

Análise da Influência da Rejeição de Carga do Sistema de Distribuição sobre a Vida Útil dos Equipamentos de PCH's

Thiago, G. L., Ribeiro V. J.

Resumo – Este documento apresenta a metodologia desenvolvida para melhorar a vida útil dos equipamentos de PCH's a partir da análise dos efeitos danosos da Rejeição de Carga sobre os equipamentos hidromecânicos e elétricos. São apresentadas as pesquisas realizadas para o entendimento dos fenômenos transitórios elétricos e dos transientes hidráulicos, os softwares utilizados em simulações e os ensaios realizados. A partir dessas informações a metodologia foi elaborada com o enfoque no uso dos equipamentos sob condições de projeto, procedimentos de inspeção e procedimentos de manutenção. A metodologia pode ser incorporada nas rotinas já existentes da concessionária de geração e, se adequadamente tratada, pode conduzir a melhoria da vida útil e redução dos custos com substituição de equipamentos e paradas forçadas. De forma prática, a cartilha e as folhas de check-list elaboradas com os resultados da pesquisa podem disseminar a utilização dos procedimentos entre os operadores e os mantenedores das centrais, o que trará benefícios com maior agilidade e eficiência nos processos de operação e manutenção das PCH's.

Palavras-chave – vida útil, rejeição de carga, PCH's, metodologia.

I. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos fenômenos provocados pela rejeição de carga é uma tarefa multidisciplinar que engloba conceitos elétricos, mecânicos, hidráulicos, dentre outros. A dificuldade em se ter uma relação entre os efeitos provocados e o comprometimento da vida útil dos equipamentos de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) é um obstáculo à tomada de decisão de novos investimentos nas centrais em operação. No projeto de P&D propôs-se desenvolver uma metodologia que permitisse melhorar a vida útil dos equipamentos conhecendo a influência nociva da rejeição de carga, podendo ser aplicada a diversas centrais de menor porte em operação.

Para criar a metodologia, foram pesquisados os principais conceitos elétricos, mecânicos e hidráulicos que refletem o comportamento das grandezas físicas envolvidas. Através do conhecimento dos fenômenos transitórios elétricos e dos transientes hidráulicos, foi possível adaptar alguns softwares para simular em escritório os comportamentos dessas grandezas. Na sequência, os testes e ensaios realizados em laboratório e em uma central hidrelétrica da concessionária per-

mitiram a avaliação dos comportamentos a partir da análise dos dados adquiridos nos diferentes experimentos. Reunindo as observações originadas nas pesquisas, simulações e ensaios, a elaboração da metodologia seguiu a linha de conhecer os efeitos danosos da rejeição de carga sobre cada equipamento e encontrar as medidas recomendadas e as medidas indicadas individualmente por equipamento para melhorar sua vida útil.

Com o objetivo de tornar mais fácil e intuitiva, para os usuários, a aplicação da metodologia, foi criada uma cartilha e algumas rotinas de check-list que podem ser incorporadas às rotinas já existentes na concessionária. Para o sucesso na melhoria da vida útil, no entanto, é fundamental a disseminação do conhecimento adquirido neste projeto para todos os operadores e mantenedores das centrais hidrelétricas, a quem cabe a aplicação diária da metodologia proposta. Conforme critérios da própria concessionária, a seleção de uma central piloto para aplicação integral da metodologia permitirá a avaliação econômica com redução dos custos com substituição de equipamentos e paradas forçadas.

O Projeto recebeu o título de “Análise da Influência da Rejeição de Carga do Sistema de Distribuição sobre a Vida Útil dos Equipamentos de PCH's” cujo código ANEEL é 0064-002-2007, pertence ao ciclo de desenvolvimento 2007, e teve como entidade executora o Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação – CGTI, tendo recebido da Concessionária AES Tietê S.A. o suporte financeiro.

II. CONCEITOS ADOTADOS

A. Vida Útil

A expressão Vida Útil pode ser entendida, genericamente, como uma expressão da durabilidade de um equipamento trabalhando em condições satisfatórias. É o intervalo de tempo entre a entrada em serviço do equipamento até o momento em que ocorre uma das seguintes observações:

- o mesmo deixa de operar por incapacidade de executar a tarefa nas mesmas condições para as quais foi fabricado ou
- quando sua taxa de avarias se torna inaceitável para o proprietário ou
- quando é considerado irreparável no contexto operacional, técnico ou econômico.

Além das causas decorrentes do desgaste natural pelo uso e pela ação de elementos da natureza, a vida útil dos equipamentos das centrais hidrelétricas é afetada também por fatores funcionais [2], tais como a inadequação e a obsoles-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL ciclo 2007. Este trabalho foi apoiado integralmente pela Concessionária AES Tietê. O pesquisador G. L. Thiago trabalha na 'UNIFEI' enquanto que o pesquisador V. J. Ribeiro trabalha pelo 'CGTI'.

cência, resultantes do surgimento de substitutos mais aperfeiçoados. Dentre os fatores funcionais destaca-se:

- Características de operação: princípio de funcionamento, condições de operação, condições do ambiente onde o equipamento está instalado, entre outras;
- Tipos e frequência de falhas;
- Obsolescência tecnológica, advinda do desenvolvimento de novos materiais e novas tecnologias;
- Tipo e frequência de manutenção;
- Tecnologias utilizadas pelos fabricantes dos componentes e pelo fabricante que agrega as partes para montagem do equipamento.

B. Manutenção

A manutenção é toda atividade que se realiza através de processos diretos ou indiretos nos equipamentos, obras ou instalações, com a finalidade de lhes assegurar condições de cumprir com segurança e eficiência as funções para as quais foram fabricados ou construídos, levando-se em consideração as condições de operação e as econômicas [6]. A manutenção desenvolve especial papel na determinação da vida útil econômica, uma vez que ela pode determinar quando não será mais economicamente viável dar manutenção no equipamento. É dividida da seguinte forma:

- Manutenção Preditiva: Manutenção que se realiza através de análises das características operativas e/ou físico-químicas dos equipamentos, obras ou instalações, com a finalidade de detectar possíveis falhas;
- Manutenção Preventiva: Manutenção que se realiza mediante um serviço programado de controle, conservação e reparação de equipamentos, obras ou instalações, com a finalidade de mantê-los em condições satisfatórias de funcionamento, e de prevenir contra possíveis ocorrências que acarretam sua indisponibilidade;
- Manutenção Corretiva: Manutenção que se realiza em equipamentos, obras ou instalações, com a finalidade de corrigir as causas e efeitos motivados por ocorrências constatadas, e que acarretam ou podem acarretar sua indisponibilidade, em condições quase sempre não programadas. A manutenção corretiva se divide ainda em: emergência, urgência e programada conforme a necessidade no tempo.

C. Rejeição de Carga

Faz-se necessário estabelecer que a expressão “Rejeição de Carga” é utilizada no setor elétrico de duas formas diferentes. A primeira delas, comumente utilizada no meio industrial, se refere ao desligamento de cargas conectadas a uma rede de fornecimento de energia que pode ser alimentada pela rede da distribuidora e/ou também por geradores locais. Existem estudos de planejamento e equipamentos para execução da melhor sequência de desligamento de cargas para reduzir os efeitos causados sobre a tensão e a frequência de operação do sistema industrial de forma a ter um mínimo de prejuízo na relação entre a carga que foi desligada e a carga que pode permanecer operando.

Porém, neste Projeto de Pesquisa, a expressão “Rejeição de Carga”, quando utilizada, se refere ao desligamento de

linhas de distribuição (geralmente de tensão inferior ou igual a 69,0 kV) nas quais se encontram conectadas as PCH's. Neste caso, não se deseja estudar o planejamento para o desligamento, mas sim, os fenômenos causados nos equipamentos das PCH's devido à rejeição de carga com abertura intempestiva da linha de distribuição ou com a atuação dos disjuntores principais na conexão da central com a rede elétrica da concessionária.

D. Fenômenos Transitórios

São fenômenos de origem elétrica ou hidráulica que ocorrem na transição entre dois regimes permanentes, no caso da rejeição de carga, regime de operação com carga e regime sem carga. Em circunstâncias transitórias os equipamentos de uma PCH são submetidos a condições muito severas que ultrapassam suas capacidades nominais, sendo expostos a diversas solicitações mecânicas, elétricas, térmicas, etc.

Em ambos os sistemas, elétrico ou hidromecânico, é necessário determinar a amplitude e a duração dos fenômenos transitórios para conhecer as necessidades de proteção e dimensionamento dos equipamentos. No caso de sistemas elétricos que operam quase que a totalidade do tempo em regime permanente, a duração dos fenômenos é muito rápida da ordem de milissegundos a décimos de segundos e são chamados de transitórios elétricos. No caso de sistemas hidromecânicos, a duração dos fenômenos é maior, podendo chegar a minutos e são chamados de transientes hidráulicos.

Na rejeição de carga em PCH's, os transitórios elétricos manifestam-se de duas maneiras: sobretensões e formas de onda anormais. Os transitórios elétricos de duração temporária têm amplitude pequena inferior a 1,5 pu, enquanto que os transitórios de manobra têm amplitude maior até 3,5 ou 4,5 pu. Já os transientes hidráulicos manifestam-se através do golpe de aríete que é a propagação de variações de pressão em forma de ondas na tubulação entre turbina hidráulica em fechamento e o dispositivo acumulador de água a montante.

III. DESCRIÇÃO DOS FENÔMENOS ELÉTRICOS E HIDROMECAÑICOS

O primeiro fenômeno que desencadeia a ocorrência dos demais é o aparecimento de sobretensões elétricas imediatamente após a abertura de qualquer um dos terminais da linha de conexão ou dos disjuntores de entrada na PCH. Essas sobretensões elétricas vão provocar a atuação das proteções e o desligamento do estator do gerador, assim o rotor começa a girar livremente, as rotações se intensificam (o que provoca vibrações no equipamento) e faz surgir na turbina hidráulica uma sobrevelocidade indesejada. A atuação do regulador automático de velocidade para o fechamento das paletas do distribuidor restringe a vazão até que a turbina hidráulica desacelere e chegue a uma rotação razoável para atuação do freio físico (quando existe) acoplado ao eixo girante. Durante e após o fechamento do distribuidor, o fluxo d'água se reduz e surgem transientes hidráulicos com a propagação das diferenças de pressão em ondas na direção do acumulador de água (chaminé de equilíbrio, câmara de carga ou reservatório) e depois se refletem na direção da turbina hidráulica.

A. Fenômenos Elétricos

No caso proposto neste projeto, uma PCH está conectada ao sistema de distribuição da concessionária onde, de um lado tem-se a carga e a linha de distribuição com componente indutiva (na maioria das vezes) que será desligada, e, de outro, um sistema de potência de pequeno porte (a PCH) com uma impedância de curto-circuito. Nesse caso, a tensão da central é maior que a tensão da carga. O desligamento da carga, ou a rejeição de carga, resulta na interrupção da corrente e, portanto, no desaparecimento da queda de tensão na impedância de curto-circuito.

O tipo de carga e a relação entre sua potência e a potência de curto-circuito da PCH que a alimenta são fatores decisivos para a determinação da sobretensão por rejeição de carga. A compensação paralela pode ter forte influência nesse fenômeno afetando a potência de curto-circuito da central. Se existem linhas e transformadores em paralelo, os mesmos reduzem a amplitude da sobretensão. No entanto, no caso de PCH's conectadas aos sistemas de distribuição das concessionárias, é pouco provável que se encontre linhas e transformadores em paralelo.

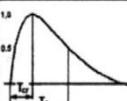
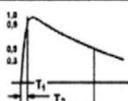
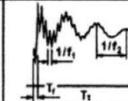
Classe	Transitório		
	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão			
Faixas de formas de tensão	$5000 \mu s \geq T_{cr} > 20 \mu s$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu s \geq T_1 > 0,1 \mu s$ $T_2 \leq 300 \mu s$	$100 \text{ ns} \geq T_1 > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$T_{cr} = 250 \mu s$ $T_2 = 2500 \mu s$	$T_1 = 1,2 \mu s$ $T_2 = 50 \mu s$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

Figura 1. Classes de Sobretensões Transitórias (adaptado de [8]).

Após a rejeição de carga, ocorre uma elevação instantânea da tensão, que é função das características do sistema elétrico e da tensão interna do gerador no instante da perda de carga. Estas sobretensões instantâneas ocorrem imediatamente após a rejeição de carga e o regulador de velocidade da turbina ainda não atuou. As sobretensões são quaisquer tensões entre fase e terra ($U_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$), ou entre fases ($U_m \sqrt{2}$), cujo valor de crista exceda o valor de crista deduzido da tensão máxima do equipamento. As sobretensões influenciam diretamente no isolamento dos equipamentos elétricos tanto interna como externamente. De acordo com a forma e a duração, elas podem ser divididas em classes conforme a figura 1.

B. Fenômenos Hidromecânicos

A rejeição de carga resulta na interrupção do torque elétrico resistente oferecido pelo gerador, em razão da redução de potência absorvida. Devido à atuação das proteções elétricas e o desligamento do estator do gerador, o rotor começa a girar livremente com o torque mecânico excedente, o

que faz surgir a aceleração da máquina e provocar o aumento instantâneo da rotação, a sobrevelocidade. Em condições normais de operação, após decorrido o intervalo de tempo de reação, o regulador automático de velocidade deve iniciar sua atuação. De forma perigosa para o grupo gerador, a não atuação ou a falha na contenção da sobrevelocidade pode levar a máquina a atingir a velocidade crítica de giro do eixo (velocidade de disparo), condição na qual a rotação máxima pode causar danos à unidade geradora. Esta velocidade de disparo ocorre quando não há nenhuma atuação do mecanismo de fechamento do distribuidor ou de válvula de controle de vazão e seu valor é proporcional a \sqrt{H} / D (razão entre a raiz da queda disponível pelo diâmetro externo do rotor). A sobrevelocidade influencia diretamente nos esforços mecânicos sobre os componentes da turbina, os mancais, o deslocamento angular do eixo e até a estrutura civil da casa de força. Estudos de estabilidade hidromecânica indicam que o ajuste do tempo de fechamento do regulador de velocidade deve permitir controlar a sobrevelocidade para não ultrapassar 35% da rotação nominal [1].

Com o início da atuação do regulador automático de velocidade, após a leitura da rotação excessiva, são enviados comandos de acionamento do servomotor que movimenta o mecanismo de fechamento do distribuidor. Dependendo do tipo de regulador o comando é feito via deslocamento de pistões por pressão exercida pela injeção de óleo através de motobombas ou, nos mais modernos, por sinais elétricos que são traduzidos em amplitudes diferentes de deslocamento. A medida que as palhetas do distribuidor vão fechando, o fluxo que escoava em regime permanente com uma determinada distribuição de pressões se reduz e passa a escoar em regime transitório ocasionado pela redistribuição de pressões no interior da turbina hidráulica, no tubo de sucção e no conduto forçado, dando origem aos transientes hidráulicos e à sobrepressão na turbina e na tubulação forçada. A propagação dessas variações de pressão, que ocorre em forma de ondas, é o que comumente chama-se de golpe de aríete. O fechamento do distribuidor acarreta a interrupção do escoamento e sua energia cinética deve ser dissipada, transformando-se em energia de pressão e de deformação das paredes da tubulação. A variação de pressão deforma o material da tubulação, acarretando variação de suas dimensões. A tubulação é deformada elasticamente quando a variação de pressão é pequena, mas pode sofrer deformações plásticas, ou se romper, quando a variação de pressão for grande.

O ponto mais importante da análise dos transientes hidráulicos é conhecer a geometria do circuito hidráulico. Durante o cálculo de transientes é possível determinar duas variáveis: tempo de fechamento do distribuidor e inércia do conjunto girante (GD^2), de forma a buscar valores recomendados de sobrepressão e sobrevelocidade. Com um tempo de fechamento relativamente lento do distribuidor, tem-se como resultado uma diminuição da sobrepressão, porém um aumento da sobrevelocidade. Se não é possível diminuir o tempo de fechamento para solucionar o problema da sobrevelocidade, pois isto tenderia a elevar a sobrepressão, a solução é aumentar a inércia do conjunto girante, a fim de manter em valores aceitáveis, também, a sobrevelocidade.

IV. A VIDA ÚTIL E OS EFEITOS INDESEJÁVEIS CAUSADOS SOBRE OS EQUIPAMENTOS DE PCH'S

Ao longo do projeto foram realizadas simulações com *softwares* utilizados pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) para modelar o comportamento dos transitórios elétricos provocados pela rejeição de carga. Também foram feitas simulações com programas desenvolvidos em linguagem Fortran para modelar o comportamento dos transientes hidráulicos. Os ensaios em laboratório no LHPCH (Laboratório Hidráulico de Pequenas Centrais Hidrelétricas da UNIFEI) permitiram a reprodução do golpe de aríete conforme bancada e gráfico ilustrados nas figuras 2 e 3, além da reprodução da rejeição de carga conforme microcentral e gráfico ilustrados nas figuras 4 e 5. Também foram realizados ensaios na central hidrelétrica Pirambeira de propriedade da AES Tietê no município de Baependi, MG. Os resultados das simulações e dos ensaios foram analisados pela equipe de pesquisadores para avaliar quais são os efeitos indesejáveis que a rejeição de carga causa sobre os equipamentos de PCH's.

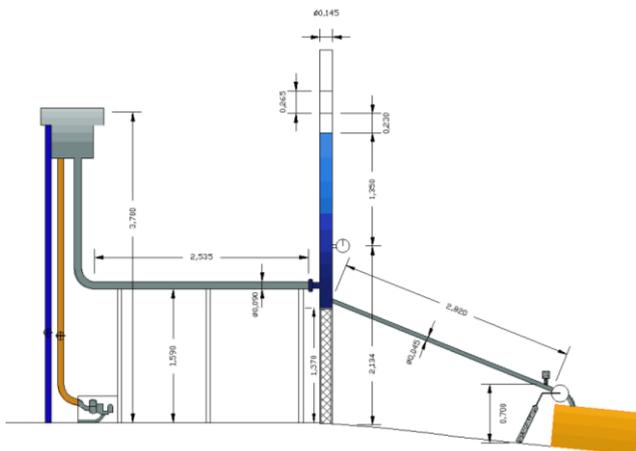


Figura 2. Desenho Esquemático da bancada para ensaio do Golpe de Aríete.

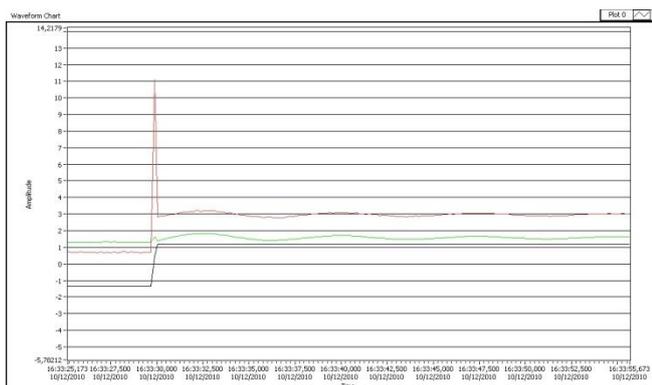


Figura 3. Gráfico de Pressão e Vazão com os dados do ensaio.

No caso dos equipamentos elétricos, o estudo se ateve ao pára-raio, seccionador, disjuntor, transformador de potência e gerador. Enquanto no caso dos equipamentos hidromecânicos, o estudo considerou o eixo turbina-gerador, a turbina hidráulica, o tubo de sucção, o regulador de velocidade e o conduto forçado. As principais observações sobre a vida útil e sobre os efeitos indesejáveis causados pela Rejeição de Carga são descritos por equipamento a seguir.



Figura 4. Microcentral de 5 kW do LHPCH UNIFEI.

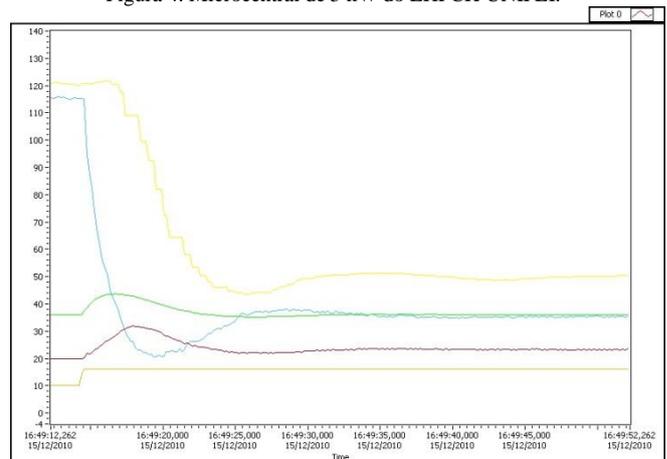


Figura 5. Gráfico de Pressão, Vazão, Rotação e Abertura do Distribuidor com os dados do ensaio de Rejeição de Carga.

A. Pára-Raios

Os pára-raios utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente com a sua vedação. A qualidade da vedação é um problema tecnológico e de custo, pois encarece demais o preço final do equipamento. Os pára-raios tradicionalmente utilizados para tensões elevadas (proteção de linhas de transmissão e subestações), conforme [2], têm expectativa de vida não inferior a 15 anos.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar surtos de tensão de curta duração, mas que não alcançam a magnitude projetada para os pára-raios. Dessa maneira, mesmo quando expostos freqüentemente aos desligamentos, não se é esperada alteração em suas características de operação. Por outro lado, parte das causas de rejeição de carga são descargas atmosféricas ocorridas ao longo da linha de distribuição que conecta a central e, nesse caso, os pára-raios são solicitados a atuar da forma como foram projetados.

Construtivamente, os pára-raios instalados em PCH's são dos tipos com centelhadores (espaçamentos internos em ar) ou sem centelhadores (construído a óxido metálico). Os pára-raios estão sujeitos a envelhecimento frente às solicitações de descarregar amplitudes elevadas de corrente e energia. Nos pára-raios com centelhadores, estas solicitações os impactam fortemente. Descargas sucessivas conduzem à erosão dos eletrodos dos centelhadores e deste modo determinam a redução da vida útil dos pára-raios. Os pára-raios

sem centelhadores, por estarem submetidos diretamente à tensão fase-terra, deviam ser mais afetados ainda, no entanto durante a pesquisa não se encontrou registros de problemas de degradação, o que parece ter sido melhor controlado pelos fabricantes que, geralmente, são maiores e dispõem de maior capacidade tecnológica.

Ressalta-se que a tecnologia utilizada pelos fabricantes para produzir os pára-raios é o principal fator que pode reduzir a vida útil, já que a vedação de um pára-raios é o fator determinante. Na maioria das falhas com pára-raios, é detectada a presença de água em seu interior, devido à perda de vedação. A qualidade de seus sistemas de vedação é determinada pelo acabamento superficial das partes a serem vedadas, invólucro e flanges, pela qualidade do material da gaxeta e pela aplicação da correta tensão de serviço à gaxeta que tem que ser inferior ao valor de esmagamento, durante qualquer etapa do processo de manufatura.

Tendo em vista a importância do invólucro dos pára-raios em sua vida útil, a porcelana utilizada deve possuir um acabamento isento de fissuras, rachaduras, bolhas ou carbonizações decorrentes de defeitos de fabricação, falhas no transporte ou instalação inadequada. Esses cuidados devem ser tomados para evitar que a sua superfície externa fique mais susceptível aos efeitos do meio ambiente onde o pára-raios será instalado, tais como penetração de umidade e poluição. Além dos invólucros em porcelana, alguns fabricantes produzem isoladores compósitos, que são mais leves, mais baratos e têm excelente capacidade hidrofóbica (rejeição à água). Esta combinação os torna ideais para serviços em áreas poluídas. Contudo, estes novos materiais ainda não têm uma vida útil tão longa quanto à porcelana, pois sofrem degradação pelas condições climáticas.

A obsolescência tecnológica normalmente acontece quando se trata de PCH's construídas a mais de vinte anos, quando a disponibilidade de tecnologias adequadas para a fabricação destes equipamentos era restrita. Naquela época, a maioria dos pára-raios era constituída de blocos de resistores não-lineares à base de carboneto de silício, construídos de forma rudimentar. Atualmente, quase todos os pára-raios adquiridos pelas empresas concessionárias de energia elétrica para novos projetos de subestações, para ampliações de subestações existentes ou para substituição dos pára-raios convencionais são do tipo óxido de zinco sem centelhadores.

B. Seccionadores

Os Dispositivos de Manobra – Seccionadores utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente com o desgaste de seus contatos e as avarias mecânicas. A operação dos seccionadores em carga para as correntes de magnetização de transformadores de potência e reatores, ou ainda correntes capacitivas, provoca o desgaste. Outros fatores, que comprometem as características técnicas e as propriedades mecânicas destes equipamentos, são a violação dos limites admissíveis de temperatura e os esforços mecânicos aos quais sejam submetidos. A avaliação da vida útil de um seccionador, baseada nas características mecânicas e elétricas do equipamento, bem como na realização periódica de manutenção preditiva, conforme [2], pode resultar numa expec-

tativa de vida não inferior a 40 anos.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar desgaste nos contatos dos seccionadores, mas são de pequena ordem e não chegam a ser classificados como danos. A corrente elétrica rapidamente se anula, uma vez que mediante a abrupta variação de tensão ocorrida na rejeição de carga, outros equipamentos de proteção são induzidos a atuarem antes. Como estes Dispositivos de Manobra são destinados a estabelecer ou interromper corrente no circuito elétrico por meio de contatos separáveis, se operados sob carga, naturalmente sofrerão desgastes. Então a maior fonte de comprometimento da vida útil dos seccionadores são manobras executadas incorretamente ou avarias mecânicas decorrentes de acidentes causados por má-fixação, colisão de partes móveis em acidentes com operadores e ação de intempéries.

Em relação à exposição, não é comum a utilização destes dispositivos expostos à ação de intempéries e, quando estão, naturalmente é tomado o cuidado de se utilizar o tipo adequado, “de uso exterior”, projetado para suportá-las. Os seccionadores de uso externo estão sujeitos à ação do vento, devendo suportar até 700 Pa e a ação do calor devendo suportar temperatura máxima do ar ambiente de 40 °C e valor médio de 35 °C num período de 24 horas. Enquanto que os seccionadores de uso abrigado devem suportar valor médio de 95% de umidade relativa e 2200 Pa de pressão de vapor, medidos durante período de 24 horas.

Em relação à tecnologia de fabricação, os seccionadores tripolares de abertura central devem ser fabricados de forma a permitir um controle efetivo sobre a lâmina com um mínimo de esforço mecânico nos isoladores. Os contatos devem ser projetados e construídos para que as elevações de temperatura especificadas não sejam atingidas com o seccionador conduzindo a corrente nominal em operação contínua. Os isoladores de porcelana, bem como os de resina polimérica, devem ter acabamento liso, isento de fissuras, rebarbas, asperezas, estrias, porosidade, imperfeições ou inclusões de materiais estranhos que comprometam o seu desempenho e afetem a vida útil do seccionador. Conforme [7], a especificação técnica deve garantir que os isoladores estejam aptos a fazer parte do equipamento e tenham sido aprovados em ensaios.

C. Disjuntores

Os Dispositivos de Manobra – Disjuntores utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente com avarias mecânicas na câmara de interrupção que possam provocar vazamento do dielétrico ou desfazer o vácuo. Outro fator, que compromete as características técnicas e as propriedades mecânicas destes equipamentos, é a violação dos limites admissíveis de temperatura e umidade aos quais sejam submetidos. Obviamente, dependendo da tecnologia do equipamento, sua vida útil também será influenciada pelas condições de serviço em relação às condições nominais de tensão, corrente e níveis de curto-circuito, pela frequência das operações de abertura e fechamento e pelas condições de manutenção ao longo de sua utilização. A avaliação da vida útil de um disjuntor, baseada nas características mecânicas e

elétricas do equipamento, bem como na realização periódica de manutenção preditiva, conforme [2], pode resultar numa expectativa de vida entre 20 e 25 anos para tensão inferior a 69 kV, embora os fabricantes, em geral, não expressem claramente a vida útil desses equipamentos.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar desgaste, e até mesmo danos, nos disjuntores em função de serem solicitados a interromper a passagem da corrente elétrica rapidamente, pois a seletividade da proteção é ajustada para atuação dos disjuntores mediante a abrupta variação de tensão e de frequência, ocorrida na rejeição de carga. Como estes dispositivos de manobra são destinados a estabelecer ou interromper corrente no circuito elétrico por meio de contatos separáveis mergulhados em material dielétrico, naturalmente sempre que operados sofrerão desgastes. As diversas condições especiais, como as operações de interrupção das correntes de curtos-circuitos, impõem grandes esforços elétricos, térmicos e mecânicos aos disjuntores, sobretudo em suas partes componentes, originando assim as principais causas de danos sobre estes equipamentos, por isso a razão de sua robustez construtiva.

Então a maior fonte de comprometimento da vida útil dos disjuntores é a frequência de atuação ou de manobra executada por eles para interrupção de corrente. Por isso, é fundamental que o dimensionamento físico do disjuntor seja compatível com os níveis dinâmico, transitório e permanente dos esforços que lhe são impostos durante suas operações, valores esses que devem constar em suas especificações técnicas, a fim de se evitar danos térmicos, elétricos e/ou mecânicos em quaisquer de suas partes componentes.

No interior dos disjuntores está a câmara de interrupção onde se efetuam as ações elétricas de abertura e fechamento do circuito. Na câmara, um ou mais pares de contatos, fixos ou móveis, realizam mecanicamente a abertura ou o fechamento da corrente elétrica entre dois terminais do sistema, eliminando o arco voltaico estabelecido entre eles durante o processo de manobra. Existem vários tipos de formatos de câmara de interrupção específicos de cada fabricante. As placas que formam a câmara podem ser de material isolante, de aço, ou ainda, de uma combinação dos dois.

Durante uma operação de abertura, ocorre uma elevação de temperatura na câmara em decorrência do arco voltaico que, dependendo dos níveis da corrente a ser interrompida e do valor da resistência de arco gerada, pode assumir valores da ordem de 1000 °C ou mais, impondo um esforço térmico altamente estressante aos contatos do disjuntor e ao dielétrico. Observa-se que, pelo fato de o arco voltaico ser quase que puramente resistivo, a potência a ser dissipada pela corrente desse arco é quase que puramente ativa, ou seja, seu efeito é o de dissipação térmica por efeito joule, ocorrendo diretamente sobre os componentes envolvidos.

A extinção do arco voltaico se dá pela presença do material dielétrico que atua resfriando a câmara, abaixando a temperatura interna, minimizando os riscos e as ações de desgastes. Os materiais dielétricos utilizados são os óleos isolantes (naftênico ou parafínico), o ar seco ou o ar comprimido (“magnetic air-blast circuit breaker”), o vácuo e o gás SF₆ (Hexafluoreto de Enxofre). O arco entre os contatos

principais é impelido por efeitos térmicos e magnéticos na direção da câmara. Através da bobina geradora de campo magnético, é produzido um campo que força a divisão do arco em dois e o impele para dentro das paredes múltiplas da câmara.

D. Transformadores de Potência

Os Transformadores de Potência utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente à deterioração de sua isolamento ao longo do tempo. Outro fator, que compromete as características técnicas e as propriedades elétricas destes equipamentos, é a violação dos limites admissíveis de carga e temperatura aos quais estejam submetidos durante a operação. Os transformadores são dimensionados para funcionarem sob determinadas condições de carga e temperatura dos enrolamentos acima da temperatura ambiente. Quando operam com cargas e temperaturas acima dos valores especificados, têm sua vida útil afetada, reduzindo a expectativa de vida devido à deterioração da isolamento. Para operações sob condições de carga máxima, é indispensável a existência e o correto funcionamento dos equipamentos auxiliares no sistema de resfriamento, as bombas e os ventiladores, sem os quais a temperatura do óleo isolante sofrerá elevação que comprometerá suas condições. A vida útil dos transformadores de potência também é influenciada pelas condições de serviço em relação às condições nominais de tensão, pois casos como a rejeição de carga que provocam o surgimento de sobretensões no sistema elétrico também afetam os enrolamentos do transformador. Considerando tudo isso a expectativa de vida útil destes transformadores de potência pode chegar a 30 anos, conforme [2].

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar desgaste nos enrolamentos dos Transformadores de Potência e deterioração da isolamento, ambos pela frequência das interrupções. Como estes equipamentos são destinados a elevar a tensão da energia gerada na PCH até o patamar de transmissão por meio de enrolamentos mergulhados em meio isolante, naturalmente sempre que ocorrerem variações bruscas na tensão e frequência, eles sofrerão desgastes. As diversas condições especiais, como o funcionamento com cargas superiores às máximas admitidas podem limitar a operação impondo grandes esforços térmicos e de pressão aos transformadores, sobretudo em suas partes componentes, originando assim as principais causas de danos sobre estes equipamentos. Por isso a razão de sua robustez construtiva em relação à capacidade térmica dos enrolamentos, capacidade do sistema de refrigeração, capacidade de expansão do líquido isolante e de suportar pressão nas unidades seladas.

Então as maiores fontes de comprometimento da vida útil dos transformadores são a frequência de operação em regime de sobrecarga e de ocorrência de sobretensões. Por isso, é fundamental que o dimensionamento físico do transformador seja compatível com as condições especiais de funcionamento e instalação. Colaboram também para a redução da vida útil, a exposição à umidade excessiva ou à atmosfera salina, exposições a materiais explosivos, vibrações anormais, choques, dentre outras.

No interior dos transformadores estão os enrolamentos e o material isolante, que deve apresentar elevada resistência de isolamento. O material utilizado é o óleo mineral. A fonte primária de produção do óleo mineral é o petróleo. Os óleos isolantes são produzidos a partir de óleos crus de base naftênica ou parafínica, e quando utilizados em transformadores executam dupla função. Como fluido responsável pela refrigeração do equipamento, os óleos isolantes diminuem as perdas elétricas do equipamento e contribuem com o prolongamento da vida útil do transformador ao fazer com que esse opere em temperaturas menores. Como líquido isolante elétrico (dielétrico), os óleos isolantes propiciam o meio adequado para garantir a transformação de tensão.

Em uso externo nas subestações ou em uso abrigado dentro das casas de força de PCH's, os transformadores se destinam a transformar a tensão de geração (geralmente de 2,3 a 13,8 kV) em tensão de distribuição (superiores ou iguais a 13,8 kV). Mas na ocorrência da rejeição de carga, durante a fração de tempo anterior à atuação dos disjuntores, a condição imposta pelo sistema é de sobretensão transitória com frequência diferente da nominal, que se não interrompida pelos disjuntores pode provocar sérios danos aos enrolamentos do transformador.

E. Geradores Síncronos

Os Geradores Síncronos utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente com o aquecimento que pode provocar deterioração do isolamento das máquinas. Outro fator, que compromete as características técnicas e as propriedades mecânicas destes equipamentos, é a violação dos limites admissíveis de umidade aos quais sejam submetidos. Obviamente, dependendo da tecnologia do equipamento, sua vida útil também será influenciada pelas condições de serviço em relação às condições nominais de tensão, corrente e níveis de curto-circuito, pela frequência das operações de partida e parada, e pelas condições de manutenção ao longo de sua utilização. A vida útil do gerador está intimamente ligada à elevação de temperatura durante sua operação e ao limite imposto pela sua classe de isolamento. Segundo a Lei de Montisinger, operações com 8 a 10 °C acima da temperatura limite reduzem a vida útil do equipamento pela metade. Além da temperatura de operação, deve-se também atentar para a altitude local em que o equipamento irá operar, posto que a eficiência das técnicas de resfriamento diminui com a altitude, deve-se esperar que a potência máxima possível de ser extraída também sofra uma redução. Dos casos de centrais hidrelétricas em operação a mais tempo, verifica-se que os geradores elétricos podem chegar a mais de 50 anos, mas muitos deles tiveram suas operações interrompidas ao longo deste tempo. A expectativa é de que a vida útil dos geradores, conforme [2], esteja em torno de 30 anos.

Durante a pesquisa, concluiu-se que o aquecimento excessivo provocado pela frequência das interrupções por rejeição de carga, que provocam variação excessiva da tensão e da frequência em relação aos valores nominais, é o fator que mais tem influência na vida útil por causar um envelhecimento mais acelerado do isolamento. Como estes equipamentos são destinados a operar com um comportamento

constante entre a frequência da tensão e a velocidade, naturalmente sempre que ocorrerem variações bruscas na tensão e na velocidade de rotação, eles sofrerão desgastes. As diversas condições especiais, como o funcionamento com tensões superiores a 105% da nominal ou exposição a correntes de curto-circuito superiores a vinte vezes o valor eficaz da corrente nominal, ou a ocorrência de curto-circuito trifásico por mais de 3 segundos, podem limitar o funcionamento correto do equipamento, elevando os limites de temperatura em mais de 5°C.

As partes fixas de um gerador são denominadas de estator e as partes móveis de rotor. O estator compõe-se de Carcaça, Núcleo da Armadura e Enrolamentos do Estator. Enquanto que o rotor encontrado em PCH's, geralmente do tipo pólos salientes compõe-se de: Anel magnético – construído com chapas lisas de aço, empilhadas e aparafusadas juntas de modo a formar uma estrutura sólida; Aranha - consiste em um cabo fundido, forjado ou soldado com braços conectados; Eixo - normalmente de aço forjado, usinado e tratado termicamente para suportar os outros elementos girantes. A tensão gerada varia em função da velocidade do rotor e do fluxo magnético, que por sua vez depende da corrente de excitação - ou de campo. As correntes de carga fluem do estator para o exterior por conexões rígidas, permanentes. A frequência das tensões induzidas é devida exclusivamente à velocidade de rotação dada ao rotor e ao número de pólos, enquanto que a intensidade das tensões, além de depender da velocidade, depende também da intensidade do campo do rotor. Durante a operação normal de um gerador síncrono, além do seu peso próprio, existe uma força de regime contínuo, solicitada à base do mesmo. Esta solicitação é agravada na ocorrência de faltas (curto-circuito de diversas naturezas), de rejeições de carga com perda do sincronismo ou de paralelismo errôneo. Sendo assim, as estruturas e bases de um gerador elétrico devem ser cuidadosamente calculadas, considerando tais eventualidades a fim de suportar os esforços em todas as condições possíveis.

F. Eixo Turbina-Gerador

Os Eixos de Turbina-Gerador utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente às vibrações às quais ficam expostos, o principal problema que pode levar à redução da vida útil deste equipamento. Quando da exposição da linha de eixo turbina-gerador a uma rejeição de carga e, conseqüentemente, a um torque hidráulico que provoque a sobrevelocidade, sempre superior à rotação nominal, a vida útil deste equipamento pode ser comprometida. Isso ocorre devido ao surgimento de indesejáveis vibrações que provocarão o mau funcionamento do acoplamento entre os rotores da turbina e do gerador, levando à deflexão entre os segmentos de eixo e gerando aumento de atrito e sobreaquecimento.

Outros fatores que comprometem as características técnicas e as propriedades mecânicas destes equipamentos são a inércia, a rigidez e o amortecimento da unidade geradora. Os elementos que determinam a inércia do sistema são o rotor da turbina, o gerador e os segmentos de eixo. Estes mesmos componentes também influem na rigidez, assim como o filme de óleo dos mancais, as carcaças dos mancais, os seus

suportes, as fundações e o empuxo eletromagnético. Por fim, o amortecimento é causado pelo filme de óleo, pelos labirintos do rotor e pelo amortecimento estrutural. O que é essencial para que se possa compreender as exigências sobre a linha de eixo é conhecer a dinâmica dos rotores de turbina e de gerador e as particularidades dos geradores síncronos. Conforme [3] e [5] há necessidade de se considerar também os suportes e fundações onde estão montados os mancais, pois eles alteram os valores de rigidez equivalente que se deve utilizar.

Obviamente, dependendo da tecnologia do equipamento, sua vida útil também será influenciada pelas condições de serviço em relação às condições de projeto. Com a evolução da tecnologia das turbinas hidráulicas, que têm se tornado cada vez mais leves, há um aumento das forças hidrodinâmicas, das forças inerciais e de desbalanceamento, tanto mecânico como eletromagnético e hidráulico. Com isto, o nível de vibrações nas máquinas tende a aumentar, o que faz com que seja indispensável que a linha de eixo turbina-gerador garanta com precisão o bom funcionamento do acoplamento. Em função das condições de serviço e de uma manutenção adequada, a expectativa de vida útil de um Eixo pode chegar aos mesmos 30 anos do gerador.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar desgaste em função das vibrações e temperaturas as quais o acoplamento turbina-gerador é submetido. A frequência das operações de partida e parada e as condições de manutenção ao longo de sua utilização, naturalmente provocam variações bruscas de atrito e sobreaquecimento, conseqüentemente desgastes. Como o funcionamento de PCH's em pontas do sistema de distribuição fica muito sujeito à rejeição de carga, a operação dos equipamentos destas centrais recebe uma carga de esforços maior do que o normal, indicando a necessidade de atenção mais cuidadosa com o Eixo e seus acessórios: mancais de escora, mancais-guia, óleo, suportes e a fundação.

Em uma rejeição de carga, por razões diversas, o gerador é subitamente desconectado da rede elétrica e desmagnetizado, fazendo com que o torque nele desapareça e o torque mecânico, sem nenhum esforço que o equilibre, acelere a turbina. Ao detectar o aumento da rotação, o regulador de velocidade fecha o distribuidor ou os injetores, reduzindo o torque no rotor até que a máquina possa ser completamente parada pelo freio mecânico posicionado no gerador. A máxima rotação atingida nesta condição é denominada sobrevelocidade, sendo sempre superior à rotação nominal.

Os principais parâmetros que influenciam a linha de eixo são os valores de velocidades angulares críticas e os fatores dinâmicos de amplificação de deslocamento correspondentes. Uma dada velocidade angular crítica se caracteriza por ser a frequência de excitação das forças de desbalanceamento mecânico, magnético ou hidráulico, para a qual ocorre ressonância com a frequência natural dos modos de vibrar.

Outro fator que agrava a vida útil de elementos girantes é a flexão do eixo que pode ser causada pela descentralização entre os apoios do eixo, ou por um esforço radial aplicado a este. A flexão de um eixo em rotação provoca esforços alternados de tração e compressão a cada giro. Nos casos em que a tolerância de deslocamento radial do eixo seja estreita,

pode-se inserir-se um maior número de mancais de apoio, tendo, estes, rigidez suficiente para que não ocorra deformação além do permissível para o eixo.

G. Turbina Hidráulica

As Turbinas Hidráulicas utilizadas em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente aos fenômenos de cavitação, vibração e tensão de cisalhamento que podem provocar a deterioração ou ruptura do material do qual é feito cada componente das máquinas. Outro fator, que compromete as características técnicas e as propriedades mecânicas destes equipamentos, é a violação dos limites admissíveis de operação aos quais sejam submetidos. Obviamente, dependendo da tecnologia do equipamento, sua vida útil também será influenciada pelas condições de serviço em relação às condições nominais, pela frequência das operações de partida e parada, e pelas condições de manutenção ao longo de sua utilização. A vida útil da turbina hidráulica está intimamente ligada à realização periódica de manutenções preditivas e preventivas, dependendo da seleção adequada da máquina quando em projeto e da correta instalação. Existem várias centrais hidrelétricas com turbinas operando a mais de 60 anos e em bom estado. Como existem fatores inesperados que podem diminuir a vida da turbina, um valor da vida útil econômica de 40 anos, conforme [2] é bastante aceitável.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar esforços de cisalhamento nas palhetas móveis do distribuidor e em todas as peças de fixação da mesmas, além de causar o surgimento de pressões indesejáveis no interior da caixa espiral e do rotor que podem levar à cavitação. Como estes equipamentos são destinados a transformar a energia e dependem de uma correta geometria, naturalmente sempre que ocorrerem variações bruscas de pressão e esforços de cisalhamento, eles sofrerão desgastes. A frequência das interrupções devidas à rejeição de carga impõe grandes esforços aos componentes das turbinas hidráulicas limitando sua vida útil.

Conforme [4], quando da fase de projeto, a base para a definição mecânica da turbina é o conhecimento do contorno hidráulico do modelo e da faixa operacional do aproveitamento hidráulico. O correto contorno pode assegurar a eficiência da turbina hidráulica enquanto que a faixa de operação permitirá fazer as verificações de das diversas solicitações mecânicas. A análise estrutural no projeto de uma turbina hidráulica consiste de verificação das espessuras das virolas da caixa espiral e da tampa da turbina, verificação dos perfis do rotor, dimensionamento do mecanismo do distribuidor com seleção do servomotor do acionamento. Em casos em que o carregamento é superior aos valores previamente definidos, é realizada uma análise estrutural através de cálculo de elementos finitos. Nesta situação é verificada a necessidade de aumento de espessura das chapas das virolas e da tampa, além de verificar se o distribuidor suporta os esforços mecânicos. No caso das virolas e da tampa, pode-se recorrer ao aumento da espessura, mas no caso do distribuidor deve-se estudar as alternativas de materiais e/ou processos de fabricação especiais.

É de grande relevância no projeto do distribuidor e do

pré-distribuidor escolher um perfil aerodinâmico adequado, isso porque além do problema da cavitação, vórtices gerados pelos bordos de fuga (na saída das palhetas) devido a um projeto aerodinâmico inadequado tendem a gerar vibrações que dependendo da sua intensidade podem reduzir drasticamente o tempo de vida útil devido à fadiga das palhetas. O problema de trincas devido a vibrações em palhetas do distribuidor exige que se selecione materiais adequados para resistir a estes esforços, pois mesmo com a tecnologia em simulações existente é difícil prever este tipo de problema.

Em geral, o carregamento crítico que se tem nos componentes das turbinas hidráulicas, ocorre durante uma rejeição de carga. Neste momento a máquina tende a aumentar sua rotação e o distribuidor começa a atuar, fechando a passagem de água e provocando o golpe de aríete no conduto forçado com elevação da pressão que atuará na caixa espiral e no distribuidor da turbina, que devem estar corretamente dimensionados para suportar este esforço. Destes dois, o componente da turbina que se mostra mais crítico é o distribuidor, pois na fase de projeto não se tem a liberdade de alterar seu dimensional como no caso da caixa espiral, em que é possível alterar a espessura a fim de resistir a esforços de pressão sem modificar as condições de operação da turbina. Durante a rejeição de carga o conjunto de palhetas móveis do distribuidor deve restringir o fluxo d'água a fim de se controlar a rotação da máquina ou até mesmo levar à completa interrupção do fluxo d'água. Durante esse processo, tem-se como esforço principal atuante uma tensão de cisalhamento aplicada na seção transversal do eixo de movimentação do distribuidor.

H. Tubo de Sucção

O Tubo de Sucção utilizado em turbinas hidráulicas de PCH's tem sua vida útil relacionada diretamente aos fenômenos de diferença de pressão do fluido em seu interior que podem provocar deterioração do material do qual é feito. Obviamente, dependendo da tecnologia do equipamento, sua vida útil também será influenciada pelas condições de serviço em relação às condições nominais, pela frequência das operações de partida e parada, e pelas condições de manutenção ao longo de sua utilização. A vida útil do tubo de sucção deve ser a mesma prevista para as turbinas hidráulicas, uma vez que o mesmo deve ser entendido como parte integrante, podendo chegar a 40 anos.

As diversas condições especiais, como o funcionamento fora das condições nominais e a rejeição de carga, podem limitar a operação impondo grandes esforços aos tubos de sucção devido à formação do vórtice de núcleo que nasce na saída da turbina e atravessa o tubo de sucção. O vórtice de núcleo gerado é uma helicóide que gira em torno do eixo do tubo de sucção. Na helicóide existem linhas de corrente (ou filamentos) girando em torno do próprio eixo do núcleo da helicóide. Para cargas parciais o vórtice gira na mesma direção do rotor, e para sobrecargas o vórtice gira em sentido contrário ao rotor. Este vórtice de núcleo ocorre devido à componente tangencial da velocidade absoluta na saída da turbina. A formação do núcleo de vórtice é mais notório quando a carga se afasta mais da carga nominal.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar o surgimento de vórtices e pressões indesejáveis no interior do tubo de sucção. Como estes equipamentos são destinados a reduzir a pressão na saída do rotor através do retardamento do fluxo dependem de uma correta geometria e, naturalmente, sempre que ocorrem variações bruscas de pressão, o material do tubo de sucção pode sofrer desgaste. A frequência das interrupções devidas à rejeição de carga impõe grandes esforços aos tubos de sucção, pois aumentam a pressão no interior das turbinas hidráulicas o que exige suportar maiores esforços mecânicos, além de provocarem o surgimento de vórtices no centro do tubo de sucção que levam à cavitação.

Nas proximidades do eixo da helicóide existem forças centrífugas que dão origem a um gradiente de pressões em direção ao centro deste eixo. Desta maneira, a pressão diminui na direção perpendicular ao eixo da helicóide. Quando a pressão média na entrada do tubo de sucção é baixa, existe a possibilidade de que a pressão na helicóide alcance a pressão de saturação e, assim, se formará uma cavidade com mistura de vapor e gás em torno do eixo da helicóide. A cavitação por vórtice ocorre devido à pressão absoluta decrescer no centro da helicóide para valores próximos aos da pressão de vapor. Em condições de cavitação o fluido dentro do tubo de sucção é formado por uma mistura de líquido e vapor. A densidade é muito variada pela existência do vapor, o que pode influenciar na velocidade da onda e amplitude das flutuações. Este tipo de cavitação é responsável por grandes erosões e vibrações que podem acontecer não só no tubo de sucção como no rotor e nas pás. A indicação da cavitação por vórtice é facilmente verificada, pois a mesma é a responsável pelo surgimento de ruídos intensos (semelhantes a tiros) no tubo de sucção.

I. Regulador de Velocidade

Os Reguladores de Velocidade utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente com o acionamento e a atuação dos servomotores sobre o distribuidor da turbina e pelas condições de manutenção ao longo de sua utilização. Obviamente, o caso dos reguladores de velocidade é diferenciado, pois sua vida útil parece estar mais ligada à obsolescência da tecnologia dos equipamentos mecânico-hidráulicos ou elétrico-hidráulicos, instalados nas pequenas centrais antes do desenvolvimento das novas tecnologias e que tem atuação limitada em relação aos novos reguladores de velocidade digitais. A vida útil do regulador de velocidade pode chegar a 30 anos.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga podem causar desgaste no acionamento e na atuação dos servomotores pela frequência das interrupções. Como estes equipamentos são destinados a minimizar os efeitos sobre as unidades geradoras, naturalmente sempre que ocorrerem rejeições de carga, é indispensável sua atuação de forma eficaz para que a turbina hidráulica não atinja a condição de disparo. Em função dos reguladores mecânico-hidráulicos estarem mais susceptíveis à redução da vida útil devido à dificuldade de manutenção e de calibração, os mesmos têm sido substituídos pelos regulado-

res eletrônicos, que apresentam extrema flexibilidade.

Nas PCH's em operação a mais tempo, é comum encontrar os reguladores de velocidade mecânico-hidráulicos que utilizam óleo como fluido de controle para movimentar os servomotores. Em casos raros de instalações de pequenas centrais hidrelétricas podem ser encontrados acionamentos com motores elétricos alimentados por inversores de frequência. Unidades mais modernas de reguladores de velocidade tradicionais são os reguladores elétrico-hidráulicos dotados de sensores elétricos, onde o mecanismo centrífugo é substituído por um dispositivo elétrico e os ajustes da malha de controle utilizam técnicas eletrônicas para os ganhos que facilitam a implementação de técnicas de estabilização.

Se nos reguladores mecânico-hidráulicos e nos elétrico-hidráulicos, os componentes hidráulicos de potência faziam parte do regulador, era desejável desvincular o regulador propriamente dito dos atuadores, isto é, da parte que executa os comandos e que age sobre o distribuidor. Assim, a configuração mais moderna do regulador de velocidade é o eletrônico com servoposicionador que tem na saída um sinal elétrico reproduzido e transformado em um deslocamento do dispositivo servoposicionador, permitindo ao regulador oferecer maior flexibilidade para que sejam atendidas as várias condições de funcionamento. A última tecnologia de reguladores de velocidade eletrônicos são os controladores lógico programáveis (CLP's) digitais com regulação PID (proporcional, integral e derivativa, juntas numa mesma função de transferência). Pode-se afirmar que atualmente o controle de velocidade para novas instalações de turbinas hidráulicas é quase que exclusivamente realizado com controladores do tipo PID implementados em computadores digitais ou em CLP's. Os controladores mecânico-hidráulicos ou eletrônicos-analógicos implementados antes do advento do controlador PID digital estão sendo gradativamente substituídos.

São os equipamentos reguladores mecânico-hidráulicos de tecnologia mais antiga que requerem maior atenção em relação à vida útil quando expostos aos fenômenos de rejeição de carga. Seu princípio de funcionamento é baseado em atuar mecanicamente para acionamento do servomotor. Isto faz com que maiores esforços sejam despendidos para a execução da regulação.

J. Conduto Forçado

Os Conduitos Forçados utilizados em PCH's têm sua vida útil relacionada diretamente com a resistência ao fenômeno do golpe de aríete que pode provocar sua ruptura e com a corrosão que pode provocar deterioração do material do qual é feito. Outro fator, que compromete as características técnicas e as propriedades mecânicas destes equipamentos, é a violação dos limites admissíveis de operação aos quais sejam submetidos. Obviamente, sua vida útil também será influenciada pelas condições de manutenção ao longo de sua utilização. Apesar da relativa simplicidade construtiva do conduto e do mesmo não possuir peças girantes, cabe ressaltar que problemas no conduto podem afetar a operação ou até mesmo tornar indisponível a central hidrelétrica, chegando ao ponto de ser necessária a substituição completa do equipamento. A adoção de uma vida útil econômica de 30

anos pode parecer conservativo, no entanto, considera-se adequado em função do caráter da dependência da vida útil com fatores externos e com cuidados de manutenção.

Durante a pesquisa, concluiu-se que os desligamentos provocados por rejeição de carga que introduzem sobrepressões e exigem o fechamento do distribuidor da turbina hidráulica em um intervalo curto podem causar o Golpe de Aríete (já descrito anteriormente) ao longo da tubulação. Em caso de falha do mecanismo de controle da turbina, é o fechamento da válvula de segurança que fará a proteção da unidade geradora, sobretudo em instalações com chaminé de equilíbrio ou com tomada d'água desprovida de comporta de emergência. Mas Nesse caso, o fechamento da válvula passa a ser o indutor do Golpe de Aríete.

Os Conduitos Forçados podem ser fabricados de muitos materiais, mas a resistência e flexibilidade dos aços fazem dos mesmos os materiais mais adequados para a faixa de pressões encontradas nas aplicações de turbinas hidráulicas. No dimensionamento definitivo de condutos, verifica-se a operação em condições de resistir às variações de pressão decorrentes do Golpe de Aríete quando há mudanças súbitas de vazão resultantes de fechamentos ou aberturas rápidas, parciais ou totais, do distribuidor das turbinas hidráulicas. Essas variações positivas (sobrepressões) ou negativas (depressões), conforme diminui ou aumenta o engolimento da turbina, condicionam a espessura das chapas das quais são construídos os condutos.

V. METODOLOGIA PARA MELHORAR A VIDA ÚTIL DOS EQUIPAMENTOS EXPOSTOS À REJEIÇÃO DE CARGA

O projeto de P&D foi concluído tendo proposto uma Metodologia para melhorar a Vida Útil através de:

- Recomendações válidas para todos os Equipamentos: Modernização, Monitoramento e Adoção de Procedimentos em Novas Instalações e
- Indicações individuais por equipamento: Acompanhamento da operação sob condições de projeto, Procedimentos de Inspeção e Procedimentos de Manutenção.

Observa-se que as Indicações individuais para cada equipamento podem ser absorvidas e incorporadas dentro dos procedimentos que a Concessionária já dispõe para realização de inspeções e intervenções de manutenção. Para disseminar as informações entre os operadores e mantenedores da concessionária foram preparados uma cartilha com a metodologia desenvolvida no projeto e folhas de check-list individuais por equipamento.



Figura 5. Cartilha

A. As Recomendações

i. Modernização

Sobre a Recomendação de Modernização é inegável que a melhor maneira de aumentar a vida útil de uma central hidrelétrica é a modernização de seus equipamentos, o que permite adicionalmente benefícios com segurança, confiabilidade, aumento de geração e redução nas despesas com operação e manutenção. O conceito de modernização envolve a substituição ou recuperação dos equipamentos e sistemas com o objetivo de aumentar a disponibilidade operacional e a atualização tecnológica. Sendo que o grande diferencial do trabalho de modernização é substituir e montar novas estruturas e equipamentos sem interferir na geração da central. Dispondo de recursos financeiros, é fundamental que a modernização alcance também a implantação de sistemas de comando e controle, aumentando o nível de confiabilidade e possibilitando a operação da central de forma remota plena. À medida que se aproxima o final da vida útil dos equipamentos, os mesmos passam a apresentar falhas freqüentes e as paradas para manutenções corretivas se ampliam, não só em freqüência como em tempo de parada.

ii. Monitoramento

Sobre a Recomendação de Monitoramento, com os avanços dos dispositivos eletrônicos, a tecnologia alcançada permite monitorar o comportamento dos equipamentos de forma on-line, o que traz uma ferramenta importantíssima para o aumento da vida útil. O monitoramento permite a redução dos riscos de falhas ao detectar e diagnosticar em fase incipiente os defeitos em evolução no equipamento e permite, também, zelar pela integridade e operacionalidade dos equipamentos em tempo real. As vantagens e possibilidades com a adoção do Monitoramento são:

- Diagnóstico on-line do estado e da operação dos transformadores de potência, disjuntores, seccionadores e geradores elétricos,
- Identificação das grandezas monitoradas que estiverem em operação fora da faixa definida, com emissão de alertas de manutenção ou troca,
- Recomendações de ações de planejamento da manutenção ou manutenção imediata, por tempo de serviço, por freqüência de acionamentos ou por operação imprópria,
- Padronização das ações e da comunicação na área de manutenção,
- Geração de relatórios periódicos de desempenho dos equipamentos monitorados, etc.

iii. Adoção de Procedimentos em Novas Instalações

Sobre a Recomendação de Adoção de Procedimentos em Novas Instalações, divide-se as observações em quatro fases: projeto, fabricação, instalação e operação. Na fase de projeto é fundamental, para garantir a longevidade, a performance de eficiência e a robustez desejadas, que haja:

- Seleção do tipo de equipamento e das características mais adequadas,
- Especificação correta das grandezas e das condições operacionais mais próximas do real comportamento futuro,
- Escolha dos materiais mais adequados para suportar as condições críticas,
- Introdução de uma rotina de verificação e aprovação de projetos e de documentação técnica para assegurar o aten-

dimento aos requisitos de especificação técnica e às normas aplicáveis aos diversos equipamentos, que pode ser realizada internamente ou por terceiros contratados.

Na fase de fabricação, as rotinas e a padronização estão intimamente ligadas à garantia da qualidade nas diversas operações fabris (corte, tratamento térmico, tratamento químico, soldagens, pintura e outras). Há necessidade de inspeção de fabricação também por parte do contratante com verificação dos itens de projeto, da seleção de materiais, da escolha de processos e do acompanhamento dos índices previstos. Portanto, considera-se a necessidade de adoção de alguns procedimentos:

- Rotina de avaliação técnica e de capacidade produtiva dos fornecedores,
- Verificação e Aprovação de plano de inspeção e testes,
- Inspeções em fábrica, Acompanhamento de testes e ensaios e
- Inspeção final com liberação para embarque/transporte.

Na fase de instalação, a interface entre as obras civis e a instalação dos equipamentos para que a montagem dos mesmos se proceda de forma complementar só podem ser asseguradas com inspeções freqüentes. É natural que nesta fase ocorram divergências quanto à forma de fixar determinados equipamentos e a compatibilidade entre os mesmos ou entre estes e a construção civil das estruturas onde devem ser fixados, por isso é fundamental a adoção das Inspeções de instalação e de comissionamento.

Na fase de operação, o procedimento de criação de histórico colabora para a análise e planejamento de atividades de manutenção preditiva. Para formar o histórico, é recomendada a adoção de diversos apontamentos:

- Da freqüência de atuação de cada equipamento,
- Da ocorrência de paradas programadas e forçadas,
- Da rotina de manutenção preventiva e corretiva e
- Das observações diárias dos operadores.

B. As Indicações Individuais

Sobre as Indicações Individuais por equipamento com ações para melhorar a vida útil, a utilização da Cartilha elaborada com as informações resultantes do Projeto de P&D é fundamental para disseminar o conhecimento pesquisado.

i. Procedimentos de Operação

As Indicações contam com o Acompanhamento da Operação de acordo com as condições de projeto. Os equipamentos são projetados para trabalhar sob determinadas condições de projeto (especificações técnicas, formas de instalação e características nominais) que devem ser verificadas periodicamente pelos próprios operadores e sempre que uma das condições tiver sido registrada anormal no monitoramento ou no apontamento dos operadores, recomenda-se a inspeção e eventual manutenção no equipamento.

ii. Procedimentos de Inspeção

Sobre os Procedimentos de Inspeção, os equipamentos devem operar de acordo com suas características nominais e em condições adequadas de temperatura, pressão, umidade, segurança e estabilidade. As inspeções são ações localizadas

para verificação das características e das condições de operação. A melhor forma de melhorar a vida útil é a operação adequada inspecionada periodicamente. As inspeções são definidas em função do tempo: periódicas para serem feitas pelos operadores, trimestrais, anuais ou plurianuais (com apoio de equipes de prestadores de serviços especializados).

iii. Procedimentos de Manutenção

O papel da Manutenção na vida útil é que ela pode determinar quando não é mais economicamente viável operar o equipamento, conseqüentemente é ela quem define o fim de sua vida útil. A Manutenção Preditiva é feita através de análises das características operativas e/ou físico-químicas dos equipamentos com a finalidade de detectar possíveis falhas. A Preventiva é feita mediante um serviço programado de controle, conservação e reparação de equipamentos com a finalidade de mantê-los em condições satisfatórias de funcionamento e de prevenir contra ocorrências que acarretem sua indisponibilidade. Por fim, a Corretiva é realizada com a finalidade de corrigir as causas e efeitos motivados por ocorrências quase sempre não programadas.

Sobre os Procedimentos de Manutenção, devem ser adotados sempre que os procedimentos de inspeção acusarem sua necessidade devido aos equipamentos não operarem de acordo com suas características nominais ou fora das condições adequadas de temperatura, pressão, umidade, segurança e estabilidade. As manutenções programadas (preditivas ou preventivas) devem seguir os resultados das inspeções com o objetivo de que não sejam necessárias as manutenções corretivas. Quando estas forem imprescindíveis é importante considerar o histórico anterior apontado e atualizar o histórico com as novas ações para o acompanhamento da vida útil.

VI. CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido no Projeto de P&D permitiu aliar a pesquisa teórica com o resultado experimental prático, trazendo benefícios para a concessionária de energia com a possibilidade de efetuar pesquisas de novos potenciais hidráulicos de forma eficiente, com redução de custos e com uma abordagem científica. A utilização da metodologia desenvolvida nas bacias hidrográficas de interesse da concessionária, fará com que a tomada de decisão quanto a novos investimentos seja acompanhada de um respaldo técnico adequado e facilitará a contratação dos diversos serviços necessários para elaboração das documentações requeridas pela ANEEL para aprovação de aproveitamentos de potenciais hidráulicos para geração de energia elétrica.

Como contribuição para quaisquer outros interessados que tomem conhecimento da pesquisa desenvolvida, o projeto apresenta os conceitos e a metodologia que pode ser replicada em qualquer bacia hidrográfica de pequeno e médio porte. Em havendo interesse em investigar potenciais hidráulicos basta seguir os passos descritos para se obter uma estimativa inicial que permita a tomada de decisão de investir nos locais mais promissores.

Comenta-se que os objetivos estabelecidos no projeto de P&D foram obtidos ao final do trabalho:

- Identificação do potencial hidráulico através de tratamento digital das informações geográficas e de tratamento

matemático das vazões de afluência,

- Desenvolvimento de uma aplicação em computador que incorpore uma apresentação gráfica e uma interface amigável para a análise do potencial hidráulico;

- Avaliação do potencial hidráulico, em caso prático, de bacias hidrográficas de médio e pequeno porte.

Por fim, destaca-se que novas pesquisas poderão acrescentar novas informações para melhorar, ainda mais, a caracterização do potencial hidráulico e o avanço dos softwares disponíveis no mercado pode tornar dispensável a utilização de mais de um deles. Uma sugestão para continuidade de pesquisa que permita o avanço desta tecnologia desenvolvida é abrigar dentro da mesma rotina de software a etapa de tratamento das informações geográficas. Outra sugestão é quanto à possibilidade de aprimorar o conceito energético simulando na rotina de software as motorizações possíveis para o potencial hidráulico estudado.

VII. AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores manifestam seus sinceros agradecimentos à Concessionária AES Tietê S.A. pela oportunidade e pela confiança no desenvolvimento deste Projeto e a o Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação pelo apoio e suporte fornecido, sem o qual não seria possível atingir os objetivos propostos.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros:

- [1] SOUZA, Z. Centrais Hidrelétricas, Dimensionamento e Componentes. Editora Edgard Blucher Ltda, 1992. p. 161. São Paulo, SP.

Relatórios Técnicos:

- [2] CERNE - Centro de Estudos em Recursos Naturais e Energia. Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação. Relatório elaborado para a Audiência Pública ANEEL 012/2006. Universidade Federal de Itajubá UNIFEI, Itajubá, MG, 2000.

Periódicos:

- [3] GROSSE, G. "Shaft Vibration diagnosis in condition-based monitoring". International Journal on Hydropower & Dams. Sutton, UK, v.3, n.3, p.27-31, 1996.
- [4] AZEVEDO, T. R., RODRIGUES, A. C., SIQUEIRA, R. P. B., MORAIS, C. F. "Estado da Arte em Engenharia de Aplicação de Unidades Geradoras para Viabilização Técnica do Projeto de PCHs – Exemplo: Sete Quedas. Periódico PCH Notícias e SHP News, publicação do CERPCH – Centro de Referência de Pequenas Centrais Hidrelétricas, <http://www.cerpch.unifei.edu.br/Adm/artigos/>. Acesso em 15/06/2010.

Artigos em Anais de Conferências (Publicados):

- [5] SCHEIDL, W. "Comportamento Dinâmico do Rotor, sob Condições Especiais da Velocidade Crítica". Anais do XVI Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, SNPTEE, 16, Campinas, SP, Brasil, 2001.

Normas:

- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6878 – Operação de Sistemas de Potência. 1981.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5049 – Isoladores de Porcelana ou Vidro, para Linhas Aéreas e Subestações de Alta Tensão - Ensaio. 1985, atualizada pela NBR 5032 – Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1 000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada, 2004.

Dissertações:

- [8] ALVES, F. R. Características do disjuntor para abertura de linha em vazio: metodologia de estudo. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá UNIFEI, Itajubá, MG, 2006.