

**CARLOS DA MATA CAMPOS**  
**FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA**

**OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO DAS UNIDADES GERADORAS NA PCH AREIA  
BRANCA POR MEIO DAS PERDAS TÉCNICAS NO PROCESSO DE GERAÇÃO**

**CARATINGA**  
**2018**

**CARLOS DA MATA CAMPOS**  
**FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA**

**OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO DAS UNIDADES GERADORAS NA PCH AREIA  
BRANCA POR MEIO DAS PERDAS TÉCNICAS NO PROCESSO DE GERAÇÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica das Faculdades Doctum de  
Caratinga, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração: Eficiência  
Energética.**

**Orientador: Prof. Joildo Fernandes  
Costa Júnior.**

**CARATINGA**

**2018**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

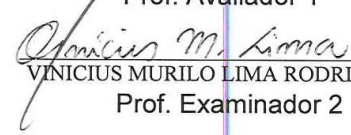
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO DAS UNIDADES GERADORAS NA PCH AREIA BRANCA POR MEIO DAS PERDAS TÉCNICAS NO PROCESSO DE GERAÇÃO, elaborado pelo(s) aluno(s) CARLOS DA MATA CAMPOS foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de ENGENHARIA ELÉTRICA das FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA, como requisito parcial da obtenção do título de

**BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

Caratinga 05/12/2018

  
\_\_\_\_\_  
JOILDO FERNANDES COSTA JÚNIOR  
Prof. Orientador

  
\_\_\_\_\_  
REGINALDO EUSTÁQUIO  
Prof. Avaliador 1

  
\_\_\_\_\_  
VINICIUS MURILO LIMA RODRIGUES  
Prof. Examinador 2

*Se vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes.*

*Isaac Newton*

## AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus por conceder o maior presente que poderia ter recebido que é o dom da vida. Aos meus pais Antônio Carlos e Maria Aparecida, minha irmã Natália Campos e meu irmão Luís Roberto Campos por ter estado sempre ao meu lado e dado sempre o melhor para poder vencer a todos os obstáculos.

Às escolas que eu passei ao longo da minha caminhada desde o ensino fundamental ao ensino médio que forneceram todos os ensinamentos a respeito do universo acadêmico. Principalmente o CEFET-MG Campus III Leopoldina-MG que abriu as maiores possibilidades no âmbito profissional com um curso técnico de qualidade e gratuito, sem esse curso com certeza não estaria nesse momento comemorando mais essa etapa vencida.

Na minha caminhada profissional estive por um período na Cooperativa LAC em Leopoldina-MG, onde comecei a desenvolver as minhas qualidades profissionais do qual agradeço ao Gerente da época Túlio Marcos que foi um grande amigo que abriu portas para um futuro mais amplo e demonstrando sempre os caminhos para que pudesse avançar cada vez mais. E também a todos os funcionários que sempre ensinaram muito sobre toda a planta industrial.

A Energisa Soluções que me acolheu logo após e possibilitou os grandes avanços na minha vida profissional e pessoal. Não poderia esquecer a participação das PCHs São Sebastião do Alto e Caju no início da carreira de técnico de operação de usina. Agradeço a toda equipe de O&M da UHE Barra do Braúna pela amizade e ensinamentos que edificaram um horizonte mais amplo em minha carreira.

A família da PCH Areia Branca que em nome do Webert Jaques e Luã Martins que foram meu alicerce e me ajudaram a vencer todos os medos e obstáculos nos meus primeiros anos na PCH, vocês foram fundamentais em minha transformação profissional e me encorajaram a vencer todos os obstáculos. Aos meus amigos da Pilar Empreendimentos que me ensinaram a verdadeira essência da simplicidade e amizade no viés de transformar a vida.

A Faculdade Doctum Campus Caratinga por esse período de aprendizado e transformação. Ao coordenador do curso de Engenharia Elétrica Joildo Fernandes pelo incentivo a busca de adquirir conhecimento. Aos meus mestres obrigado pelo

conhecimento transferido. Aos meus amigos Felipe Moraes e Igor Nery que estiveram comigo nesta caminhada, a palavra juntos faz total diferença no propósito de conquistar o mundo novo.

## RESUMO

Este trabalho elaborou a partir de um conjunto de procedimentos técnicos uma nova metodologia operacional que visa maximizar o rendimento das Unidades Geradoras da PCH Areia Branca.

O detalhamento da performance nas diversas regiões operacionais da Unidade Geradora proporcionou a uma nova metodologia operacional para ser aplicada na PCH Areia Branca a partir da utilização dos melhores pontos de rendimento do conjunto Gerador – Turbina. Este processo de otimização além de aumentar o rendimento real da unidade geradora ainda é capaz de melhorar a liquidez auxiliando na rápida amortização do investimento que é vital em tomadas de decisões por parte dos investidores.

Durante o comissionamento da PCH Areia Branca, um dos ensaios realizados para determinação da curva de rendimento da turbina é o *Index Test*. Neste ensaio, o executante obteve a medição do rendimento em 08 pontos de potência ativa distintos. A aplicação destes pontos a uma regressão polinomial de múltiplas variáveis estabeleceu uma curva de rendimento que revelou os pontos ótimos de geração de cada Unidade Geradora.

**Palavras-chave:** Eficiência Operacional de PCH. Despacho Econômico. *Index Test*.

## **ABSTRACT**

This work elaborated from a set of technical procedures a new operational methodology that aims to maximize the income of the Areia Branca SHP generating units.

The performance detail in the several operating regions of the Generating Unit provided a new operational methodology to be applied in the SHP White Sand from the use of the best yield points of the Generator - Turbine set providing a more profitable operation adding value to the enterprise. This optimization process, in addition to increasing the real yield of the generating unit, is still capable of improving liquidity, aiding in the rapid amortization of the investment that is vital for investors to make decisions.

During the commissioning of the SHP White Sand, one of the tests performed to determine the turbine yield curve is the Test Index. In this test, the performer obtained the performance measurement at 08 different active power points. The application of these points to a multi-variable polynomial regression established a yield curve that revealed the optimal generation points of each Generating Unit.

**Key words:** Operational Efficiency of Small Hydropower Plants. Efficiency. Economic dispatch. Index Test.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
CEMIG	<i>Companhia Energética de Minas Gerais</i>
CM	<i>Centímetro</i>
EPE	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
HM	<i>Hectômetro</i>
KM	<i>Quilômetro</i>
M	<i>Metros</i>
MWh	<i>Mega Watt Hora</i>
TWh	<i>Tera Watt Hora</i>
PCH	<i>Pequena Central Hidrelétrica</i>
PTC	<i>Performance Test Coders</i>
SEP	<i>Sistema Elétrico de Potência</i>
TC	<i>Transformador de corrente</i>
TP	<i>Transformador de potência</i>
UHE	<i>Usina Hidrelétrica</i>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados Técnicos da PCH Areia Branca.....	32
Tabela 2: Valores médios para cada ponto de conjugação da UG 01 .....	47
Tabela 3: Valores médios para cada ponto de conjugação UG 01 .....	47
Tabela 4: Valores médios para cada ponto de conjugação da UG 02 .....	49
Tabela 5: Valores médios para cada ponto de conjugação da UG 02 .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Turbina Kaplan.....	22
Figura 2: Comparação de rendimentos de turbinas hidráulicas .....	23
Figura 3: Tomada Winter Kenedy (Int. da Turbina) .....	27
Figura 4: Barragem .....	32
Figura 5: Mapa Esquemático com a localização relativa da PCH Areia Branca na bacia do Rio Doce .....	34
Figura 6: Arranjo geral das estruturas da PCH Areia Branca.....	35
Figura 7: Diagrama topológico das principais PCH's em operação na bacia do Rio Doce .....	35
Figura 8: Vertedouro .....	36
Figura 9: Casa de Força e Canal de Fuga.....	37
Figura 10: Tomada D'Água .....	38
Figura 11: Geradores Síncronos da PCH Areia Branca .....	40
Figura 12: Fluxograma com a operação à curto prazo da PCH Areia Branca .....	44
Figura 13: Gráfico de Rendimento da UG 01 .....	48
Figura 14: Gráfico de rendimento da UG 02.....	50
Figura 15: Gráfico de rendimento das UG's 01 e 02 .....	51
Figura 16: Novo gráfico operacional .....	52
Figura 17: Comparativo de rendimento Real / Simulado.....	53

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>18</b>
2.1 Despacho de geração .....	18
2.1.1 Planejamento à curto prazo.....	18
<b>2.2 Rendimento.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Turbinas hidráulicas .....</b>	<b>20</b>
2.3.1 Turbinas de ação.....	20
2.3.2 Turbinas de reação.....	20
2.3.3 Turbina kaplan.....	21
<b>2.4 Métodos de comissionamento de unidades geradoras.....</b>	<b>23</b>
2.4.1 Curvas de colina.....	24
2.4.2 Ensaio dinâmico.....	24
2.4.2.1 Ensaio de faixa operativa.....	24
2.4.2.2 Método de pressão diferencial (winter - kenedy) .....	24
2.4.2.3 Index test.....	25
2.4.2.4 Vazão .....	26
2.4.2.5 Cálculo do peso específico da água .....	27
<b>2.5 Otimizações operacionais de centrais hidrelétricas .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1 Análise de regressão .....</b>	<b>29</b>
<b>2.6 Informações gerais e dados técnicos da usina .....</b>	<b>30</b>
2.6.1 Rio Manhuaçu .....	31
2.6.2 Barragem.....	32
2.6.3 Localização, acessos à barragem e estruturas associadas.....	33
2.6.4 Vertedouro.....	36
2.6.5 Casa de força e canal de fuga.....	36
2.6.6 Tomada d'água.....	37
2.6.7 Túnel de adução e conduto forçado .....	38
2.6.8 Regulador de velocidade .....	38
2.6.9 Gerador .....	39
2.6.9.1 Geradores síncronos .....	39
2.6.9.2 Geradores de indução (assíncrono) .....	40

<b>2.7 Sistema de proteção .....</b>	<b>41</b>
<b>2.8 Sistema de medição.....</b>	<b>41</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 <i>Index test</i>.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2 Faixas de rendimento da Unidade Geradora 01 .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 Faixas de rendimento da Unidade Geradora 02 .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4 Nova metodologia operacional para PCH Areia Branca.....</b>	<b>51</b>
<b>4 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1 Trabalhos futuros.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.1 <i>Automação Operacional</i>.....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO A: DECLARAÇÃO PARA USO DE INFORMAÇÃO.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial a sociedade busca em bens manufaturados a transformação de matéria prima em produtos industrializados aumentando assim seu valor agregado e a qualidade superior aos realizados anteriormente em formas artesanais. Após esse avanço ocorreu a transformação dos equipamentos e também a mudança de suas funcionalidades. Nos primórdios, a utilização de combustíveis fósseis causava grandes impactos ambientais, com isso veio a demanda de desenvolver novas formas de atendimento as funcionalidades destes equipamentos através do emprego de eletricidade principalmente em fontes provindas das usinas hidroelétricas.

Com a melhoria da qualidade de vida da população, ocorreu o aumento do consumo de energia em toda a sociedade e a preocupação com a necessidade da implementação de medidas mais eficientes, de políticas e conscientização do consumo sustentável através da modernização dos equipamentos para utilização de maneira mais racional do consumo de energia. Portanto com essa dependência generalizada de consumo de energia elétrica, há a carência de adoção de equipamentos eficientes, mais automatizados, produtivos e eficazes.

Este crescimento do consumo de energia elétrica aumenta a necessidade de um investimento maciço em novas tecnologias a ser incrementadas ao SEP (Sistema Elétrico de Potência) para adoção de tecnologias com a intenção de reduzir significativamente qualquer perda que possa ocorrer em todo o processo de conversão de energia.

Contudo com o grande potencial hídrico brasileiro, recentemente ocorreu o início do desenvolvimento de estudos em torno do consumo de água, uma grande preocupação em âmbito nacional e que até então não existiam medidas para o controle e prevenção da sua utilização. Porém com as secas cada vez mais severas que assolam o país, têm se criado uma nova vertente para o consumo sustentável e responsável deste recurso. O equilíbrio do crescimento econômico, social e ambiental cria uma nova tendência de diminuição do desperdício e maximização do rendimento dos equipamentos criando novos hábitos de aproveitamento dos insumos.

A avaliação das diferentes variações de rendimento entre as faixas operacionais são indispensáveis para alcance de uma performance melhorada que possibilite ganho no despacho final de geração das usinas.

Atualmente a PCH Areia Branca não apresenta um método definido de despacho de energia elétrica, além disso não há critérios desenvolvidos para a utilização sustentável do recurso hídrico. A programação não segue critérios da demanda de energia do sistema elétrico, o planejamento operacional desta usina atende somente a vazão fio d'água do Rio Manhuaçu. Atualmente ocorre sistematicamente perdas no processo de conversão de energia e as unidades geradoras nem sempre operam em suas regiões operacionais de rendimento máximo.

Neste contexto a execução deste trabalho visa contribuir para que a planta estudada (PCH Areia Branca) alcance um nível de maior produtividade no despacho de geração de energia, tendo como foco principal a utilização racional do recurso hídrico, por meio da identificação das perdas associadas no processo de conversão de energia e a identificação das regiões de rendimento máximo e mínimo do conjunto gerador.

A identificação destas variáveis irá agregar valor ao empreendimento podendo ainda aumentar a margem lucrativa reduzindo significativamente os desperdícios com a adoção de uma estratégia operacional de despacho potencial das unidades geradoras sempre levando em consideração as suas melhores regiões de trabalho para a melhoria da eficiência do sistema como um todo.

A execução deste estudo apresentará um conjunto das variáveis contendo as melhores regiões operacionais do conjunto Turbina – Gerador disponibilizando para a equipe de operação local da PCH Areia Branca a implementação de um novo modelo de planejamento operacional a partir destas novas diretrizes.

Com a implementação de um sistema que possibilite o diagnóstico do estado das unidades geradoras do ponto de vista do seu funcionamento ótimo pode subsidiar decisões dos responsáveis pela operação da usina de modo ágil e confiável, com uma melhora significativa dos fluxos de potência entre as unidades geradoras e para o sistema elétrico de potência. Desta forma, ao final do trabalho será possível uma visão geral das perdas existentes durante o processo de despacho de carga da usina, com a obtenção de uma nova estratégia operacional que pode vigorar na PCH Areia Branca.

O objetivo central deste trabalho é a avaliação de possíveis ganhos de eficiência energética no despacho de carga das Unidades Geradoras da PCH Areia Branca, analisando as perdas existentes no processo de conversão de energia.

Para a execução deste projeto de pesquisa, alguns objetivos específicos terão que ser executados para o alcance do objetivo central, são eles:

- A) Análise de ensaios realizados durante o comissionamento do conjunto Turbina - Gerador;
- B) Determinar o ponto ótimo de geração das Unidades Geradoras e plotagem de gráficos das faixas operacionais para o planejamento operacional;
- C) Elaboração de uma nova estratégia operacional para PCH Areia Branca baseada no ponto ótimo de operação;

A execução deste estudo com caráter interdisciplinar se caracteriza como uma engenharia de procedimentos operacionais que visa o aumento da produtividade de um determinado processo produtivo.

Atualmente, algumas das centrais de geração de energia hidrelétrica possuem um sistema automatizado denominado “controle – conjunto de geração”, que é implementado pela divisão igualitária das potências ativa e reativa requeridas entre as unidades geradoras que fazem parte de uma instalação e que estão em operação. No entanto, este sistema não leva em conta se cada unidade em particular está operando no ponto de melhor rendimento do conjunto Turbina – Gerador – Transformador Elevador (ALMEIDA, 2007).

A utilização de uma técnica auxiliar a esta citada acima, que leve em consideração as faixas operacionais de cada conjunto gerador, deve gerar economia em vários segmentos, como estes: diminuição da incidência de manutenções preventivas e corretivas, redução das perdas eletromecânicas envolvidas devido a operação próximas aos valores nominais estabelecidos em ensaios, utilização sustentável de matérias primas.

Segundo (RODRIGUES, 2003) o planejamento da operação de um sistema de energia elétrica tem como objetivo atender os requisitos do mercado com confiabilidade e com um custo mínimo por consumo de combustível nas usinas. A utilização consciente da energia hidrelétrica disponível em quantidades limitadas na



forma de água armazenada nos reservatórios, torna a operação do sistema hidrelétrico complexa pois estabelece um compromisso entre a decisão de operação imediata e as consequências futuras desta decisão.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

Neste tópico serão destacados alguns métodos de otimização de Unidades Geradoras, serão colocados em evidências alguns pensamentos doutrinários de autores que anteriormente publicaram suas teses a respeito deste tema. É de suma importância conhecer alguns conceitos referentes ao comissionamento de Unidades Geradoras para maior compreensão a respeito do tema proposto.

### **2.1 Despacho de geração**

Segundo ARAUJO (2010), conforme for o despacho de cada Unidade Geradora à curto prazo, uma estimativa de produção por hora é fornecida e cabe aos operadores da usina determinar quais Unidades Geradoras devem ser ligadas e quanto cada unidade pode produzir. O autor nos apresenta o problema em duas vertentes, no despacho das Unidades Geradoras que determina a configuração de quais unidades geradoras estarão em operação e qual intervalo de tempo que cada unidade estará interligada ao sistema. A segunda vertente considerada pelo autor é o despacho de geração que se orienta em qual faixa operacional reside o ponto ótimo de geração.

#### **2.1.1 Planejamento à curto prazo**

Segundo ARAÚJO (2010), devido o planejamento de operação à longo prazo das Unidades Geradoras, requer uma representação matemática mais detalhada do sistema como a representação da rede elétrica, suas limitações operativas bem como uma representação mais detalhada do sistema hidráulico incluindo tempo de atraso no transporte de água entre os reservatórios, limitações de tomada de carga, entre outros. Também deve ser levado em consideração segundo o autor o curto horizonte do planejamento, a usina deve ter uma boa previsão de afluência e de demanda de carga levando em conta que essa situação poderá ser determinístico.

## 2.2 Rendimento

Nos casos das centrais hidrelétricas, existe um fator denominado rendimento o qual é responsável por determinar a quantidade de energia que foi realmente transformada e perdida. Assim, o aumento do rendimento em transformações de energia implica em uma maior economia através da minimização das perdas. As usinas hidrelétricas geram energia elétrica a partir da transformação de energia potencial hidráulica usando o conjunto turbina-gerador, sendo que o rendimento da transformação de energia é fortemente influenciado pelo ponto de operação destes grupos geradores (Bastos, 2002).

O rendimento de um grupo gerador pode ser expresso em função da parcela efetiva da transformação da energia hidráulica, acumulada no reservatório da usina, em energia elétrica, ou potência ativa, entregue ao consumidor. Podem ainda ser relacionado com as diversas perdas que ocorrem devido a fatores como variações na altura de queda, perdas de carga nos condutos forçados e rendimento turbina-gerador, cujas perdas são provocadas a partir de variações da vazão (Bastos, 2004).

Os grupos geradores apresentam uma grande variação em seu rendimento ao longo da faixa operativa, em geral em torno de 10%, de modo que a escolha do ponto de operação de cada grupo gerador se torna uma questão chave na otimização da eficiência da usina (Ohishi, 2001).

Neste sentido, qualquer percentual que se consiga melhora no rendimento da conversão da energia hidráulica em energia elétrica é visto com muito bons olhos, principalmente quando se considera o imenso parque gerador hidráulico instalado no País. Em um exercício de estimativa, em um país como o Brasil, onde a geração anual de energia é da ordem de 360 TWh, uma melhoria de apenas 1% na eficiência das Unidades Geradoras resultaria em um ganho de 3,6 TWh, o que equivale, aproximadamente a potência demandada em uma cidade com mais de um milhão de habitantes, como citado em Bortoni (2002). Desta forma, a determinação do ponto ótimo de operação se torna fundamental, para que de maneira geral, se minimize as perdas existentes nos processos de geração.

## 2.3 Turbinas hidráulicas

As turbinas hidráulicas são máquinas motoras que transformam a energia potencial hidráulica em energia mecânica. O fluxo de água é geralmente controlado para que permaneça uniforme e evitar perdas de cargas. Seu funcionamento consiste na transferência da quantidade de movimento d'água em forma de torque e velocidade de rotação sendo que as pás possuem perfil hidráulico para que essa transferência seja a maior possível (LOPES, 2011).

Segundo Bortoni (2002), as turbinas hidráulicas são classificadas em dois tipos, as turbinas de ação, quando o escoamento através do rotor ocorre sem variação da pressão estática e as turbinas de reação, quando o escoamento através do rotor ocorre com a variação da pressão estática.

### 2.3.1 Turbinas de ação

Segundo Arne Kjolle (2001), a energia do fluxo d'água é completamente convertida em energia cinética antes de entrar em contato com o rotor. Isto significa que o fluxo d'água passa no distribuidor sem nenhuma diferença de pressão entre a entrada e a saída. Portanto, somente a ação das forças devido à mudança no vetor velocidade cria a energia mecânica no eixo do rotor. O fluxo entra no eixo com pressão muito próxima da atmosférica na forma de um ou mais jatos espaçados regularmente em torno da borda do rotor. Isto significa que cada jato atinge momentaneamente apenas uma fração ou parte da circunferência do rotor.

### 2.3.2 Turbinas de reação

Segundo Arne Kjolle (2001), dois efeitos causam a transferência de energia do fluxo d'água para a energia mecânica no eixo da turbina. Primeiramente ocorre uma queda de pressão da entrada para a saída do rotor, gerando uma diferença de pressão que faz com que o rotor se mova. O outro efeito é a ação das forças devido à mudança no vetor velocidade criando a energia mecânica no eixo do rotor.

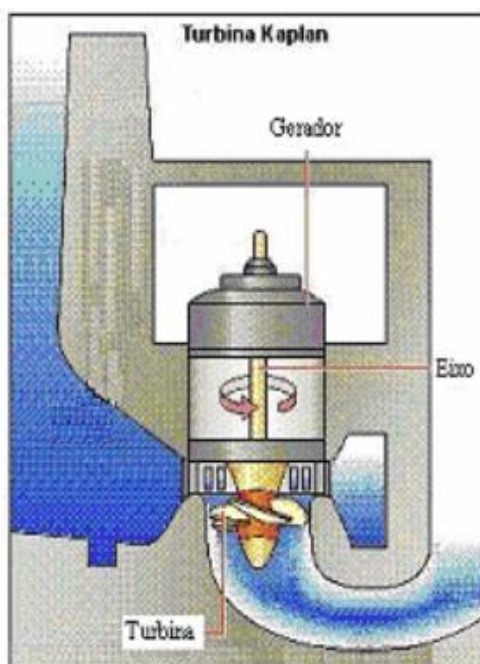
### 2.3.3 Turbina kaplan

As turbinas das Unidades Geradoras da PCH Areia Branca são do tipo Kaplan vertical. Segundo Schreiber (1977) neste tipo as turbinas são constituídas por uma ogiva do rotor kaplan, fixo à extremidade da árvore principal que sustenta um pequeno número de pás em forma de hélice.

Estas turbinas são adequadas para operar entre quedas de 20m até 50m. O rotor se assemelha a um propulsor de navio, com duas a seis pás móveis. Um sistema de êmbolo e manivelas montado dentro do cubo do eixo é responsável pela variação do ângulo de inclinação das pás. O óleo é injetado por um sistema de bombeamento localizado fora da turbina e conduzida até o rotor por um conjunto de tubulações rotativas que passam por dentro do eixo.

O ângulo das pás do rotor é ajustado através de um servomotor hidráulico, usualmente instalado no núcleo do rotor. Os rotores têm em geral de 4 a 6 pás embora um número maior de pás possa ser utilizada para alturas de quedas maiores. A relação correta entre ângulo das pás do rotor e a vazão de água admitida pelo distribuidor da turbina é determinada com um mecanismo de cames operadas por um servomotor, que por sua vez é comandado a partir do regulador de velocidade. Quando se exige desempenho ótimo sobre uma larga faixa de alturas de água no reservatório, vários mecanismos como este podem ser necessários de modo a compensar as variações de altura de água em cada período de tempo considerado. Esta flexibilidade é particularmente vantajosa quando ocorrem variações sazonais significativas na altura d'água.

Figura 1: Turbina Kaplan

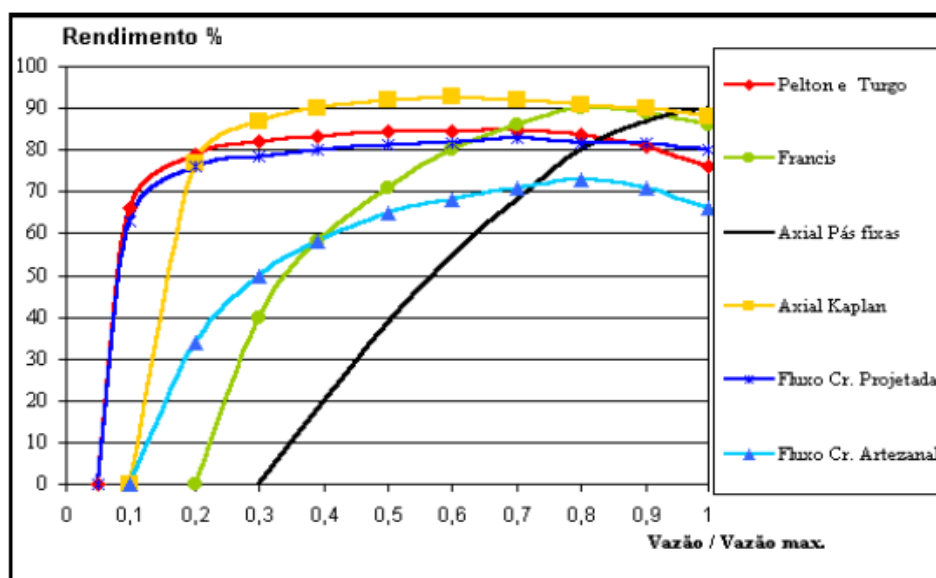


Fonte: ENCINA; 2006

A posição das pás do distribuidor que controlam o fluxo de água para entrada da turbina, pode ser ajustada em conjunto com as angulações das pás do rotor, com o objetivo de buscar a máxima eficiência de operação.

A Figura 2 apresenta uma comparação qualitativa de rendimento entre turbinas Kaplan, Francis, Pelton / Turgo, Axial de Pás Fixas, Axial Kaplan, Fluxo Cr. Projetada e Fluxo Cr. Artesanal.

Figura 2: Comparação de rendimentos de turbinas hidráulicas



FONTE: MIRANDA; 2009

Observa-se que as turbinas Kaplan têm condições de manter uma boa eficiência sobre uma faixa bem mais ampla de condições de operação que as demais. A diferença de desempenho é particularmente acentuada com relação a turbina de hélice com pás fixa no rotor.

O aumento da eficiência das turbinas Kaplan implica em custos adicionais. Os custos de fabricação são mais elevados, assim como os custos de manutenção. O equipamento de operação da turbina é mais complexo e há uma redução de confiabilidade quando se faz a comparação com turbinas de fluxo axial de pás fixas.

Tradicionalmente o eixo de uma turbina Kaplan é vertical, porém existem projetos que contemplam eixos horizontais. Estes últimos são adequados para máquinas de baixa potência.

## 2.4 Métodos de comissionamento de unidades geradoras

Alguns procedimentos de engenharia são aplicáveis no comissionamento das Unidades Geradoras para determinar que seus sistemas e componentes estejam operando dentro do projetado durante o funcionamento e se mantendo de acordo com as necessidades e requisitos operacionais. Na prática, o processo de comissionamento consiste na aplicação integrada de um conjunto de técnicas e

procedimentos de engenharia para verificar, inspecionar e testar cada componente da Unidade Geradora.

#### 2.4.1 Curvas de colina

Segundo Lopes (2011), as curvas são características das máquinas de fluxo, no qual se encontra vazão no eixo das abcissas e altura no eixo das ordenadas. As curvas de rendimento se dão em formatos de colina, em uma determinada rotação.

#### 2.4.2 Ensaios dinâmicos

São um conjunto de testes realizados durante o comissionamento onde inicia-se o fluxo hidráulico nas tubulações até a sucção, nesta etapa são realizados alguns ensaios importantes como: faixa operativa, método de pressão diferencial e *Index test*.

##### 2.4.2.1 Ensaio de faixa operativa

Segundo Lopes (2011), o ensaio de faixa operativa consiste em elevar a potência da unidade em vários patamares, porém com acréscimos das medições das vibrações dos mancais e oscilações do eixo. Com isso é possível observar as faixas que oferecem menos turbulências, cavitações ou vórtices que diminuem a vida útil da unidade. Este ensaio fornecerá alguns dados que serão importantes no desenvolvimento deste estudo.

##### 2.4.2.2 Método de pressão diferencial (*winter - kenedy*)

Segundo a *IEC 60041 – Field Acceptance test to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines*, a vazão é uma grandeza de difícil medição devido as incertezas encontradas no processo, geralmente, em instalações hidrelétricas, estas medições são realizadas pelo método *Winter - Kenedy*, que garante uma exatidão suficiente. O método consiste em instalar transmissores de pressão diferencial tipo piezo resistivo nas tomadas de pressão em uma determinada seção da caixa espiral.



No ensaio *Index Test* deverão ser utilizados pares  $k$  e  $n$ , conforme a Equação 1, existente para comparação com os valores definidos no ensaio de modelo transposto para o protótipo. Uma limitação técnica deste processo é a necessidade de se ter um modelo reduzido, uma vez que o fator que relaciona a vazão com a diferença de pressão medida entre dois pontos deve ser determinado no modelo reduzido e depois aplicado na instalação. De acordo com a queda bruta do ensaio a unidade é colocada na condição de máximo rendimento, bem como os pontos de vazão definidos no diagrama de colina e são feitas iterações para alcançar os valores mais próximos. O relatório técnico do *Index Test* executado pela *Energ Power* utilizou para calcular a vazão a Equação 1 apresentada abaixo:

$$Q = n . k . \Delta h \quad (1)$$

Onde:

$Q$  - Vazão turbinada ( $m^3 / s$ )

$n$  - coeficiente de vazão

$K$  - coeficiente de vazão

$\Delta h$  – Pressão diferencial

#### 2.4.2.3 *Index test*

O objetivo deste ensaio é determinar a característica da curva de rendimento da turbina para uma queda líquida média durante a execução do ensaio, em comparação com a curva de rendimento extrapolada do modelo reduzido. E, além disso, determinar se a conjugação entre as pás e a palheta está otimizada, segundo o rendimento relativo no caso das turbinas Kaplan.

A unidade é ensaiada em vários níveis de potência, e calcula-se o rendimento em cada nível. Sendo assim, os dados obtidos através deste ensaio serão considerados para execução deste estudo.

Este tópico apresenta uma sequência de equações contidas no relatório técnico do *Index Test* executado nas Unidades Geradoras pela *Energ Power*. A sequência de cálculo é a seguinte: Primeiramente é calculada a potência mecânica do eixo da turbina pela Equação (2):

$$PT = \frac{PG}{n} \quad (2)$$

Onde:

*PT = Potência Total;*

*PG = Potência do Gerador*

*n = Rendimento.*

O rendimento hidráulico da turbina é definido pela Equação (3).

$$n = \frac{PT}{P \cdot g \cdot Q \cdot H} \quad (3)$$

Onde:

*P: Densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);*

*G: Aceleração da gravidade local (m/s<sup>2</sup>);*

*Q: Vazão Turbinada (m<sup>3</sup>/s);*

*H: Queda líquida (m).*

As seguintes normas são usadas como referência para os testes realizados:

- a) ABNT NB 228-1990, Turbinas Hidráulicas - Ensaio de campo;
- b) ASME PTC 18-2002, *Hydraulic turbines and pump turbines - Performance tests codes.*
- c) IEC 41-1991, *Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines;*
- d) IEC 60193-1999, *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests;*

#### 2.4.2.4 Vazão

Durante o *Index Test* a vazão (Q) é determinada, para todas as aberturas do distribuidor testadas, através da medida do diferencial de pressão nas tomadas *Winter Kenedy* instaladas na caixa espiral, sendo calculada pela Equação 4 abaixo:

$$Q = K \cdot (\Delta P)^n \quad (4)$$

Onde:

$Q$  = Vazão;

$K$  = Constante de Winter Kenedy;

$\Delta P$  = pressão diferencial nas Tomadas Winter Kenedy.

Para caixa espiral circular em aço considerar:

$n = 0,50$

$K = 2,7097$

Figura 3: Tomada Winter Kenedy (Int. da Turbina)



Fonte: Próprio Autor, 2018

#### 2.4.2.5 Cálculo do peso específico da água

O peso específico da água foi calculado a partir dos valores da massa específica da água e da aceleração da gravidade local, através da Equação 5:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (5)$$

Onde:

$\gamma$  = Peso específico da água ( $N/m^3$ );

$\rho$  = Massa específica da água ( $Kg/m^3$ );

$g$  = Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).

A determinação da aceleração da gravidade local foi feita de acordo com a Equação 6, de acordo com a Norma IEC-41-1991:

$$g = 9,7803 (1 + 0,0053 \text{ sen}^2\varphi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z \quad (6)$$

onde:

$\varphi$  = latitude local em graus;

$Z$  = altitude local em metros.

A densidade da água foi obtida por interpolação linear na tabela da página 371 da IEC-41-1991, a partir dos valores medidos de temperatura e pressão absoluta da água.

A temperatura média anual da água do Rio Manhuaçu é de 21,2°. A aceleração da gravidade e a densidade da água calculada para PCH Areia Branca é de 9,7853 m/s<sup>2</sup> e 996,84 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

## 2.5 Otimizações operacionais de centrais hidrelétricas

O problema de otimização de uma determinada central hidrelétrica pode ser inicialmente definido pela entrega de uma demanda específica maximizando o rendimento de geração elétrica, sabendo-se que o rendimento individual de cada grupo gerador é função direta de sua potência elétrica ativa gerada (Bortoni, 2002).

Para realizar a otimização de uma central hidrelétrica, ocorre a necessidade de se escolher primeiramente o número ótimo de grupos geradores utilizados no fornecimento da potência demandada (Arce, 2002).

Após a escolha do número de geradores que estará em operação para determinada potência demandada, deve-se buscar a potência individual entregue por cada um, que leve a um rendimento ótimo da central hidrelétrica (Bortoni, 2001).

A busca pela melhor potência individual entregue por cada gerador, pode ser facilmente resolvido através do emprego de técnicas de programação não linear. Entretanto, para que se possam empregar técnicas de programação matemática é necessário que exista, ou que seja levantado um modelo matemático relacionado as variáveis rendimento e potência ativa (Bortoni, 2001).

Modelos matemáticos são representações simplificadas da realidade que preservam para determinadas situações uma equivalência adequada (Goldberg e

Luna, 2000), ou seja os modelos matemáticos são difíceis de serem levantados de maneira precisa e na maioria das vezes não preveem variações físicas e químicas ao longo do tempo e período do dia.

Considerando que a central hidrelétrica pode possuir vários grupos de geradores iguais, o ponto ótimo de operação será atingido quando a demanda de potência total for dividida igualmente entre os grupos geradores disponíveis (Ribas, 2002). Porém, a teoria não se repete na prática pois nunca haverá grupos geradores exatamente idênticos, nem mesmo antes de serem postos em operação (Bortoni, 2002). Sendo assim podemos interpretar que não existem grupos geradores iguais, mas semelhantes. A partir dos dados que foram contemplados pelo *Index Test* de cada Unidade Geradora é possível simular dentro de um modelo matemático não linear as otimizações que poderão ser desenvolvidas em cada Unidade Geradora.

A partir dos dados que foram contemplados pelo *Index Test* de cada Unidade Geradora é possível simular dentro de um modelo matemático não linear as otimizações que poderão ser desenvolvidas em cada Unidade Geradora.

### 2.5.1 Análise de regressão

A análise de regressão é uma técnica estatística para investigar e modelar a reação entre variáveis, sendo uma das mais importantes na análise de dados (FREEDMAN et al., 2004). O dados foram fornecidos pelo *Index Test* de modo não linear e ofereceu a possibilidade de uma análise completa ao longo da faixa de rendimento operacional das Unidades Geradoras.

Na análise de regressão, busca-se estabelecer a existência e o grau de dependência estatística entre as variáveis aleatórias, ou seja, aquelas que tem distribuição de probabilidade. A análise de regressão tem como objetivo estimar um valor médio de uma variável, a variável dependente com base nos valores de uma ou mais variáveis adicionais, variáveis explicativas. A análise de regressão, bem como a correlação tem a ver com análise simultânea de duas ou mais variáveis, como quando mede-se vários atributos em um mesmo indivíduo (idade, peso, altura, etc.) (Melo, 2012).

A principal análise de uma regressão é a relação de causalidade entre as variáveis. Portanto, toda vez que se realiza uma análise de regressão torna-se uma variável independente X e outra variável dependente Y. Assim descreve-se a relação funcional entre duas variáveis. A meta da análise de regressão será a revelação de

valores da variável dependente para valores não observados das variáveis independentes (Montgomery, 2001).

## **2.6 Informações gerais e dados técnicos da usina**

A Pequena Central Hidrelétrica Areia Branca pertence à concessionária Usina Hidrelétrica Areia Branca S.A, subsidiária da Companhia Energética Petrolina. Tem potência instalada de 19,8MW, com duas Unidades Geradoras a regime de operação a fio d'água, com o nível máximo normal de reservatório na elevação de 310,00 metros, com volume de 7,3185Hm<sup>3</sup> e área total de 1,36Km<sup>2</sup> (MAGALHÃES, 2018).

A usina foi projetada pela Poente Engenharia Ltda., e a construção civil executada pela EMPA S.A. A parte eletromecânica teve como empresa responsável a ENERG, e o fornecimento por diversos fabricantes, tendo o início da operação comercial em março de 2010.

Tabela 1: Dados Técnicos da PCH Areia Branca

DADOS TÉCNICOS - PCH AREIA BRANCA			
<b>Bacia Hidrográfica</b>	Rio Doce	Área Bacia [ Km²]	2720
<b>Rio</b>	Manhuaçu	Reservatório [Km²]	1,36
<b>Barramento</b>	<b>Tipo</b>	<b>Comprimento [m]</b>	<b>Altura Máx. [m]</b>
<b>Margem direita</b>	Enrocamento com núcleo de argila	69,0	26
<b>Estrutura de Desvio ME</b>	Concreto Convencional	10,8	26
<b>Margem Esquerda</b>	Concreto Compactado a Rolo enrocamento	33,28	26
NÍVEIS			
<b>NA Crista da barragem</b>	314 metros	<b>Volume Crista</b>	
<b>NA Max Maximorum</b>	313 metros	<b>Volume MAX MAX</b>	
<b>NA Max Normal</b>	310 metros	<b>Volume Total</b>	7,3185
<b>NA Min Operativo</b>		<b>Volume Útil</b>	
Vertedouro			
<b>Tipo</b>	Soleira Livre	<b>Quantidade</b>	1
Capacidade de Descarga Máxima [m³/s]			
Vertedouro			
<b>Nível Max Normal</b>		<b>Nível Max MAX</b>	1.438
Casa de Força			
	<b>Tipo</b>		Abrigada
<b>Comprimento [m]</b>	21,36	<b>Altura [m]</b>	23,38
Turbina			
<b>Tipo</b>	Kaplan	<b>Eixo</b>	Vertical
<b>POT. Nominal Unitária</b>	9,9	<b>Quantidade</b>	2
<b>Q Nominal unitária</b>	36	<b>Queda útil</b>	35,75
Canal de Fuga- Níveis [m]			
	<b>Tipo</b>		<b>Céu Aberto</b>
<b>Máx. Normal</b>	274	<b>Max Maximrum</b>	281,22
<b>Mínimo</b>	272,44		

Fonte: MAGALHÃES 2018

### 2.6.1 Rio Manhuaçu

O Rio Manhuaçu é um rio brasileiro do estado de Minas Gerais. Nasce no município de São João do Manhuaçu segundo constatação do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e, após 333 km de percurso, deságua no Rio Doce no município de Aimorés. Seu principal afluente é o Rio José Pedro, que possui trecho que marca a divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Manhuaçu, Conselheiro Pena, Luizburgo, São João do Manhuaçu, Caratinga, Santana do Manhuaçu, Simonésia, Reduto, Inhapim, Pocrane, Alvarenga e Aimorés são alguns dos municípios banhados pelo rio Manhuaçu (MAGALHÃES, 2018).

## 2.6.2 Barragem

As estruturas de barramento da PCH Areia Branca são compostas por uma barragem homogênea na margem direita, com núcleo de argila e enrocamento, Muro de Transição, Vertedouro, estrutura de desvio e Barragem em concreto de fechamento da margem esquerda.

Barragem com seção homogênea como pode ser vista na Figura 4, com comprimento total de 69,0 metros (entre as estacas 3+17,35 e 7+6,24) e cota de coroamento na elevação 314,0. O sistema de drenagem interno é composto de Filtro vertical e tapete horizontal tipo sanduíche, com duas camadas de 20cm de areia e uma de 20cm de pedrisco. Na estaca 6+12 é feita a transição da barragem mista para o abraço da barragem com o muro de ligação direito. Na região da seção homogênea existem 2 bermas, situadas nas elevações 304 e 294. Os taludes da barragem de seção homogênea são 2,0(H):1,0(V) até a elevação 304, e nos demais 2,2(H): 1,0(V), inclusive no talude montante. A altura máxima da barragem é de 26,0 metros, junto ao muro de ligação (MAGALHÃES, 2018).

Na margem direita foi executada uma cortina dupla de “*Jet Grouting*” na fundação ao longo de 45 metros na barragem de terra, e foi estendida aproximadamente 80 metros para dentro da ombreira. Neste trecho da ombreira foi construída uma berma com enrocamento e filtro de areia (MAGALHÃES, 2018).

Figura 4: Barragem



Fonte: Banco de dados UAB, 2018



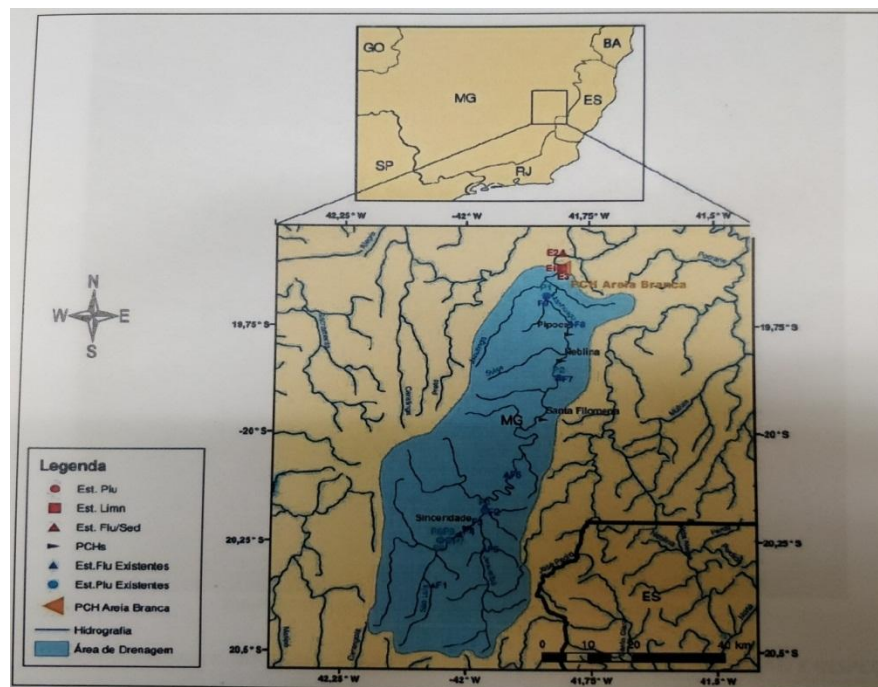
A estrutura de Desvio, na margem esquerda, é composta por uma estrutura de concreto convencional com comprimento de 10,80 metros, altura máxima de 26,0 metros e cota de coroamento na elevação 314,00 metros. Esta estrutura possui uma comporta de fundo com dimensões de 2,0 metros de largura e 4,0 metros de altura e a tomada d'água provém uma vazão sanitária de 1,34m<sup>3</sup>/s, com conduto embutido e uma válvula dispersora à jusante (MAGALHÃES, 2018).

Já a Barragem de fechamento da Margem Esquerda é um misto, compreendido por concreto compactado a rolo- CCR e enrocamento no paramento de montante, este último com inclinação de 1,5H/1,0V, totalizando um comprimento de 33,28 metros e coroamento (MAGALHÃES, 2018).

### 2.6.3 Localização, acessos à barragem e estruturas associadas

A Pequena Hidrelétrica Areia Branca, situada no rio Manhuaçu, no município de Caratinga-MG, tem acesso pela BR- 474, a 60 quilômetros de Caratinga e a 40 quilômetros de Ipanema, e por 13 quilômetros em estrada de terra a partir da sede do distrito de Santo Antônio do Manhuaçu. A Figura 5 apresenta o mapa esquemático com a localização da PCH Areia Branca.

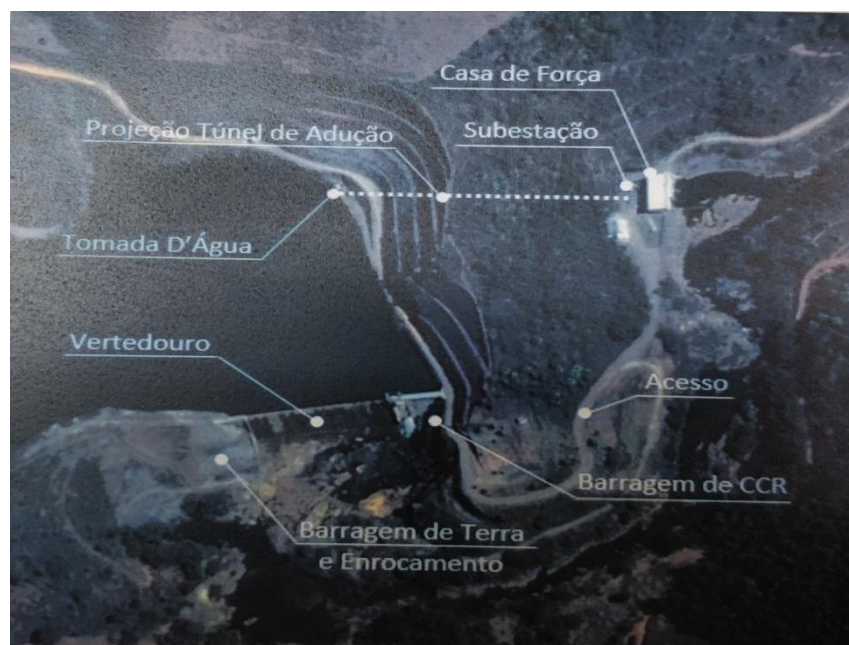
Figura 5: Mapa Esquemático com a localização relativa da PCH Areia Branca na bacia do Rio Doce



Fonte: Plano de Ação de Emergência da Barragem, 2018

A barragem da PCH Areia Branca está situada à jusante das usinas de Pipoca e Neblina, e à montante da PCH Cachoeirão, situadas no rio Manhuaçu, que constitui um dos tributários do rio Doce.

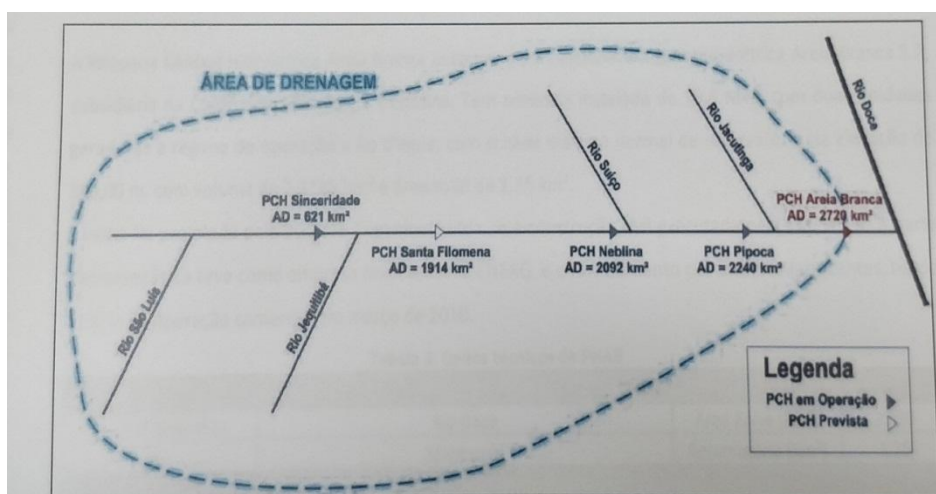
Figura 6: Arranjo geral das estruturas da PCH Areia Branca



Fonte: Plano de Ação de Emergência da Barragem, 2018

A Figura 6 mostra a localização das estruturas da PCH, devendo considerar-se que houve alteração na construção da barragem da margem esquerda, de barragem de terra para concreto compactado a rolado (CCR) e concreto convencional. O local do eixo da barragem situa-se nas coordenadas  $19^{\circ}36'12''$  e longitude oeste.

Figura 7: Diagrama topológico das principais PCH's em operação na bacia do Rio Doce



Fonte: Plano de Ação de Emergência da Barragem, 2018

A Figura 7 apresenta a localização das PCH's que estão instaladas ao longo do Rio Manhuaçu bem como a área de drenagem que estas usinas ocupam. Esta projeção ainda destaca a PCH Santa Filomena que há a previsão de entrada em operação em breve.

#### 2.6.4 Vertedouro

O Vertedouro da PCH Areia Branca possui geometria com Soleira Livre, com os paramentos de jusante com inclinação 0,75(H):1(V) e de montante 0,1(H):1(V). A dissipação de Energia da água vertida é feita por meio de degraus, e ainda, a rocha que dá apoio à estrutura é constituída de gnaiss. A altura máxima da estrutura é de 23,07 metros, tendo sido construída com concreto compactado a Rolo (CCR) e revestida com concreto convencional na parte externa (MAGALHÃES, 2018). A Figura 8 apresenta o vertedouro da PCH Areia Branca.

Figura 8: Vertedouro



Fonte: Banco de Dados UAB, 2011

#### 2.6.5 Casa de força e canal de fuga

A Casa de Força da PCH Areia Branca é do tipo abrigada, e foi projetada para acomodar 02 Unidades Geradoras do tipo Kaplan com eixo Vertical, com vazão individual máxima de 39,9m<sup>3</sup>/s.

O piso da área de montagem situa-se na elevação 282,0 metros, possuindo as galerias elétrica e mecânica, e a cota de apoio do tubo de sucção encontra-se na elevação 262,62 metros. O nível de água normal no Canal de Fuga na elevação 274,50 metros e o nível de água máximo maximorum de projeto encontra-se na elevação 281,00 metros.

Figura 9: Casa de Força e Canal de Fuga



Fonte: Autoria Própria, 2018

O sistema de transmissão associada a PCH é em 69KV, interligando a PCH Areia Branca com a subestação pertencente à CEMIG por uma linha de transmissão em circuito simples.

#### 2.6.6 Tomada d'água

A estrutura da Tomada d'Água do túnel de adução é formada por 1 unidade encaixada em rocha, com proteção em concreto projetado, conforme apresentado na Figura 10. Existem 02 grades na entrada com a função de reter detritos arrastados pelo Rio Manhuaçu.



Figura 10: Tomada D'Água



Fonte: Aatoria Própria, 2018

#### 2.6.7 Túnel de adução e conduto forçado

O Túnel de Adução é escavado em rocha com comprimento total de 222,0 metros, diâmetro de 06 metros e declividade de 17,59%. O Túnel tem 210 metros sem revestimento, 6,0 metros com revestimento em concreto e 6,0 metros trecho blindado. Após o trecho com blindagem, o conduto forçado bifurca-se com diâmetro de 2,70 metros, ancorados em blocos de concreto (MAGALHÃES, 2018).

#### 2.6.8 Regulador de velocidade

O sistema de regulação de velocidade permite o controle da rotação dos grupos geradores, e conseqüentemente controlam a potência e a frequência do gerador.

Segundo Robert (2001) a função original do regulador de velocidade é manter o grupo gerador em rotação constante a fim de que a frequência da tensão gerada seja mantida em seu valor nominal, atuando sobre a vazão da turbina hidráulica. Sendo a potência gerada função direta da vazão da turbina, o regulador de velocidade desempenha também papel fundamental de controle da potência ativa, notadamente quando o grupo gerador está operando em paralelo com a rede ou com outra máquina.

Os reguladores de velocidade são compostos pelos painéis de comando e controle, contendo os dispositivos elétricos que irão realizar os comandos e por uma central hidráulica, que receberá esses comandos vindos dos painéis e através de equipamentos eletromecânicos, tais como transdutores e bombas, irão atuar na turbina para fazer a devida regulação de velocidade, através da abertura e fechamento do distribuidor e do rotor Kaplan, sempre lembrando que existe uma lei de conjugação entre a abertura dos elementos citados acima.

#### 2.6.9 Gerador

O gerador é o principal componente de um grupo gerador, é ele que irá transformar a energia mecânica da turbina em energia elétrica. É formado por uma parte fixa e outra rotativa. A parte rotativa é denominada rotor, é nele que estão às bobinas que serão alimentadas em corrente contínua através do sistema de excitação, criando um campo eletromagnético. Já a parte fixa, denominada estator, estará às bobinas de fechamento do gerador, nele será induzida uma tensão alternada devido à variação do campo eletromagnético.

##### 2.6.9.1 Geradores síncronos

São chamados de geradores síncronos devido à velocidade síncrona ser igual à velocidade do rotor, não possui o efeito chamado de escorregamento, que nada mais é que a diferença destas velocidades.

Segundo Lima 2001, o tipo mais utilizado de gerador, para pequenas e grandes potências (hidrelétricas e térmicas). Seu rotor é magnetizado por uma fonte CC (excitatriz) e é levado a girar por um acionador mecânico externo. O enrolamento trifásico do estator recebe a indução de tensões resultante da rotação do campo do rotor em razão do posicionamento geométrico das bobinas das três fases, um sistema equilibrado de tensões é produzido. As correntes de carga fluem do estator para o exterior por conexões rígidas permanentes.

Figura 11: Geradores Síncronos da PCH Areia Branca



Fonte: Autoria Própria, 2018

#### 2.6.9.2 Geradores de indução (assíncrono)

Recebem esse nome por possuir o efeito de escorregamento. O campo do rotor tende a acompanhar o campo girante do estator, mas nunca ficará em fase, fato este que origina o nome de motores assíncronos. Devido a este fato, há uma diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor.

Segundo Lima (2001) a uma velocidade entre 1,5 e 5% acima da velocidade síncrona, aproximadamente, o gerador de indução está fornecendo sua potência nominal. O gerador de indução não possui excitação própria, que deverá ser fornecida pelo sistema ao qual será ligado ou através de capacitores. A principal vantagem do gerador de indução reside no menor custo de aquisição, instalação e manutenção, pela inexistência da excitatriz, regulador de tensão, regulador de velocidade, equipamento de sincronização, requerendo um sistema de controle e proteção relativamente simples.

As máquinas de indução possuem a vantagem de poder operar em sobrecarga, ou seja, acima de sua capacidade, e quando chega a um determinado valor acima de sua rotação, é rompido o campo do rotor com o estator, e o motor passa a operar como gerador.



## **2.7 Sistema de proteção**

O sistema de proteção tem a função de proteger os equipamentos, visando à integridade dos mesmos, desempenha um papel fundamental na detecção e isolamento de faltas, visando à operação normalizada, prevenção contra falhas e eliminação de defeitos resultantes das falhas.

Para fazer essa proteção, são utilizados os relés, que são responsáveis por monitorar as grandezas elétricas e, caso as mesmas ultrapassem os limites pré definidos, atuarão sobre o equipamento responsável pela desconexão do sistema.

Antigamente, esses relés eram eletromecânicos e havia a necessidade de se utilizar um relé para cada tipo de proteção desejada, necessitando de um grande número de relés. Atualmente, com o avanço tecnológico na fabricação desses componentes, foram desenvolvidos os relés microprocessados, que executam diversas funções em apenas um equipamento.

## **2.8 Sistema de medição**

O sistema de medição tem a função de fornecer os valores das grandezas a ser monitoradas nos processos industriais. Na geração de energia, o sistema de medição envia as variáveis para o regulador ou um relé, que de acordo com a lógica de cada instrumento, fará as intervenções necessárias para correção de uma falha ou oscilação do sistema. Dentre os dispositivos utilizados para medição, os TP's e TC's são os mais usuais.

Os transformadores de potencial são ligados em paralelo com a rede, eles transformam a tensão que entra em seu enrolamento primário em uma tensão com valor reduzido, que através de seu enrolamento secundário, enviará o valor da tensão para outro dispositivo.

Os transformadores de corrente possuem o mesmo princípio, porém fazem a transformação da corrente e são ligados em série com a rede. Esses equipamentos auxiliam no controle da potência ativa, reativa, tensão e corrente em um gerador.

### 3 METODOLOGIA

Para a execução deste estudo, serão utilizados alguns dados técnicos da PCH Areia Branca, com base em alguns ensaios que foram realizados durante o comissionamento. Estes ensaios fornecerão algumas informações valiosas para o desenvolvimento dos estudos que possibilitarão um entendimento quanto a relação entre rendimento do gerador e consumo hídrico que está diretamente ligado a geração despachada.

Um dos ensaios que serão utilizados como base do estudo é o ensaio *Index Test* das Unidades Geradoras, este ensaio fornecerá dados precisos a respeito do rendimento da turbina hidráulica. O conhecimento do rendimento das turbinas hidráulicas é aplicado na otimização dos despachos das Unidades Geradoras, levando em consideração cada momento operacional do conjunto gerador. Valores de rendimento abaixo do esperado interferem diretamente na rentabilidade do empreendimento, podendo inviabilizar economicamente sua existência. O estudo detalhado deste ensaio possibilitará a constatação da redução das perdas associadas ao processo de conversão de energia, minimizando a vazão turbinada e maximizando o rendimento total das unidades geradoras.

Com a detecção das variáveis do conjunto turbina-gerador que serão alcançadas através de coleta de dados, ocorrerá a revelação das regiões operacionais de rendimento máximo e rendimento mínimo das Unidades Geradoras da PCH Areia Branca.

Até então essas variáveis são desconhecidas pela equipe de operação local. A escolha das melhores faixas operacionais irá representar um incremento de energia para atendimento de indústrias, hospitais, consumidores residenciais, que é de suma importância em tempos de escassez de matéria prima.

Será possível dimensionar o ponto ótimo das faixas operativas das Unidades Geradoras e projetar um novo gráfico de controle estatístico do processo para ser adotado na operação do conjunto gerador - turbina como método eficaz para maximização do rendimento propiciando uma melhora significativa no despacho final de cargas que influenciará diretamente em um ganho de energia gerada em curto prazo.

Após a coleta de dados com base nos resultados do *Index Test* e da posterior plotagem dos gráficos que definirão as regiões operacionais de cada conjunto Turbina – Gerador será elaborado um novo modelo de escolha operacional com base na eficiência de cada conjunto.

Este novo modelo levará em consideração os dados de altura contratada, vazão corrigida e rendimento e proporcionará ao operador um novo modelo de escolha operacional com base na Unidade Geradora mais eficiente para cada faixa de atuação facilitando a escolha por melhores alternativas durante o cotidiano operacional.

Esta nova metodologia operacional será executada com base no modelo de regressão de múltiplas variáveis, devido a não linearidade dos dados recolhidos no *Index Test*. Este método foi adotado porque o *Index Test* contempla apenas 08 pontos de medições e a regressão de múltiplas variáveis simulará a curva de rendimento por toda a faixa operacional das Unidades Geradoras concedendo assim uma visão mais ampla da performance de cada grupo gerador.

A escolha de uma função a ser ajustada com os pontos de medição do *Index Test* deve levar em consideração as características intrínsecas ao fenômeno a ser estudado, pois há funções especiais para determinados problemas. Quando não há uma função especial costuma-se utilizar as funções polinômiais como uma aproximação ao comportamento dos dados. Para este estudo usou-se a suposição de que, no intervalo existente na variação dos dados, o comportamento da função terá uma regressão polinomial de grau 7. Conforme apresentado nas Equações 7 e 8:

$$Y = 6,017292466 \cdot 10^{-24} X^7 - 2,893173753 \cdot 10^{-19} X^6 + 5,814656481 \cdot 10^{-15} X^5 - 6,315327059 \cdot 10^{-11} X^4 + 3,991839623 \cdot 10^{-7} X^3 - 1,464448673 \cdot 10^{-3} X^2 + 2,881629258 \cdot (-2254,712296) \quad (7)$$

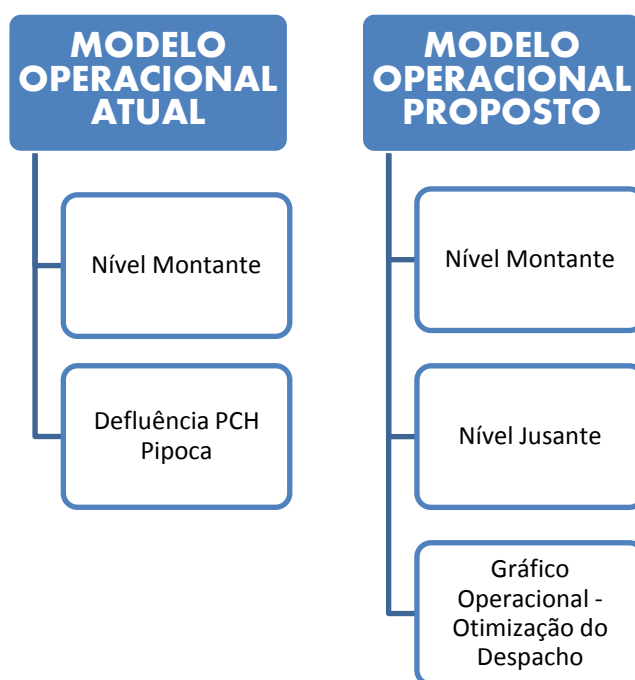
$$Y = 2,947459506 \cdot 10^{-24} X^7 + 1,383134785 \cdot 10^{-19} X^6 - 2,72034131 \cdot 10^{-15} X^5 + 2,901768843 \cdot 10^{11} X^4 - 1,809254542 \cdot 10^{-7} X^3 + 6,574679428 \cdot 10^{-4} X^2 - 1,282714248 X + 1116,594116 \quad (8)$$

O coeficiente de determinação também chamado de  $R^2$  é uma medida de qualidade do modelo em relação a sua habilidade de estimar corretamente os

valores da variável resposta Y. O  $R^2$  indica quanto a variável resposta é explicada pela variância das variáveis explicativas. Seu valor está no intervalo de 0 a 1 ou seja, quanto maior o valor de  $R^2$  mais explicativo é o modelo (Bussab, 1988). O coeficiente de determinação para comprovação estatística deve ser o mais próximo de 1 para uma correlação aceitável. O coeficiente de relação registrado pela regressão neste estudo alcançou 0,9999.

A Figura 13 mostra as etapas de planejamento de geração à curto prazo adotado na PCH Areia Branca, à esquerda temos o modo atual de escolha do despacho das unidades geradoras e à direita temos o modo proposto que poderá ser implementado a partir da comprovação técnica deste estudo.

Figura 12: Fluxograma com a operação à curto prazo da PCH Areia Branca



Fonte: Autoria própria, 2018

A execução de estudos para minimização de perdas no processo de geração de energia elétrica é crescente, levando em consideração a demanda cada vez maior por oferta de energia elétrica. Com isso o embasamento deste estudo se faz

necessário não só na PCH Areia Branca, mas em todas as PCH's. É uma questão de responsabilidade social, ambiental e econômica.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este tópico trará uma abordagem sistemática dos ensaios que foram realizados pela ENERGO POWER (empresa fabricante da turbina kaplan) durante o comissionamento da turbina. Os resultados destes ensaios foram utilizados como base metodológica para detecção das limitações do despacho das unidades geradoras da PCH Areia Branca e de seus respectivos pontos ótimos. A partir desses resultados foram criadas as variáveis operacionais que se aplicadas garantirão a operação otimizada do conjunto gerador turbina.

### **4.1 *Index test***

O ensaio *Index Test* realizado durante o comissionamento das turbinas apresentou naquela oportunidade o comportamento hidrodinâmico bem como seu rendimento relativo e os dados do conjugado de abertura do rotor kaplan .

Estes ensaios foram analisados e seus respectivos resultados serão apresentados abaixo para cada unidade geradora para obtenção dos pontos de rendimento máximo e mínimo de cada unidade.

Com base nestes ensaios foi possível definir uma nova estratégia operacional que visa aumentar o despacho de energia de cada unidade geradora e eliminar os desperdícios no processo de conversão de energia.

### **4.2 Faixas de rendimento da Unidade Geradora 01**

Os resultados apresentados abaixo levam em consideração o ensaio *Index Test* realizado durante o comissionamento do conjunto Gerador - Turbina da UG 01 e nos oferecem um entendimento quanto a conjuntura de operação do conjugado gerador-turbina da UG 01.

Tabela 2: Valores médios para cada ponto de conjugação da UG 01

Pressão na Entrada da Caixa Espiral (Pa)	Potência (kW)	Pressão Diferencial (mbar)	K	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Nível Jusante (m)	Queda Líquida (m)
393499,29	2724,58	12,83	2,7097	9,71	273,5	35,03
390749,36	3366,3	19,12	2,7097	11,85	273,56	34,74
391387,62	4097,25	27,25	2,7097	14,15	273,61	34,82
386308,97	4775,32	36,25	2,7097	16,31	273,68	34,3
385549,7	5447,34	46,06	2,7097	18,39	273,71	34,27
385125,33	6193,44	58,25	2,7097	20,68	273,78	34,26
377604,72	6980,23	75,94	2,7097	23,61	273,83	33,58
375031,59	7840,17	96,49	2,7097	26,62	273,87	33,45
371456,99	8701,48	121,1	2,7097	29,82	273,96	33,2
367579,19	9433,13	144,99	2,7097	32,63	274,01	32,94

Fonte: Energ (2010)

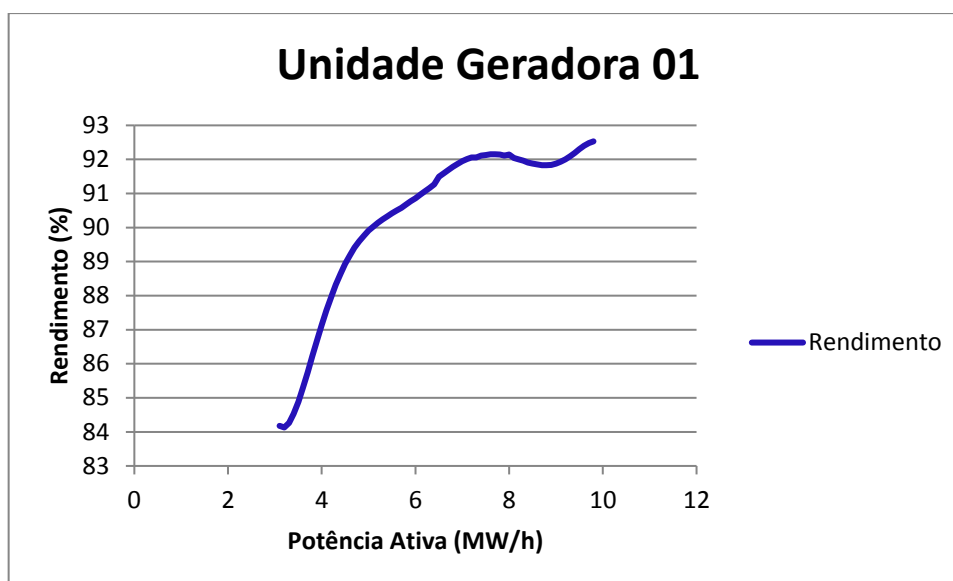
Tabela 3: Valores médios para cada ponto de conjugação UG 01

Posição Real do Distribuidor (%)	Potência corrigida para Queda Contratual (kW)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Rendimento da Turbina (%)
40	2637,99	9,6	84,82%
45,08	3300,25	11,77	86,59%
50,04	4002,64	14,04	88,06%
54,94	4770,88	16,31	90,33%
60,02	5448,77	18,39	91,02%
65	6198,71	20,69	92,06%
70,08	7198,09	23,86	92,70%
75,11	8133,88	26,95	92,62%
80,06	9131,44	30,3	92,46%
84,98	10012,79	33,28	92,31%

Fonte: Energ, 2010

Os dados coletados no *Index Test* foram tratados em uma regressão polinomial de múltiplas variáveis e deram origem a um gráfico que contempla todas regiões operacionais de cada conjunto Turbina – Gerador.

Figura 13: Gráfico de Rendimento da UG 01



Fonte: Autoria própria, 2018

A Figura 13 acima destaca os diferentes pontos de rendimento conforme a potência ativa do conjunto Gerador-Turbina da Unidade Geradora 01. Com ele é possível constatar os pontos eficientes e ineficientes ao longo da faixa operacional. Conclui-se que o diferencial de rendimento chega a 8,4% dependendo da potência operacional de despacho e o ponto ótimo de geração para esta unidade é 9,9MW/h.

#### 4.3 Faixas de rendimento da Unidade Geradora 02

O conjunto gerador-Turbina da Unidade Geradora 02 foi submetido aos mesmos ensaios que a UG 01. Abaixo, os dados destes ensaios são exemplificados e nos dão a dimensão das diferenças entre as regiões de melhor eficiência entre ambas.



Tabela 4: Valores médios para cada ponto de conjugação da UG 02

<b>Pressão na Entrada da Caixa Espiral (Pa)</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Pressão Diferencial (mbar)</b>	<b>K</b>	<b>Vazão (m³/s)</b>	<b>Nível Jusante (m)</b>	<b>Queda Líquida (m)</b>
390312	2761,18	12,25	2,709	9,73	273,5	34,7
389380,66	3491,31	19,15	2,709	12,16	273,55	34,61
388931,6	4264,39	27,18	2,709	14,49	273,63	34,56
388473,3	5011,48	37,15	2,709	16,94	273,68	34,55
385535,28	5662,96	46,03	2,709	18,85	273,73	34,27
382792,85	6377,7	57,61	2,709	21,09	273,78	34,04
379373,77	7175,26	75,92	2,709	24,21	273,84	33,79
376012,05	8028,52	98,67	2,709	27,61	273,9	33,58
375496,07	9056,42	122,49	2,709	30,76	273,93	33,7
369751,48	9854,17	157,07	2,709	34,83	274	33,34

Fonte: Energ, 2010

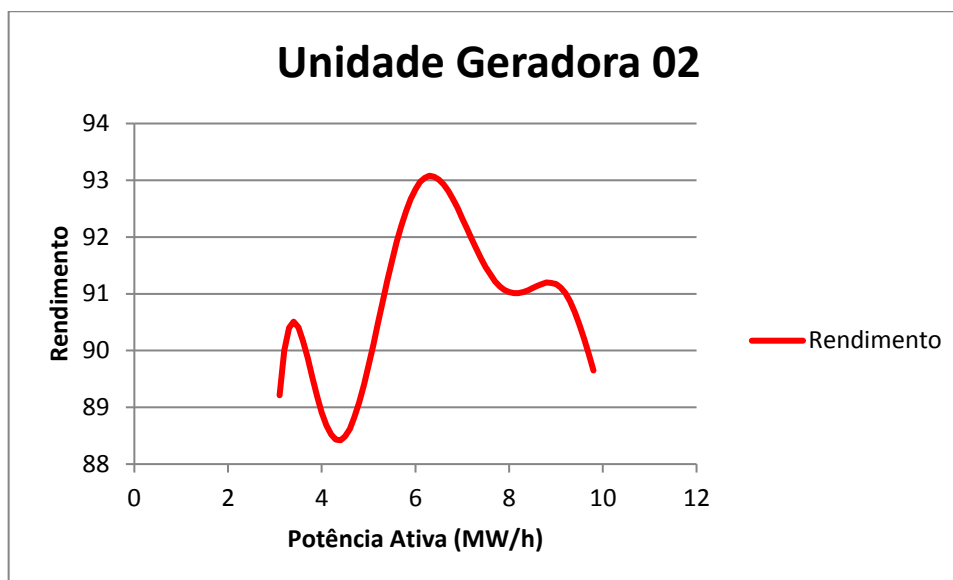
Tabela 5: Valores médios para cada ponto de conjugação da UG 02

<b>Posição Real do Distribuidor (%)</b>	<b>Potência corrigida para Queda Contratual (kW)</b>	<b>Vazão (m³/s)</b>	<b>Rendimento da Turbina (%)</b>
40	2711,23	9,67	86,61%
45	3440,91	12,1	87,80%
50	4212,05	14,43	90,15%
55,01	4953,64	16,87	90,21%
60	5664,98	18,86	92,30%
65	6445,07	21,17	93,55%
70,02	7332,48	24,39	92,37%
74,97	8280,82	27,89	91,09%
80	9290,03	31,02	91,89%
85,02	10272,67	35,31	89,25%

Fonte: Energ, 2010

Os dados coletados no *Index Test* foram tratados em uma regressão polinomial de múltiplas variáveis e deram origem a um gráfico que contempla todas regiões operacionais de cada conjunto Turbina – Gerador.

Figura 14: Gráfico de rendimento da UG 02

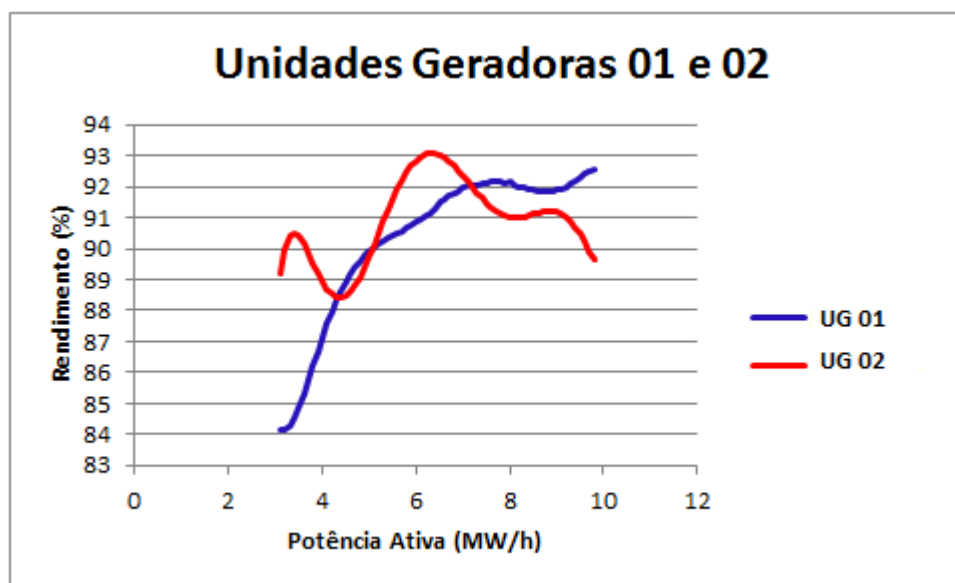


Fonte: Autoria própria, 2018

A Figura 14 acima destaca os diferentes pontos de rendimento conforme a potência ativa do conjunto Gerador-Turbina da Unidade Geradora 02. Com ele é possível constatar os pontos eficientes e ineficientes ao longo da faixa operacional. Conclui-se que o diferencial de rendimento chega a 4,66% dependendo da potência operacional de despacho e o ponto ótimo de geração para esta unidade é 6,3MW/h.

A regressão possibilitou uma visão mais ampla das distintas faixas operacionais das Unidades Geradoras. As regiões operacionais de cada Unidade Geradora é muito distinta ao logo de suas faixas operativas, como pode ser vista na Figura 15.

Figura 15: Gráfico de rendimento das UG's 01 e 02



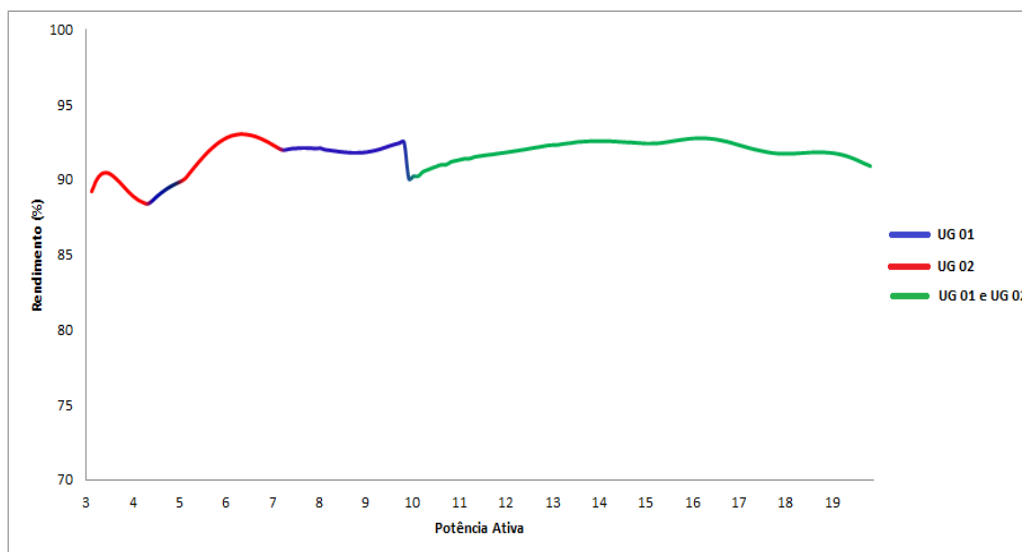
Fonte: Autoria própria, 2018

#### 4.4 Nova metodologia operacional para PCH Areia Branca

A escolha da Unidade Geradora mais eficiente para determinada faixa de operação impacta significativamente no resultado operacional de uma planta de geração de energia. Com isso, é importante para PCH Areia Branca definir uma nova metodologia operacional visando a maximização da eficiência.

O gráfico abaixo apresenta uma nova metodologia para auxiliar os operadores da PCH Branca na escolha de qual Unidade Geradora deve funcionar em cada faixa operacional e é baseado na escolha da alternativa mais rentável para empreendimento.

Figura 16: Novo gráfico operacional



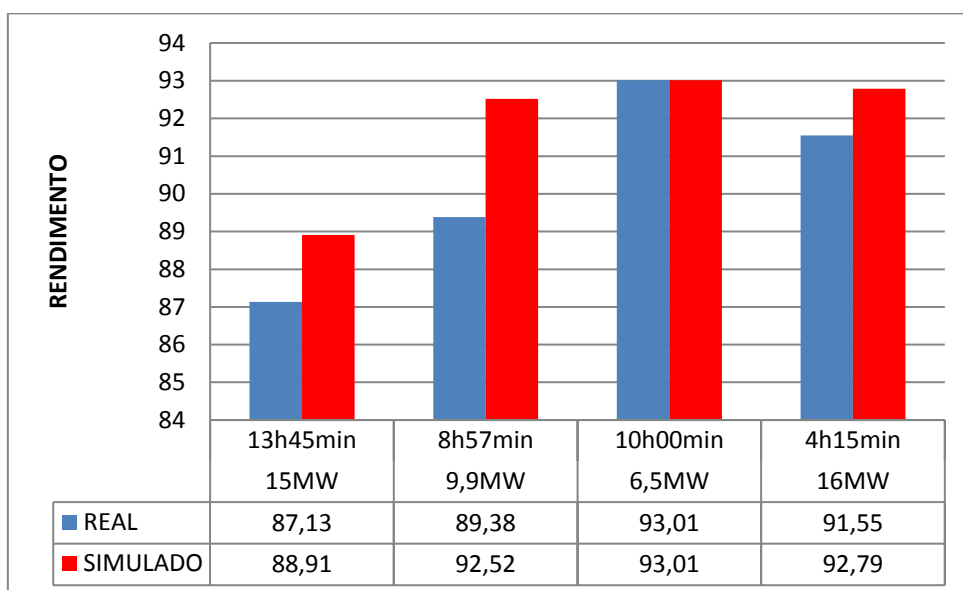
Fonte: Autoria própria, 2018

A adoção deste gráfico no cotidiano operacional da PCH Areia Branca impediria a utilização das Unidades Geradoras em seus pontos de baixo rendimento. Os operadores terão o auxílio deste gráfico, podendo verificar o comportamento de cada Unidade Geradora conforme sua potência Ativa mantendo a operação sempre nos melhores níveis de rendimento de cada conjunto.

Através dessa nova metodologia operacional irá direcionar a operação local ao longo da potência ativa total instalado da PCH Areia Branca no seus 19,8MW. Na Figura 16 orienta nas cores informativas os seus pontos ótimos de geração. A cor azul sinaliza quais pontos ótimos de operação correspondente à 3 MW/h até 9,9 MW/h da Unidade Geradora 01, a cor vermelha sinaliza quais pontos operacionais de ótimo rendimento da unidade geradora 02 de 3,0 MW/h até 9,9 MW/h. À partir de 9,9MW/h até 19,8MW/h está sinalizado pela cor verde e esta relacionado com ambas Unidades Geradoras sempre utilizando os seus pontos de melhor rendimento.

Uma pesquisa no banco de dados da usina constatou vários exemplos de escolhas equivocadas nas tomadas de decisões durante o cotidiano operacional. Essas escolhas interferem diretamente na rentabilidade do empreendimento. A Figura 17 abaixo apresenta algumas dessas escolhas.

Figura 17: Comparativo de rendimento Real / Simulado



Percebe-se pela tabela acima que longos períodos de operação foram registrados fora das melhores regiões operacionais resultando perdas técnicas diminuindo o despacho ideal do conjunto Turbina – Gerador para determinadas potências. Essa questão se agrava quando essas tomadas incorretas de decisão permanecem por um longo período de tempo.

## 4 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a elaboração deste estudo foi possível concluir que assim como nas grandes centrais hidrelétricas a implementação deste estudo em PCH's também apresenta grandes potenciais para promover a otimização da eficiência de suas Unidades Geradoras.

Através do levantamento dos dados foi possível verificar ganhos significativos em determinadas faixas operativas de cada Unidade Geradora e estas faixas operacionais apresentaram rendimentos distintos.

A utilização de uma nova metodologia que poderá ser aplicada na PCH Areia Branca para escolha da alternativa mais eficiente de geração de energia resultaria em ganhos energéticos ao empreendimento e ao Sistema Elétrico de Potência impedindo a operação em regiões operacionais de baixa eficiência.

O cenário energético atual impõe a necessidade de desenvolver novas tecnologias na área de energias renováveis e este trabalho apresenta ao mercado uma nova vertente para maximização da oferta de energia através de projetos de otimizações das plantas que já estão em operação. Ganhos importantes a partir da implantação destes estudos em UHE's já surtiram importantes efeitos e a ampliação desse leque a partir da inclusão das PCH's seria de grande valia na busca por um Sistema Elétrico sustentável a partir da adoção desse estudo com base nos pontos ótimos de geração de cada Conjunto Gerador - Turbina.

Esta nova metodologia operacional para PCH Areia Branca será apresentada aos responsáveis da Quanta Geração S/A para posterior avaliação de possível implantação.

## **4.1 Trabalhos futuros**

### *4.1.1 Automação Operacional*

O estudo de implantação para um modelo sistematicamente automatizado poderia proporcionar bons resultados para PCH Areia Branca. Um sistema com disposição de mapear diversas variáveis e que possibilite uma entrega confiável dos dados ao software operacional com respostas quanto a potência ativa de trabalho para determinada vazão disponível levando em consideração os pontos ótimos de geração, de forma que as alterações de carga ocorram de forma independente da ação de um operador.

## BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, P. E. M. **Otimização da metodologia de controle conjunto de tensão e potência na geração de energia elétrica aplicável a área de projetos com emprego de técnicas de inteligência artificial.** Proposta PROGRAMA ANUAL DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO CEMIG/ ANEEL - CICLO 2007/2008. 2007.

ARAUJO, R. **Modelagem e otimização na geração hidrelétrica de energia: uma abordagem com emprego de sistema inteligentes.** Dissertação (Mestrado) – CEFET-MG, 2010.

Arce, A., Ohishi, T., Soares, S. (2002). **Optimal dispatch of generating units of the Itaipú hydroelectric plant,** IEEE Transactions on Power Systems.

BASTOS, G. S. **Otimização da operação de centrais hidrelétricas pela distribuição inteligente de carga entre máquinas.** 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.

BORTONI, E. C.; BASTOS, G. S.; SOUZA, L. E. **Otimização da operação de pequenas centrais hidrelétricas utilizando técnicas de otimização combinatória.** (2002).

BORTONI, E. C. **Monitor de grandezas energéticas para centrais de geração de energia elétrica.** Patente junto ao INPI, 2001.

BUSSAB, W. O. **Análise de variância e regressão.** 2.ed. São Paulo: Atual, 1988.

ENCINA, Anastácio Sebastián Arce. **Despacho Ótimo de Unidades Geradoras em sistemas hidrelétricos Via Heurística Baseada em Relaxação Langrangeana e Programação Dinâmica.** Universidade Estadual de Campinas, 2006.

FREEDMAN, L. S; FAINBERG, V; KIPNIS, V; MIDTHUNE, D e CARROL, R. J.A. **New Method for dealing with measurement error in explanatory variables of regression models.** Biometrics. 2004.

GOLDBARG, M. C. e LUNA, H. P. **Otimização combinatória e programação linear : modelos e algoritmos.** Campus, Rio de Janeiro, 2000.

IEC 60041 – **Field Acceptance Test to Determine The Hydraulic Performance Of Hydraulic Turbines, Storage Pumps And Pump Turbines.** 1991 – Third Edition.  
LAWRENCE, L. **Relatório do Ensaio Índex Test UG 01 / UG 02.** Acervo PCH Areia Branca 0730-H105-01-REL-02904. 2010.



KJOLLE, ARNE; **Hydropower in norway mechanical equipament**, Trondheim: **Norwegian University of Science and Technology**. 2001.

LOPES, R. **Comissionamento de turbinas hidráulicas: Ensaio de Faixa Operativa, Índex Test e Rejeição de carga**. UNESP, 2011.

MELO, V. **Relacionando uma função polinomial com redes neurais artificiais tipo perceptron múltipla camada (MLP)**. Universidade Estadual da Paraíba, 2012.

MIRANDA, Roberto Lobo. **Regulação Técnica para se Obter Melhor Eficiência na Motorização de Pequenas Centrais Hidrelétricas no Brasil**. 2009. 119f. Tese de Mestrado (Regulação da Indústria de Energia) – Universidade de Salvador, 2009.

MONTGOMERY, D.C; PECK, E.A e VINING, G.G. **Introduction to Linear regression analysis**. Third Edition. Jonh Wiley, New York. 2001.

RIBAS, F. (2002). **Otimização da geração de energia em centrais hidrelétricas**. Foz do Iguaçu.

OHISHI, T. et al. **Otimização do despacho das máquinas das usinas do rio Paranapanema**. Disponível: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/Citenel2001/trabalhos%5c.Pdf>> Acesso em 05 de maio de 2018.

LIMA, Roberth dos Santos. **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p.76.

MAGALHÃES, R. **Plano de Ação de Emergência da Barragem – PCH Areia Branca**. Acervo PCH Areia Branca IT.CI.PHAB.021.R0. 2018.

RODRIGUES, R. N. **Despacho de unidades geradoras hidrelétricas utilizando langrangeano aumentado**. Dissertação (Mestrado) – UFSC, 2003.

SCHREIBER, GEIARD PAUL; **Usinas hidrelétricas**. Editora Edgard Blucher LTDA, Rio de Janeiro, 1977.

## ANEXO A: DECLARAÇÃO PARA USO DE INFORMAÇÃO

Hidrelétrica Areia Branca.

### DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins, que a Hidrelétrica Areia Branca, autoriza o uso e a divulgação dos dados necessários para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Carlos da Mata Campos, matriculado no 10º período do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Tecnológico de Caratinga da DOCTUM Caratinga, intitulado "OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO DAS UNIDADES GERADORAS DA PCH AREIA BRANCA POR MEIO DAS PERDAS TÉCNICAS NO PROCESSO DE GERAÇÃO", orientado pelo professor Joildo Fernandes.

Dados constantes:

- Dados técnicos;
- Ensaios realizados durante o comissionamento das Unidades Geradoras;
- Fotos do empreendimento.

Atenciosamente,



Ricardo Magalhães

Responsável Técnico