



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/07

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**MAXIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS HIDRELÉTRICAS UTILIZANDO MÁQUINAS COM
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DISTINTAS**

André Makishi (*)
EPE

Thiago Correa César
EPE

Rafaela Veiga Pillar
EPE

RESUMO

A sazonalidade das vazões associada à utilização de usinas a fio d'água demandam maior flexibilidade operativa ao projeto das unidades geradoras, sendo em alguns casos conflitante à otimização de outras características relacionadas ao custo e desempenho.

A adoção de máquinas com comportamentos distintos em uma usina hidrelétrica pode proporcionar, além da versatilidade operacional, um melhor aproveitamento para as variadas condições de operação, utilizando projetos específicos para condições restritas e levando a melhores relações custo-benefício.

O presente trabalho propõe uma metodologia de cálculo para a expectativa de produção de energia da usina permitindo comparar alternativas durante fase de estudos de motorização.

PALAVRAS-CHAVE

Motorização, Otimização, Energia, Despacho, Hidrelétrica.

1.0 - INTRODUÇÃO

O problema de otimização envolvendo o despacho de unidades geradoras em usinas hidrelétricas tem motivado o desenvolvimento e aprimoramento de diferentes técnicas e procedimentos como apresentado em (1) e (2), sendo que os aspectos particulares relacionados a cada projeto bem como os diferentes objetivos tem direcionado as características do modelo e as premissas adotadas.

Para os estudos de motorização de usinas hidrelétricas a fio d'água no Brasil, que são realizados durante fase de estudos de viabilidade técnica e econômica, o emprego de unidades geradoras com características de desempenho distintas é poucas vezes considerado, no entanto, tal solução pode trazer benefícios significativos relacionados a flexibilidade operativa, redução do CAPEX e/ou aumento da produção de energia.

Porém, para quantificar adequadamente os ganhos energéticos torna-se necessária uma metodologia de cálculo de produção de energia sensível ao desempenho individual de cada unidade geradora bem como as suas limitações operativas, de forma não somente a permitir comparação entre alternativas, como também direcionar o projeto dos equipamentos para maximizar o desempenho em condições mais importantes de operação.

2.0 - DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo de cálculo elaborado utiliza as características individuais de cada unidade geradora, como o diagrama de colina da turbina, curva de rendimento do gerador, perdas mecânicas e limites operacionais de queda, vazão, potência e aberturas, representadas por pontos discretos. Além disso, são consideradas as vazões médias mensais de uso consuntivo, remanescente e de evaporação líquida, bem como as características do

aproveitamento como a curva-chave no canal de fuga, equação de perda de carga no circuito de geração e no canal de fuga e temperaturas médias mensais.

Para cada vazão afluente, é determinada a configuração operativa (número de máquinas e distribuição de vazão entre as unidades) que resulta na maior geração de energia, respeitando as restrições individuais de cada equipamento. Este modelo pode ser utilizado para usinas que operam com nível de água do reservatório constante, dotadas de máquinas de reação e com circuitos hidráulicos de geração independentes, possibilitando o emprego de até três tipos distintos de máquinas, com qualquer quantidade para cada tipo.

De forma resumida, o seguinte procedimento é realizado para cada vazão média mensal da série histórica:

- i. São descontadas da vazão afluente as parcelas correspondentes à evaporação líquida e aos usos consuntivos, para o mês correspondente. As vazões remanescentes para trechos de vazão reduzida são consideradas para a determinação do nível de água de jusante, mas são desprezadas para a geração de energia;
- ii. Os níveis d'água de jusante no canal de fuga e casa de força são determinados a partir da curva chave e perda de carga no canal de fuga;
- iii. São calculadas as quedas brutas a partir do nível de montante e nível d'água de jusante (junto a casa de força) determinado anteriormente;
- iv. São definidas as propriedades físicas locais como aceleração da gravidade, massa específica da água e pressão atmosférica (conforme IEC 60041:1991) segundo características locais do projeto;
- v. São geradas as possíveis combinações de quantidade de máquinas e distribuição de vazão entre as turbinas, calculando para cada combinação a perda de carga, queda líquida, rendimentos, potências e produção total de energia correspondente, eliminando soluções com características fora da faixa operacional permitida, permitindo assim encontrar a configuração ótima;
- vi. Devido a forte interdependência entre as características operativas, são realizados cálculos iterativos com resíduos aceitáveis pré-estabelecidos. O processo de (i) a (v) é realizado para todos os valores da série histórica.

Neste trabalho não foram considerados o consumo interno da usina bem como o rendimento dos transformadores, que embora possam influenciar a possível configuração como ótima do despacho, são negligenciados para manter compatibilidade com a metodologia de cálculo da garantia física de usinas despachadas centralizadamente (8).

Referente ao número de máquinas em operação, não se considerou os custos de partida e parada como aqueles indicados em (3), que poderiam influenciar a decisão pelo acionamento ou desligamento das máquinas e logo alterar a configuração ótima obtida pela metodologia. Não obstante, considerando a discretização mensal do modelo, e o objetivo a que se destina, entende-se que tal consideração pode ser desprezada.

A princípio não foram aplicadas para o cálculo energético, as taxas de indisponibilidade programada e forçada, no entanto, a análise dos resultados permite identificar qualitativamente quais máquinas e em quais períodos terão maior impacto na produção energética em casos de parada, devendo haver tratamento mais detalhado em trabalhos futuros.

Também conforme objetivo do trabalho, não foi considerada diferenciação de desempenho entre máquinas do mesmo tipo, ocasionadas por processos/tolerâncias de fabricação e montagem, além do desgaste desigual entre as máquinas ao longo de sua vida útil.

Por fim, ressalta-se que o modelo considera a operação individual da usina, calculando e maximizando a produção de energia a partir da série histórica de vazões estabelecida, porém não influenciando a operação de outras usinas do sistema, não considerando também os patamares de carga e a realização de serviços auxiliares.

As considerações de caráter sistêmico, como deplecionamento dos reservatórios, apesar de não estarem no escopo deste trabalho, podem ser consideradas via encadeamento deste modelo com outros que determinam o despacho ótimo de geração de cada usina. Neste tipo de aplicação, o modelo que representa todo o sistema forneceria ao despacho de unidades as vazões médias mensais turbináveis e os níveis do reservatório, como já feito em (9).

3.0 - REGIMES DE OPERAÇÃO

O estudo de motorização da usina deve selecionar a queda líquida de referência bem como a potência instalada da central e número de máquinas, de forma a obter a melhor relação entre o desempenho, o investimento e o cronograma de implantação.

Neste trabalho, direcionado a usinas a fio d'água, a sazonalidade de vazões é relacionada com a potência instalada da usina e a queda líquida de referência, definindo assim três regiões distintas de operação, como indica a Figura 1.

Na Região I, a vazão afluente é insuficiente para que a usina alcance sua potência instalada. Nesta região deseja-se um elevado rendimento das unidades geradoras, para alcançar a maior potência possível a partir da vazão disponível.

Devido a baixa geração e a eventual disponibilidade de unidades geradoras fora de operação, pode-se realizar as manutenções programadas dos equipamentos, com efeitos reduzidos nas taxas de indisponibilidade.

Na Região II, a usina possui capacidade de atingir sua potência instalada, devido às condições favoráveis de queda líquida e vazão. Ressalta-se que nesta região o rendimento passa a ser insignificante, uma vez que seu aumento será refletido em aumento da vazão vertida, devido à limitação da potência instalada da usina.

Na Região III, devido à elevação do nível de água no canal de fuga, as quedas líquidas operacionais são inferiores a queda de referência, e as máquinas não possuem capacidade de fornecer sua potência nominal, mesmo com grande vazão afluente disponível (regime de cheia), devendo ser buscada a maior potência possível, mesmo com baixos rendimentos, visando o aumento de geração. A diferença entre a potência produzida e a potência nominal representa o possível ganho com a redução da queda líquida de referência.

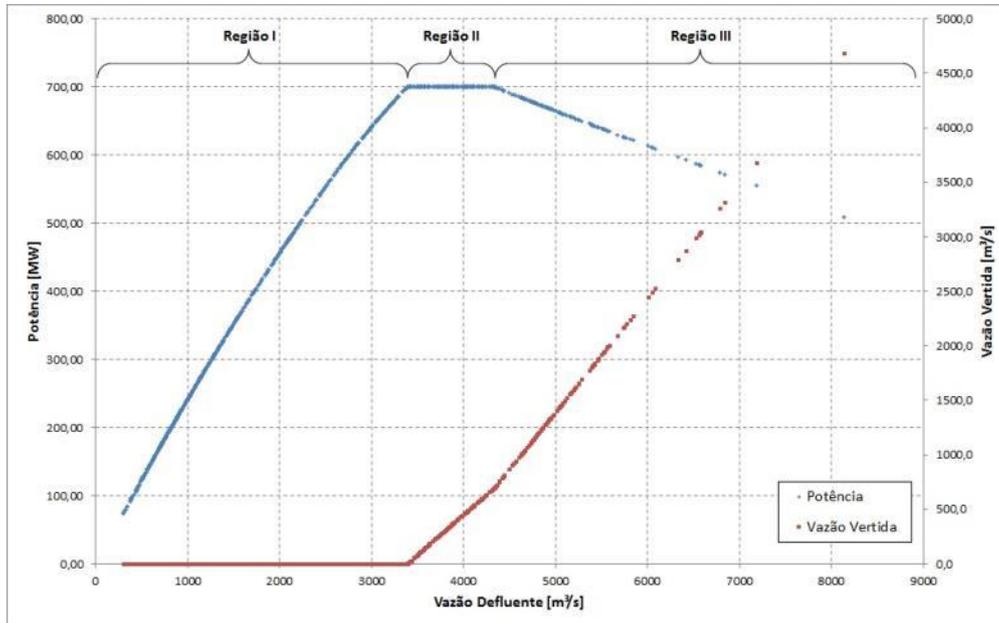


FIGURA 1 – Capacidade de produção de energia para a série histórica completa de vazões

Devido a grande afluência, e grande quantidade de máquinas em operação, busca-se, quando possível, evitar paradas nas regiões II e III, desde que seja possível tal previsibilidade.

Destaca-se que o “rendimento nominal” como muitas vezes utilizado, como em (5) e (6), passa a ter efeito e significado questionável, principalmente em casos onde o ponto nominal (condição específica de operação correspondente a potência nominal e queda líquida nominal) está associado à operação com vertimento, e/ou associado a uma condição de operação pouco frequente.

O cálculo do rendimento médio ponderado (RMP) da unidade geradora, como usualmente empregado em modelos de cálculo de energia que utilizam valor único e constante, atribui em sua metodologia maior peso para pontos de operação relacionados à maior geração (9). Ressalta-se aqui que os modelos que empregam valor único são utilizados para simulações que englobam todo o sistema elétrico, sendo que nestes casos, é importante que o valor de rendimento adotado seja mais fidedigna nos momentos em que a usina disponibiliza maior quantidade de energia, o que justifica a ponderação pela energia gerada.

Embora tal metodologia seja adequada para simulações do sistema elétrico, observa-se um efeito indesejado no sinal para o projeto das unidades geradoras em que o rendimento de pontos de operação no período de cheia (com vertimento) possui maior valor comparado a pontos de operação no período de seca. Este efeito evidencia a importância de que os modelos de simulação do sistema elétrico considerarem curvas de rendimento. Porém, uma solução de baixa complexidade e que elimina este efeito indesejado, é a distinção das três regiões como descrito acima sendo que: na Região I deve-se adotar um valor de rendimento representativo; na Região II não é necessário atribuir um rendimento; na Região III a representação de uma curva potência por queda.

Ressalta-se que a limitação de potência máxima para quedas inferiores a nominal, conforme equações pré-estabelecidas em modelos de cálculo, não levam em conta as características específicas de cada turbina, impedindo comparar de forma adequada as diferentes soluções de motorização e incentivar a busca por maiores capacidades de engolimento em baixas quedas.

Assim, a separação e alocação dos atributos desejáveis para cada região de operação possibilitam estudos de motorização mais aderentes às necessidades de operação da usina além de sinalizar de forma mais adequada as condições mais importantes de operação para o projeto da usina.

Para novos empreendimentos, deve ser considerado ainda o período de construção e cronograma do projeto, que pode influenciar de maneira significativa a escolha do número de máquinas e os limites operativos de cada uma delas visto que estarão sujeitas as condições de operação temporariamente diferenciadas.

4.0 - UNIDADES GERADORAS

Turbinas hidráulicas são equipamentos projetados e fabricados conforme características específicas de cada aproveitamento e tem desempenho fortemente influenciado por sua geometria e pelas condições operativas, havendo ainda diferentes tecnologias e formas construtivas, adotadas conforme experiência própria de cada fabricante.

Assim, os diferentes tipos, tamanhos, geometrias e tecnologias, associados às diferentes possibilidades de quantidade de máquinas, potência e quedas, além dos aspectos econômicos, construtivos e operacionais, fazem do estudo de motorização de usinas hidrelétricas um processo iterativo, multi-objetivo e com grande interdependência entre as diversas áreas de projeto.

Desta forma, embora não seja possível prever durante fases preliminares dos estudos todas as possibilidades e características das unidades geradoras que efetivamente serão instaladas e operadas, torna-se desejável a definição de parâmetros que indiquem quais as necessidades e condições mais importantes de operação da usina e permitam comparar alternativas durante fase de projeto e planejamento.

A partir de um diagrama de colina de referencia da turbina (4), foram verificadas características de desempenho favoráveis à maximização da produção de energia média da usina, tendo em vista a variação sazonal das condições operativas do aproveitamento analisado.

De forma a verificar os efeitos do diâmetro e rotação da turbina, a colina de referência foi representada pelos parâmetros adimensionais Q_{ED} e n_{ED} , sendo o acréscimo de rendimento devido aos diferentes números de Reynolds entre a referência e a turbina protótipo, chamado efeito escala ou “*step-up*”, determinado conforme norma internacional IEC 60193:1999 (10).

Os rendimentos utilizados no modelo consideram a definição de queda líquida conforme conceito estabelecido na IEC 60041:1991 (11) e devem incluir as parcelas de perdas correspondentes a vazão de fuga pelos labirintos (Francis). Para turbinas com dupla regulagem (Kaplan) os valores de rendimentos correspondem a lei de conjugação a ser implementada no regulador de velocidade.

Considera-se ainda que as turbinas utilizadas estejam implantadas em cota suficiente para evitar que os efeitos da cavitação depreciem o rendimento em qualquer condição operativa simulada e, além disso, não apresente qualquer restrição de tempo de operação dentro dos limites estabelecidos.

Por razões práticas as perdas mecânicas dissipadas nos mancais e vedação de eixo são consideradas constantes para todos os pontos de operação, embora exista influência do empuxo hidráulico sobre as perdas dissipadas no mancal de escora (turbinas verticais).

5.0 - RESULTADOS

Neste trabalho, o despacho ótimo é determinado pela configuração de maior produção de energia elétrica nos bornes dos geradores, sendo, portanto a configuração que representa o melhor rendimento global da usina.

O rendimento global leva em conta as perdas hidráulicas no circuito de geração, as perdas mecânicas dissipadas nos mancais e vedação de eixo, bem como as perdas refletidas nos rendimentos da turbina e do gerador, sendo definido como:

$$\eta_{global} = \frac{\sum_1^n P_{elétrica}}{\rho \cdot g \cdot H_{bruta} \cdot \sum_1^n Q} \quad (I)$$

Os estudos conduzidos referem-se especificamente a Região I definida anteriormente, por se tratar de análises relacionadas ao rendimento da usina.

A Figura 2 apresenta o resultado das simulações para diferentes quantidades de máquinas, considerando a mesma potencia instalada e queda líquida de referencia, onde são explicitados os ganhos de rendimento relacionados a cada uma das soluções para cada valor de vazão defluente. Pela mesma figura, é possível observar os pontos correspondentes à alteração da quantidade de máquinas em operação, seja devido à limitação de faixa operacional das unidades geradoras ou devido a maximização do rendimento global.

Uma quantidade menor de máquinas requer maior flexibilidade operativa, uma vez que cada turbina é operada em condições mais distantes do ponto ótimo, como indica a Figura 3. Por outro lado, a menor quantidade de máquinas leva a turbinas de maior diâmetro, aumentando o número de Reynolds e aumentando assim o efeito escala (“*step-up*”), resultando em maiores rendimentos para vazões próximas a vazão ótima.

Além da capacidade de modularização e seus efeitos no rendimento global, a quantidade de máquinas deve levar com conta possíveis riscos e limitações tecnológicas, capacidade fabril, capacidade de transporte até a obra, indisponibilidade forçada e programada, capacidade de operar com cargas parciais baixas, bem como os efeitos no CAPEX e cronograma de implantação.

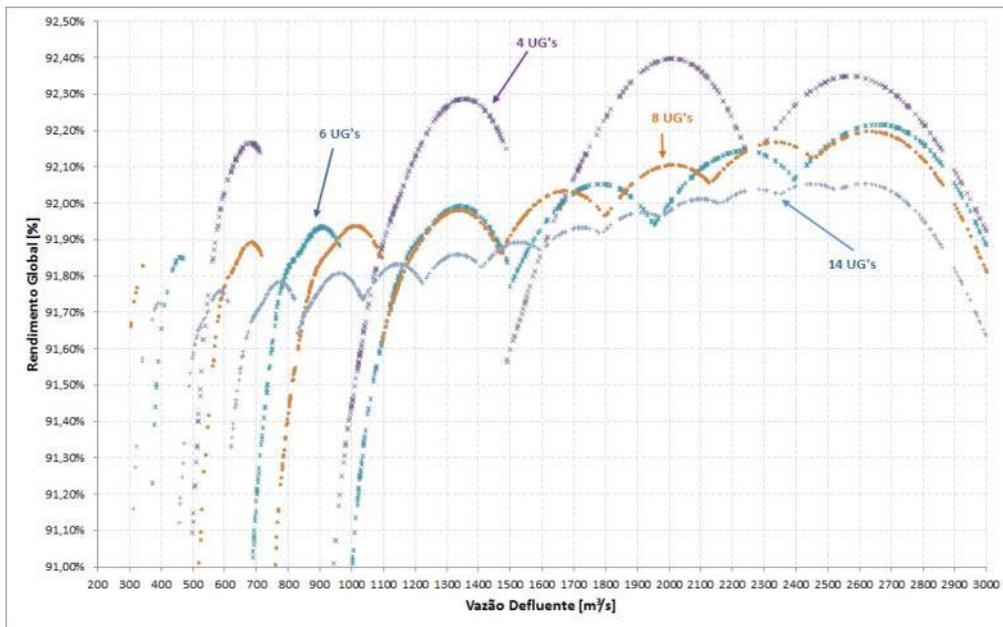


FIGURA 2 – Rendimento global para diferentes quantidades de máquinas

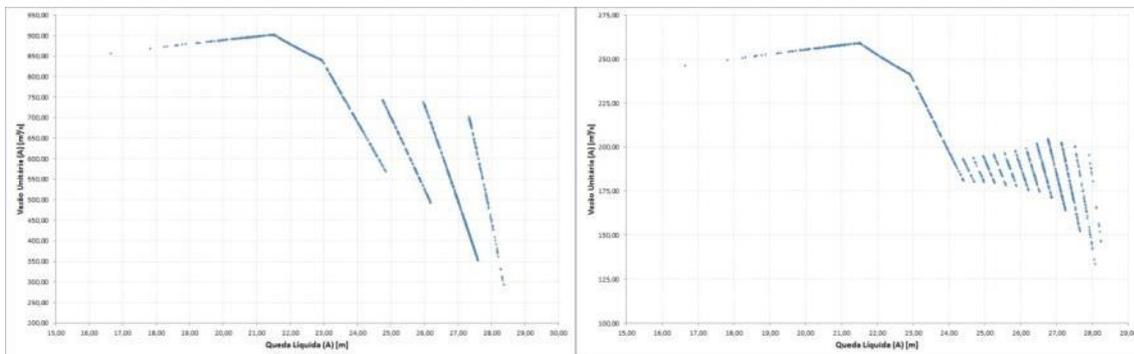


FIGURA 3 - Pontos de operação com 4 (esquerda) e 14 máquinas (direita)

Adicionalmente, fixada a quantidade de máquinas, foi verificado o efeito de diferentes características de desempenho das turbinas, considerando a utilização de máquinas idênticas na casa de força.

A partir da colina de referência, foram avaliadas algumas alternativas para maximizar a produção de energia, descritas nos itens 5.1.1 a 5.1.7.

Os efeitos principais de cada solução no rendimento global são apresentados na Figura 4.

5.1.1 Deslocamento das Curvas de Rendimento

Nesta alternativa foi verificado o deslocamento ou “*shift*” das curvas de rendimento em relação aos parâmetros adimensionais n_{ED} (correspondente a queda) e Q_{ED} (correspondente a vazão), de forma a aumentar o rendimento para condições mais importantes de operação, em contrapartida, reduzindo o rendimento em outras condições.

O ponto operativo (queda e vazão) em que a colina é centrada influencia de forma direta o despacho definido no modelo e logo a produção de energia. No entanto, deve-se ressaltar que a factibilidade da colina obtida só pode ser verificada com estudos hidráulicos mais aprofundados, podendo representar maior esforço no desenvolvimento do projeto, com possíveis efeitos sobre o cronograma, passagens hidráulicas, e características como o disparo, empuxo e torques hidráulicos, podendo resultar em alteração na concepção construtiva e alteração de custo, em relação a colina de referência.

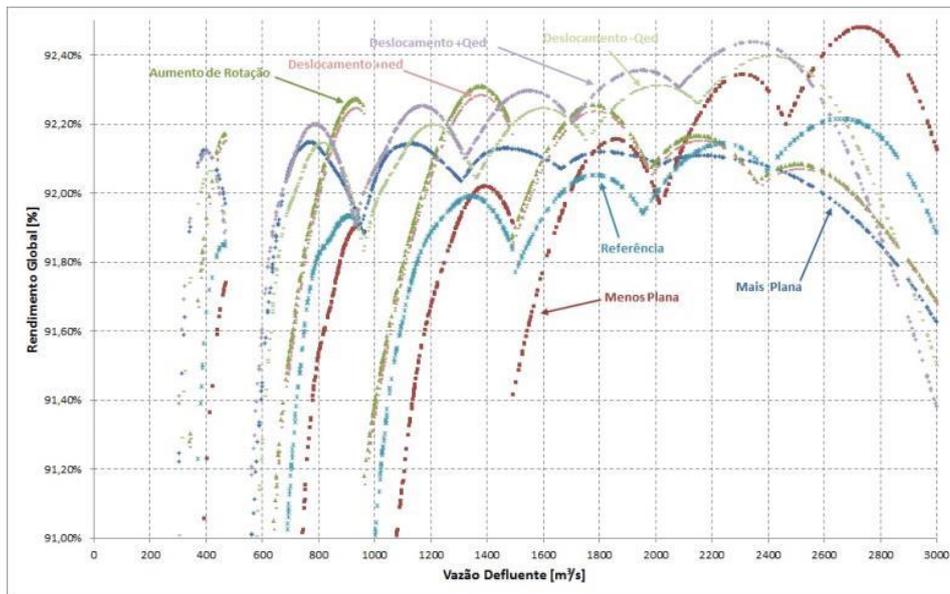


FIGURA 4 - Rendimento global para máquinas com desempenhos distintos

5.1.2 Alteração da Rotação e/ou Diâmetro da Turbina

De acordo com os resultados pode-se verificar que o aumento da rotação, embora represente redução do número de polos do gerador, desloca os pontos de operação para regiões mais distantes da queda ótima da turbina, resultando em menores rendimentos e levando a perda de produção energética.

Este distanciamento é ainda limitado pela cavitação no bordo de entrada da pá no lado de pressão para baixas quedas (maiores valores de n_{ED}), cuja intensificação pode provocar instabilidades e perdas ainda mais acentuadas de rendimento.

Por outro lado, embora a diminuição da rotação possa proporcionar ganho de rendimento da turbina, com aumento do número de polos do gerador, esta alteração possui limitação na cavitação de bordo de entrada no lado de sucção, para quedas elevadas (baixos valores de n_{ED}), cujos efeitos podem ser prejudiciais a integridade estrutural da turbina.

Vale ressaltar que as possíveis rotações síncronas são valores discretos, com passos maiores para altas rotações havendo ainda valores proibitivos para o projeto do gerador a depender de sua capacidade.

O diâmetro da turbina, além de influenciar o “step-up” e o posicionamento dos pontos na colina (n_{ED} e Q_{ED}), tem influência direta em diversas características como disparo, empuxo, torques, cavitação e portanto no custo, sendo objeto de estudo da relação custo-benefício.

5.1.3 Planicidade da Colina

Alternativamente à colina com rendimento de pico elevado, foi verificada a possibilidade de curvas mais planas em relação a vazão e a queda líquida.

Em usinas com poucas máquinas há maior demanda pela capacidade de manter valores elevados de rendimento em condições mais distantes da região ótima, como demonstrado na Figura x, e ainda, a sazonalidade associada a curva chave do canal de fuga pode representar grandes variações de queda para o equipamento, pedindo ao projeto da turbina limites mais amplos de cavitação no bordo de entrada e uma curva de rendimento mais plana.

Novamente, a factibilidade e viabilidade da nova colina obtida só pode ser verificada por uma análise que está além do objetivo e escopo deste trabalho, no entanto, os resultados indicam quais benefícios podem ser obtidos.

5.1.4 Limitação da Potência para Quedas Inferiores a Quada de Referência

A limitação da potência em quedas inferiores a queda de referência é pré-estabelecida pelos modelos MSUI e SUIISHI utilizando o fator beta conforme tipo de turbina (Francis, Kaplan, ou Pelton).

$$Q_{max} = Q_{ref} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^{\beta}$$

No entanto, cada turbina apresenta um comportamento particular entre a abertura do distribuidor e/ou rotor Kaplan e a vazão na respectiva queda e desta forma, estando os modelos oficiais de cálculo da garantia física insensíveis a este comportamento, não há incentivo para a ampliação da faixa operativa para quedas inferiores a queda de referência.

Além disso, melhores rendimentos podem resultar em menor Q_{ref} , penalizando em contrassenso a produção de energia média da usina.

5.1.5 Engolimento Mínimo

A vazão mínima operacional de cada turbina pode influenciar a geração de duas formas. Na primeira, em períodos de seca a vazão afluente pode ser inferior àquela necessária para uma unidade geradora operar de maneira segura e estável, não havendo aproveitamento do recurso, ou ainda esta vazão pode estar associada a uma queda superior ao limite utilizado no dimensionamento das turbinas.

A outra forma, refere-se a flexibilidade operativa, principalmente em usinas com poucas máquinas, como indica a Figura 3, em que o despacho ótimo demanda maior variação de vazão de cada máquina.

5.1.6 Restrição da Faixa de Quedas Operativas

A queda máxima está normalmente associada à vazão mínima afluente, com uma ou poucas unidades em operação, e é normalmente utilizada para o dimensionamento mecânico das unidades geradoras, impondo em alguns casos limitações para o projeto hidráulico da turbina.

Desta forma a alternativa visa verificar a influência da limitação da faixa de quedas líquidas na produção de energia, permitindo que algumas unidades possam ser dimensionadas para quedas máximas mais baixas, com possíveis ganhos no custo do equipamento.

5.1.7 Sobrepotência

Devido às condições favoráveis de queda e vazão, potências superiores a potência nominal podem ser alcançadas sob a ótica de operação.

No entanto, as unidades geradoras bem como equipamentos elétricos associados devem possuir dimensionamentos compatíveis com a potência máxima prevista.

Este aumento de capacidade resulta ainda em maior flexibilidade operativa, ampliando as possibilidades de despacho e de maximização do rendimento global.

5.1.8 Combinação de Características Distintas

Observando os melhores resultados obtidos anteriormente, buscou-se por meio do emprego de máquinas com características distintas, equilibrar os ganhos obtidos em diferentes condições operativas para maximizar a produção de energia total.

a. Potências unitárias distintas

Notando o benefício das máquinas de menor potência para as baixas vazões afluentes, buscou-se neste caso implementar máquinas com potência unitárias diferentes.

A Figura 5 apresenta a comparação entre a referência (seis unidades de 116,67 MW) e a solução combinada com quatro unidades de 90 MW e duas unidades de 170 MW.

b. Colinas distintas

A Figura 6 apresenta os resultados da combinação de duas colinas distintas (3xReferência+3xColinaB), utilizando máquinas com a mesma potência unitária. Para baixas vazões afluentes (até 1350 m³/s), a curva de rendimento global coincide com a referência, uma vez que a solução é composta de 3 unidades geradoras idênticas a referência. A partir desta vazão, o rendimento global assume valores intermediários entre a referência e a solução com todas as máquinas com a colina B.

Desta forma a definição da quantidade de máquinas de cada tipo para a solução combinada, depende do ponto de vazão defluente em que uma a colina alternativa traz maiores rendimentos em relação a colina de referência, verificado em resultados como indica a Figura 4.

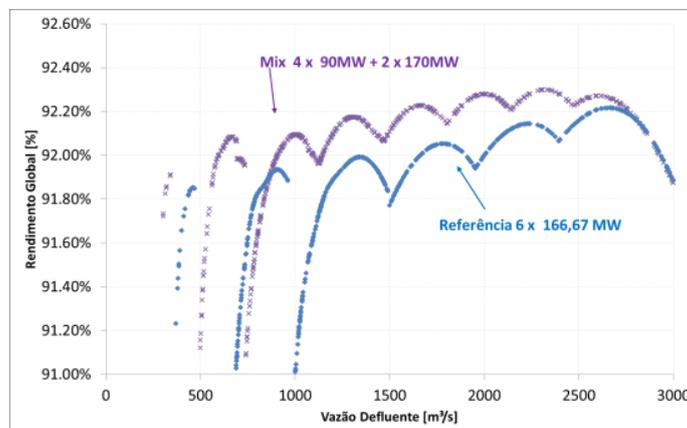


FIGURA 5 – Utilização de máquinas com potências unitárias distintas

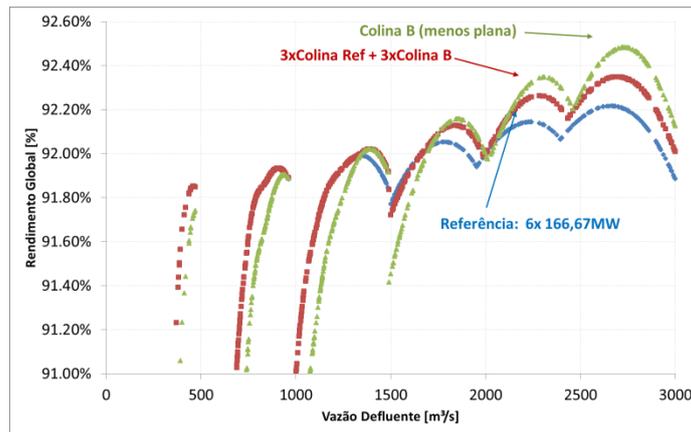


FIGURA 6 – Utilização de máquinas mesma potência unitária e colinas distintas

5.2 – Algoritmos e Desempenho Computacional

O modelo de despacho ora proposto originou duas implementações computacionais:

- via enumeração explícita das vazões turbinadas e do número de unidades despachadas, ferramenta de interpolação tridimensional específica (12), utilizando como ambiente o Microsoft Excel™;
- via otimização linear e não-linear para determinação das vazões turbinadas e número de unidades por enumeração, e interpolações quadráticas para curvas de rendimento, como ambiente o Matlab™.

A implementação (a) foi a primeira desenvolvida e, portanto, todos os resultados até agora apresentados obtidos por ela. No entanto, para aprimorar o algoritmo, iniciou-se uma implementação alternativa (b) empregando iterativamente técnicas de otimização matemática. A Figura 7 compara os resultados das duas implementações. É importante observar que a implementação (b) ainda apresenta desvios relevantes para algumas faixas de vazões e uma sequência de pontos dispersos ao redor da vazão de 1750 m³/s. A avaliação destas características é um estudo futuro interessante, mas por ora, tem-se, neste caso, desvio máximo de -0,5% e médio de 0,12%, o que mostra que as implementações apresentam resultados equivalentes, corroborando a consistência do modelo. Ressalta-se, na Tabela 1, as diferenças de tempo computacional atualmente com as duas implementações, sendo praticamente equivalentes, havendo expectativa de que a implementação (b) possa, futuramente, mostrar tempos computacionais mais competitivos à medida que se integre os vários processos iterativos desta implementação. Por último, é importante salientar que o modelo aqui proposto é facilmente paralelizável, sendo que a complexidade computacional pode ser contornada por uma implementação paralela.

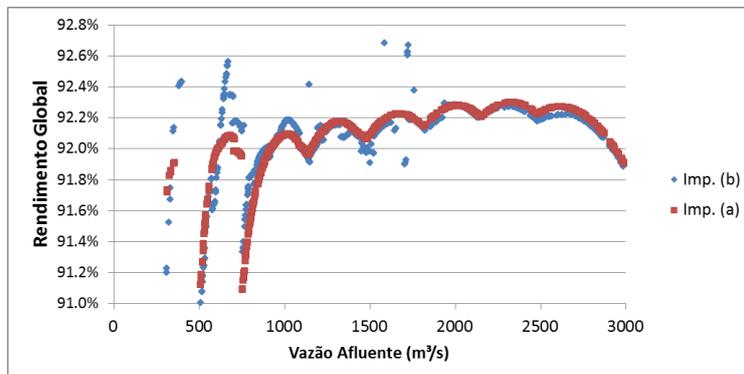


FIGURA 7 – Resultados para as duas Implementações – 4x90MW e 2x170MW

TABELA 1 – Tempo e Configuração Computacional das Implementações– 4x90MW e 2x170MW

Implementação	Tempo	Configuração
(a)	05h 33min	AMD Athlon™ 2,8 GHz / 4Gb RAM
(b)	06h 23 min	Intel Zeon™ 2,6 GHz / 8Gb RAM

6.0 - ASPECTOS REGULATÓRIOS E CONTRATUAIS

O modelo de cálculo de energia firme SUSHI, utilizado para determinação da garantia física de usinas hidrelétricas despachadas centralizadamente, conforme Portaria nº 101, de 22 de março de 2016, considera o rendimento constante da unidade geradora, não representando explicitamente¹ os efeitos causados pela

¹ Apenas a metodologia de rendimento médio (9) tem a sensibilidade para captar esses efeitos.

quantidade de máquinas e o comportamento individual de cada unidade geradora. Esta simplificação, além de dificultar a comparação de alternativas para a motorização, não fornece um sinal efetivo para quais condições o projeto dos equipamentos deve maximizar seu desempenho.

Embora a representação da colina por nuvem de pontos seja conveniente para o modelo de cálculo desenvolvido, e permita desenvolver estudos em etapas preliminares do projeto, a comprovação dos mesmos resultados para fins contratuais em fase posterior possui maior complexidade, principalmente devido às limitações intrínsecas associadas à medição do rendimento da turbina, em campo ou laboratório.

Optou-se neste trabalho por analisar e comparar a série histórica completa de vazões e não somente os meses e anos correspondentes ao período crítico no sistema interligado nacional. Isso se deve ao objetivo de buscar maximizar a produção de energia da usina ao longo de toda sua vida útil e não em um período fixo determinado.

Desta forma, ainda que o modelo de cálculo desenvolvido permita aprimorar estudos de motorização durante fase de estudo de viabilidade técnica e econômica, a sua efetiva incorporação na metodologia cálculo da garantia física e energia firme da usina conforme Portaria nº101/2016 demanda um tempo adequado para avaliação pelo setor.

7.0 - CONCLUSÃO

Foi proposta uma metodologia de cálculo da geração de energia para usinas hidrelétricas a fio d'água que utilizem máquinas distintas, levando em conta as características e limites operacionais das unidades geradoras e da usina, e quantificando os benefícios energéticos em relação à utilização de um tipo único de máquina, como usualmente considerado em estudos de viabilidade técnico-econômica de usinas hidrelétricas.

Foi destacado como as diferentes características de desempenho das unidades geradoras influenciam a produção de energia, bem como os parâmetros básicos como queda de referência, número de máquinas e perda de carga.

Os resultados encontrados mostram possibilidade de ganhos energéticos, cuja quantificação depende das características específicas dos equipamentos e, portanto, é variável caso a caso, restando ainda à avaliação quanto aos diferentes impactos relacionados ao CAPEX e cronograma.

Estudos de motorização mais detalhados, durante fase preliminar do projeto, possibilitam melhor entendimento de como a usina pode ser operada, permitindo direcionar o projeto para condições mais importantes do sistema, para uma operação eficiente e com melhor custo-benefício do aproveitamento.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Advanced Algorithms for Hydropower Optimization - Technical Report S&T-2011-486 - U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, 2012
- (2) M.M. Cordova, E.C. Finardi, F.A.C. Ribas, V.L. de Matos, M.R. Scuzziato - Performance evaluation and energy production optimization in the real-time operation of hydropower plants – Electric Power Systems Research 116 (2014) 201–207– Elsevier, 2014
- (3) Hydrogenerator Start / Stop Costs - U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, 2014
- (4) Selecting Hydraulic Reaction Turbines - U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1976
- (5) Portaria MME nº 861, de 18 de outubro de 2010.
- (6) Portaria MME nº463, de 3 de dezembro de 2009
- (7) Portaria MME nº 101, de 22 de março de 2016
- (8) Metodologia de cálculo da garantia física das usinas - EPE-DEE-RE-099/2008, 02 de julho de 2008
- (9) Metodologia de Cálculo de Parâmetros Energéticos Médios: Rendimento e Perda Hidráulica - EPE-DEE-RE-037/2011-r2, 30 de abril de 2013
- (10) IEC 60193 - Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests, 1999
- (11) IEC 60041 - Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, 1991
- (12) <http://www.xlxtrfun.com>

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



André Makishi juntou-se à EPE em 2015 e trabalha na Superintendência de Projetos de Geração (SEG). Ele é formado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá.

Thiago Correa César juntou-se à EPE em 2008 e trabalha na Superintendência de Planejamento da Geração (SGE). Ele é formado em Engenharia Elétrica pela UFJF e possui Mestrado em Engenharia Elétrica pela PUC-RJ, com ênfase em Métodos de Apoio a Decisão.

Rafaela Veiga Pillar juntou-se à EPE em 2015 e trabalha na Superintendência de Planejamento da Geração (SGE). Ela é formada em Engenharia Civil pela UFRJ e possui

Mestrado em Engenharia Civil pela COPPE-UFRJ.