andar, Coração de Jesus, Belo Horizonte – CEP 30.380-252, Belo Horizonte, MG – Brasil Tel: (+55 31) 3527-9111 – Fax: (+55 31) 3527-9132 – Email: thiagoabreu@brasilpch.com.br

Nesta proposição, a metodologia em tela poderá ser aplicada a usinas de diferentes arranjos, porém com turbinas dos tipos Kaplan, Francis e Francis Dupla ou Gêmea.

2.0 - NÚMERO DE GRUPOS GERADORES COM CÁLCULO DE ENERGIA

Para início da elaboração da metodologia é necessário se considerar alguns dados de entrada, conforme abaixo:

- Queda bruta (Hb);
- Vazão de projeto (Qp);
- Altitude em relação ao nível do mar (z);
- Perda de carga (hs);
- Série histórica hidrológica.

2.1 Escolha da quantidade de grupos geradores

O primeiro passo para definição da quantidade de grupos geradores é definir Q , a partir da série histórica hidrológica, a vazão média de longo termo (MLT). Já no caso da vazão mínima histórica, será adotada a vazão de 95% da curva de permanência.

Posteriormente, para determinar a quantidade de grupos geradores, é necessário calcular alguns parâmetros da turbina hidráulica, tal como, a rotação específica (n_{gA}), sendo que para este, deverão ser respeitados os limites mínimo e máximos. Outro parâmetro importante importante a ser calculado é a altura de sucção (h_s), sendo que este influenciará diretamente no custo da central, uma vez que sendo um valor negativo, aumenta a necessidade de escavação da casa de força.

Posteriormente, define-se o percentual da vazão turbinada (f_i), sendo este, um processo iterativo para turbinas Francis, pois essa grandeza que define o número de grupos geradores, é dependente da rotação específica. Como a quantidade de grupos geradores pode alterar o f_i , este novo valor deve ser corrigido se estiver associado a um n_{gA} fora da faixa mínima e máxima.

Uma vez calculados os parâmetros descritos acima, parte-se para a escolha do tipo de turbina. Caso os dados de entrada ou, dependendo do caso, os parâmetros calculados, apontem para mais de uma solução, será realizada uma análise comparativa entre os parâmetros relacionados às turbinas dos tipos Kaplan, Francis e Francis Dupla. A figura 1 abaixo mostra as faixas de aplicação para turbinas em função da potência unitária, vazão nominal e queda bruta.

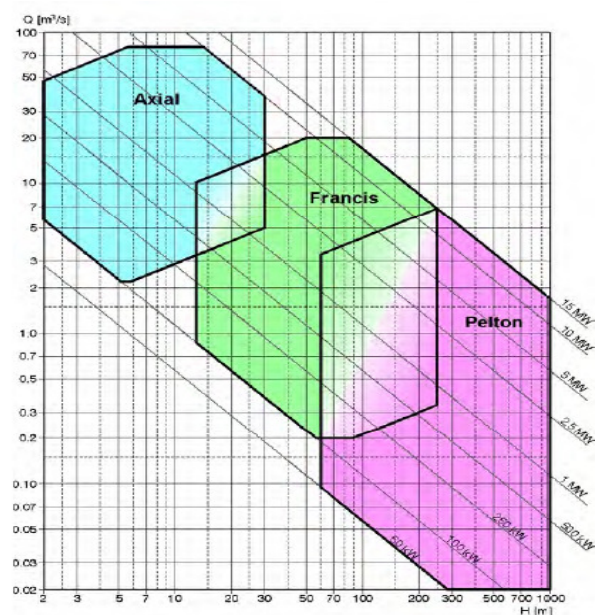


FIGURA 1 – Faixas de aplicação de turbinas hidráulicas

Fonte: Vatech-Hydro (1) (2008)

Em outras palavras, se os dados de projeto, no caso acima, vazão de projeto e queda bruta, apontarem para a intersecção entre as áreas azul e verde, deve-se realizar a análise energética e econômica para todas as opções de turbinas, objeto deste trabalho.

Dessa forma, a quantidade de grupos geradores é definida de acordo com Souza, Santos e Bortoni (2) (2009), respeitando-se a inequação a seguir:

$$NGG > fi \cdot \frac{Qp}{Q_{\min}}$$

Sendo:

NGG: número de grupos geradores

fi: percentual mínimo da vazão turbinada

Qp: vazão de projeto

Qmin: vazão mínima histórica

2.2 Calculo energético

Uma vez definido o fi de cada solução, parte-se para definir os parâmetros energéticos para cada percentil, conforme abaixo:

- Vazão afluyente (Qa)
- Vazão média (Qm)
- Vazão nominal (Qn)
- Vazão turbinada (Qt)
- Vazão média turbinada (Qmt)
- Número de grupos geradores (NGG)
- Rendimento (n)
- Potência (P)
- Energia média (Em)
- Fator de capacidade (FC)

Dentre as alternativas relacionadas a cada percentil, adota-se como escolha da melhor opção o chamado “percentil de corte”, sendo aquele correspondente à máxima potência com a maior energia produzida, não refletindo, necessariamente, o maior fator de capacidade.

2.3 Calculo energético com vazões abaixo da inferior

Neste trabalho, define-se a vazão inferior turbinada. Alguns fabricantes de turbinas hidráulicas permitem, por meio de cláusulas contratuais de garantia de *performance*, que a máquina trabalhe em condições operativas abaixo da inferior por um determinado período de tempo durante o ano.

Ao se considerar esse número de horas, desloca-se o ponto da vazão inferior na curva de permanência e com isso, parte das vazões ora vertidas, acabam sendo turbinadas, acarretando em aumento de energia produzida..

3.0 - FATORES QUE INFLUENCIAM NO CUSTO DA CENTRAL

O presente trabalho não irá abordar todos os custos de uma PCH, apenas aqueles que sofrem variação diretamente com a quantidade de grupos geradores. Como exemplo, pode-se citar o volume de escavação da casa de força que é influenciado pelas dimensões e quantidade de grupos geradores, bem como pela altura de sucção da turbina. Já para o caso da quantidade de condutos forçados, é adotado o limite de três unidades geradoras para um único conduto.

Dessa maneira, adota-se um custo fixo unitário para os demais componentes, como barragem, subestação, dentre outros e o custo final será a soma das duas parcelas.

3.1 Custo da turbina

Para determinar os custos da turbina foi realizada uma adaptação da metodologia utilizada pela EPE (3) (2012) para o cálculo do valor de reposição de empreendimentos de geração de energia elétrica, objetos da renovação das concessões de usinas hidrelétricas. Essa metodologia considera um banco de dados de projetos existentes (em diversas fases de concepção), sendo que para cada tipo de turbina, obtém-se a relação entre a potência ativa da pela raiz quadrada da rotação nominal $[MW/(rpm^{0,5})]$. Com isso, encontra-se uma curva com forte correlação entre esses dois parâmetros a partir desta, a respectiva equação.

3.2 Custo do gerador

Analogamente para a estimativa dos custos do gerador, foi utilizada também a metodologia empregada pela EPE (3) (2012). Porém, neste caso, a relação considerada é entre a potência aparente do gerador pela raiz quadrada da rotação nominal $[MVA/(rpm^{0,5})]$. Independente da opção escolhida para turbina, foram considerados os geradores de todos os tipos de turbinas.

3.3 Custo de escavação da casa de força

Para estimativa dos custos da casa de força é realizado considerando semelhança geométrica, com base nas equações dos diâmetros das turbinas. No caso das turbinas, são utilizadas as equações a seguir, de acordo com Souza, Santos e Bortoni (2) (2009):

- a) Diâmetro da Turbina Francis e Francis Dupla

$$D = 24,786 \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} + 0,685 \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{\frac{1}{4}}}$$

- b) Diâmetro da Turbina Kaplan

$$D = 71,348 \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} + 0,388 \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{\frac{1}{4}}}$$

Sendo:

D: Diâmetro

H: Queda bruta

n: Rotação nominal

Já para o gerador, são consideradas as seguintes equações abaixo, de acordo com Souza, Santos e Bortoni (2) (2009):

- c) Diâmetro do gerador

$$D = 74467 \cdot P_{Sn}^0 \cdot 185 \cdot n_n^{-0,61}$$

- a) Largura do gerador

$$L_c = 98,88 \cdot P_{Sn}^{0,371} \cdot n_n^{0,229}$$

Sendo:

D: diâmetro do gerador

P_{sn} : Potência aparente
 n_n : rotação nominal

Para estimativa da área da casa de força são considerados tanto as dimensões da turbina e do gerador (diâmetro e largura), espaçamento entre os equipamentos e a área de montagem civil.

Após a definição das dimensões acima apresentadas, são calculadas as larguras frontal e lateral da casa de força. O volume de escavação da casa de força é calculado pelo produto da área pela altura de sucção, conforme abaixo:

$$V_{CF} = (L_{LCF} \cdot L_{FCF}) \cdot h_{su}$$

Por fim, para definição do custo total, multiplica-se o volume pelo custo unitário de escavação, dependendo do material a ser escavado.

3.4 Custo do conduto forçado

Por fim, será calculado o peso do conduto para cada tranche. Utilizando-se dados de fabricantes, obtém-se a densidade do material, em função da espessura. Posteriormente, o peso de cada tranche é calculado em função do diâmetro, comprimento, além da própria densidade do material, conforme equação abaixo:

$$pcf = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot L \cdot \rho$$

Sendo:

Pcf = peso do conduto

ρ = densidade superficial

L = comprimento da tranche

D = diâmetro do conduto

O somatório dos pesos de cada tranche corresponde ao peso de cada conduto forçado, sendo que o peso total corresponde ao somatório da quantidade de condutos e para se obter o custo total, multiplica-se o peso pelo custo unitário do material.

4.0 - ESTUDO DE CASO

O presente caso considerará um projeto de uma PCH com as seguintes características:

Queda bruta (H_b): 71,0 m

Vazão de projeto (Q_p): 40 m³/s

Altitude em relação ao nível do mar (z): 500 m

Perda de carga (h_s): 5,6%

Média da série histórica de vazões (MLT): 26,54 m³/s

Vazão mínima histórica ($Q_{min} = Q_{95}$): 9,85 m³/s

Mediante características apresentadas, é factível analisar as três soluções de turbinas para o projeto.

4.1 Definição da quantidade de grupos geradores

Uma vez conhecida a MLT, calcula-se os parâmetros da turbina, como a rotação específica. Esse parâmetro necessariamente deve situar-se dentro das faixas mínima e máxima, descartando-se assim, as demais opções. Uma vez que neste trabalho adotou-se rotação da turbina igual a rotação do gerador, a definição desse parâmetro será baseado no número de polos do gerador.

O cálculo do fi é um processo iterativo, exceto para a turbina Kaplan que possui um valor fixo de 0,25. Nem sempre uma solução com maior aproveitamento energético é a mais rentável, pois pode apontar para uma altura de sucção que requeira volumes maiores de escavação e também para um gerador com poucos pares de polos, sendo que ambos acarretam em aumento do custo do empreendimento.

Neste trabalho foram encontradas os seguintes parâmetros, apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros calculados para as turbinas e geradores

Turbina	Kaplan	Francis Simples	Francis Dupla
NqA máximo	321,80	282,80	282,80
NqA	282,09	279,26	142,51
NqA mínimo	258,80	137,70	137,70
hsu (m)	-8,06	-8,42	3,69
fi (%)	0,25	0,74	0,57
Gerador			
n (rpm)	514,30	720,00	514,29
Pares de polo	7	5	7
NGG	2	4	3

4.2 Cálculo Energético

Com base na definição dos parâmetros calculados anteriormente, definem-se novos parâmetros abaixo para o percentil de 22% da curva de permanência, apresentados na Tabela 2 a seguir :

Tabela 2 – Cálculo energético

Parâmetro	Kaplan	Francis Simples	Francis Dupla
Q (m³/s)	40,46	40,46	40,46
Qm (m³/s)	22,52	22,52	22,52
Qp (m³/s)	40,00	40,00	40,00
Qn (m³/s)	20,00	10,00	13,33
P (MW)	22,01	22,01	22,01
Em (MW médio)	13,98	13,92	13,95
FC (%)	64%	63%	64%
n (rpm)	514,29	720,00	720,00
η (%)	93%	93%	93%

4.3 Cálculo energético com vazões abaixo da inferior

Aplicando a metodologia proposta no item 2.3, considerando que a turbina possa operar durante um período de 400 horas, ocorre um ganho nas vazões turbinadas e consequentemente da procura energética da PCH. Com isso, ocorre a diminuição da área situada entre as curvas de permanência de vazões e da vazão turbinada.

Abaixo, nas figuras 2, 3 e 4 são apresentados as curvas de motorização das soluções Kaplan, Francis Simples e Francis Dupla, respectivamente, comparando-se as vazões turbinadas até o limite da vazão inferior, bem como as horas de operação excepcionais:

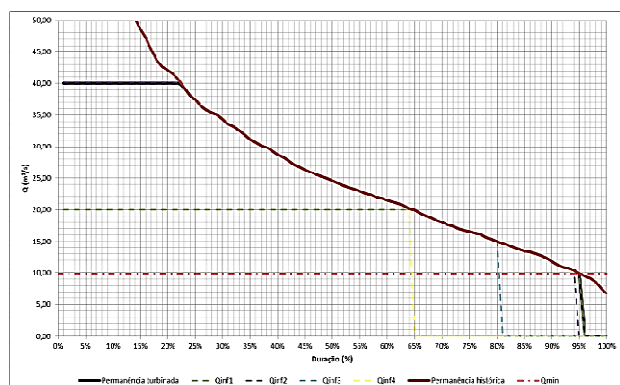


FIGURA 2a – Curva de motorização da turbina Kaplan

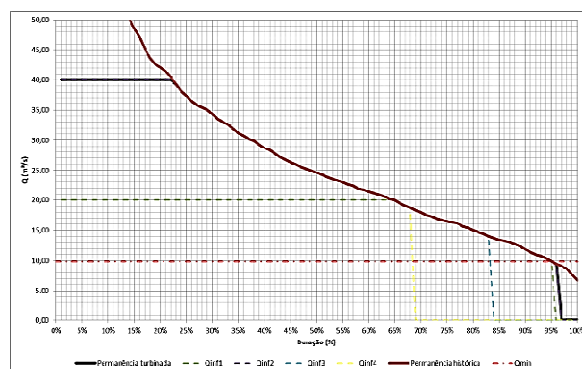


FIGURA 2b – Curva de motorização da turbina Kaplan com horas excepcionais

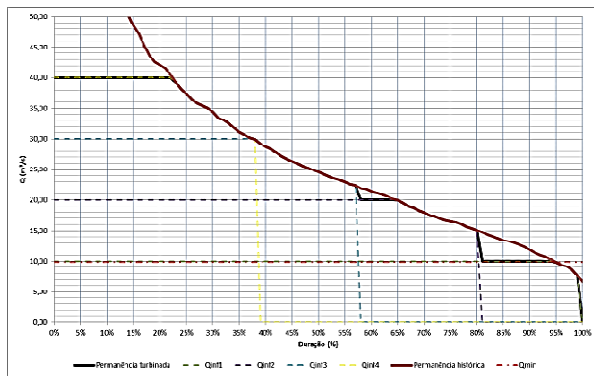


FIGURA 3a – Curva de motorização da turbina Francis Simples

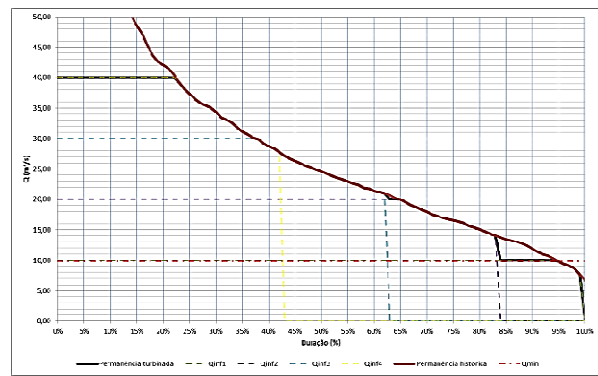


FIGURA 3b – Curva de motorização da turbina Francis Simples com horas excepcionais

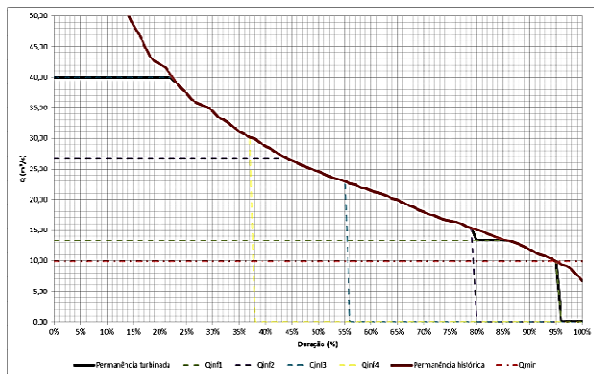


FIGURA 4a – Curva de motorização da turbina Kaplan

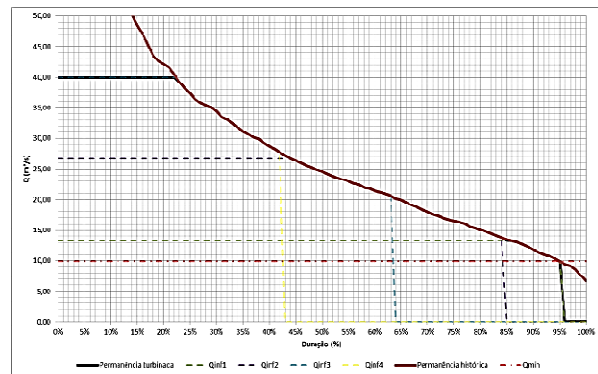


FIGURA 4b – Curva de motorização da turbina Kaplan com horas excepcionais

É possível notar que para os casos das turbinas Francis, há um “descolamento” entre a curva de permanência de vazões e a curva de vazões turbinadas. Isso ocorre devido à vazão afluente ser menor do que a vazão inferior de uma máquina, não havendo seu aproveitamento, ou então, após a completa motorização de uma máquina, a vazão turbinada incremental não é suficiente para atingir o mínimo operativo da próxima unidade geradora.

Portanto, nos casos em que o ϕ é superior a 0,5, que quando ocorre a motorização, parte da vazão afluente não é aproveitada, uma vez que os valores são menores do que a máquina pode turbinar, causando vertimentos e consequentemente, perda energética.

4.4 Análise econômica

Para definição do custo total da PCH considera-se além daqueles calculados para os parâmetros apresentados no item 3.0, ou seja aqueles influenciados pela quantidade de grupos geradores, também um custo unitário fixo de R\$ 3.000 mil /kW instalado para os demais componentes da central.

Dessa forma, são apresentados na tabela 3 a seguir os custos levantados para aqueles componentes variáveis, como também, bem como, na tabelas 4 e 5, os resultado da análise econômica para as três soluções, considerando os as vazões turbinadas nos casos apresentados no item anterior:

Tabela 3– Custos da central

Custo	Kaplan	Francis Simples	Francis Dupla
Turbina (R\$ mil)	9.735,05	7.024,00	7.024,00
Gerador (R\$ mil)	13.556,30	11.985,56	14.235,29
Consuto forçado (R\$ mil)	1.163,77	756,19	2.327,53
Fundação (R\$ mil)	20.071,66	9.800,05	5.346,94
Total variável (R\$ mil)	44.526,78	29.565,80	28.933,77
Unitário variável (R\$ mil/kW)	2.022,72	1.343,09	1.314,38
Unitário fixo (R\$ mil/kW)	3.000,00	3.000,00	3.000,00

Unitário total (R\$ mil/kW)	5.022,72	4.343,09	4.314,38
-----------------------------	----------	----------	----------

Tabela 4– Resultados (vazões turbinadas até a inferior)

Resultados	Kaplan	Francis Simples	Francis Dupla
Potência (MW)	22,01	22,01	22,01
Energia (MWmédio)	13,98	13,92	13,95
Fator de Capacidade	63,5%	63,3%	63,4%
Preço de venda (R\$/MWh)	150,00	150,00	150,00
Taxa Interna de Retorno (TIR)	12,29%	13,94%	14,04%

Tabela 5– Resultados (vazões turbinadas abaixo da inferior)

Resultados	Kaplan	Francis Simples	Francis Dupla
Potência (MW)	22,01	22,01	22,01
Energia (MWmédio)	14,08	14,04	13,98
Fator de Capacidade	64,0%	63,8%	63,5%
Preço de venda (R\$/MWh)	150,00	150,00	150,00
Taxa Interna de Retorno (TIR)	12,37%	14,04%	14,07%

5.0 - CONCLUSÃO

A perda de competitividade das pequenas centrais hidrelétricas perante outras fontes renováveis de energia, notadamente a energia eólica é percebida no Setor Elétrico Brasileiro comprando-se o histórico recente de expansão de cada fonte, bem como o volume de energia negociado nos leilões do ACR, pois o cenário atual não se mostra suficientemente atrativo para remunerar os investimentos.

Nesse sentido, este trabalho buscou apresentar uma metodologia de escolha de grupos de geradores aplicados aos tipos de turbinas Kaplan, Francis Simples e Francis Dupla, utilizando critérios de vazão mínima histórica e vazão inferior turbinada.

Uma vez encontrados os parâmetros e resultados para as três opções, foi realizada análise de custos, focada naqueles componentes que são influenciados diretamente pela quantidade de grupos geradores, sendo posteriormente, realizada análise técnico-econômica de cada solução.

No caso apresentado, embora haja uma maior produção energética utilizando duas turbinas Kaplan, por essa solução estar atrelada a uma altura de sucção negativa maior do que as demais torna o empreendimento menos competitivo perante as outras opções.

Não obstante, foi considerada na análise energética a geração excepcional durante 400 horas anuais no cálculo da energia média, o que comprova aumento tanto da produção energética e consequentemente, a receita de venda e taxa interna de retorno de todos os empreendimentos. Por fim, o que se propõe neste trabalho é que esse ganho energético seja reconhecido pelo poder concedente no cálculo da energia média do empreendimento.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Vatech-Hydro - Compact Hydro - The Optimum Solution up to 15MW, 2008.
- (2) SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. - Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento. 2ª Edição- Rio de Janeiro: Interciência, 2009
- (3) EPE – Empresa de Pesquisa Energética - Cálculo do Valor Novo de Reposição – VNR de Empreendimentos de Geração de Energia Elétrica, 2012.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- (1) THIAGO MODESTO DE ABREU é Engenheiro Hídrico, graduado pela Universidade Federal de Itajubá (2003), pós-graduado em Regulação e Negócios no Setor de Energia Elétrica pela Fundação Getúlio Vargas (2006) e cursando mestrado em Engenharia da Energia, com ênfase em Planejamento Energético, também pela UNIFEI. Atualmente é Gerente de Regulação na Brasil PCH S.A

(2) EDSON DA COSTA BORTONI é Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal de Itajubá (1990), mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos pela UNICAMP (1993), Doutor em Sistemas Elétricos de Potência pela USP (1998), Livre Docente na área de Planejamento Energético pela USP/EESC (2012). Foi coordenador do programa de mestrado em Engenharia da Energia da Unifei e Diretor da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético. Membro do CAA de Engenharia Elétrica do ENADE/INEP. Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia, pesquisador Sênior do EXGEN - Centro de Excelência em Eficiência Energética. Membro Sênior do IEEE (The Institute of Electrical and Electronic Engineers). Membro Fellow da ISA (International Society of Automation). Membro ativo de comitês do IEEE, ISA e CIGRÉ. Coordenador do comitê de Monitoramento de máquinas rotativas do CIGRÉ. Revisor de journals como Energy Policy, IEEE Trans. on Energy Conversion e IEEE Trans. on Power Systems. Consultor do Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (PNUD). Consultor de várias empresas nacionais e internacionais. Quatro livros publicados, nove capítulos em outros livros e mais de 200 artigos técnicos publicados em congressos e em periódicos nacionais e internacionais. Suas linhas de pesquisa se concentram principalmente nos seguintes temas: instrumentação, eficiência energética em sistemas motrizes, otimização de sistemas energéticos, estudos, projetos, testes e modelagens de máquinas elétricas e de sistemas de geração de energia.