



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

CB/GGH/29

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -1

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

AValiação Mecânica de Geradores Hidroelétricos para Mitigar Riscos de Falha por Fadiga

Marcos V. da Silva (*)
GE Renewable Energy

Ricardo Carvalho
GE Renewable Energy

RESUMO

Um crescente número de problemas relacionado à fadiga tem sido encontrado nos componentes de geradores. Estes problemas precisam ser abordados de forma preditiva e preventiva para reduzir os custos de reparo, as perdas monetárias devido à parada de geração e as perdas de ativos. Este trabalho apresenta o procedimento da GE para avaliação da vida em fadiga, começando pela identificação das condições operacionais, métodos de cálculo e exames de inspeção. Soluções temporárias e definitivas são propostas ao proprietário permitindo o agendamento da manutenção sempre focando em segurança, confiabilidade e disponibilidade.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador, Falha, Fadiga, Reparo temporário

1.0 - INTRODUÇÃO

No passado, a grande maioria das unidades geradoras de usinas hidrelétricas foi projetada para geração de energia de base. Nesta condição, os grupos geradores eram projetados baseados nos principais carregamentos estáticos que estariam submetidos durante toda a sua vida operacional, pois o número de ciclos esperados para os carregamentos dinâmicos eram relativamente pequenos não requerendo uma avaliação de resistência à fadiga. Esta metodologia baseada principalmente nos carregamentos estáticos se mostrou adequada na América do Sul, pelo fato de que a grande maioria dos grupos geradores atingiu o fim da vida operacional não sofrendo danos estruturais significativos.

Contudo, o cenário mudou no final da década 1990, uma reestruturação do setor elétrico criou condições legais para que os produtores de energia elétrica pudessem competir pelo suprimento dos grandes consumidores de energia [1]. A desregulamentação do mercado energético e política de preços flutuantes de energia aumentaram o incentivo do uso de unidades geradoras existentes previamente projetadas para a geração de energia de base, também para a produção de energia em horário de pico. No caso do mercado brasileiro, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) elabora as diretrizes de operação das unidades geradoras para manter a segurança operativa e o atendimento à carga demandada.

Também, a interconexão dos parques eólicos ao sistema interligado nacional (SIN) tem aumentado bastante na última década, e uma característica do ponto de vista de operação de energia eólica é a inabilidade do gerenciamento da produção, isto é, os aere geradores produzem energia quando há vento, e é evidente a difícil

(*) Av. Charles Schneider, s/n° - General Electric - Engenharia de Service - CEP12.040-001 Taubaté, SP - Brasil
Tel: (+55 12) 3608-3410 – Fax: (+55 12) 3608-3192 – Email: marcos.victoria@ge.com

previsibilidade da velocidade do vento. Consequentemente, este fato aumenta o número de partidas e paradas que uma unidade geradora de uma usina hidrelétrica precisa realizar para compensar a variação de produção de energia eólica [2].

Atualmente, as unidades geradoras estão mais expostas a carregamentos cíclicos e condições mais severas de operação, resultando em um maior risco a falhas por fadiga. O plano para mitigar este risco consiste em uma avaliação cuidadosa e detalhada da vida em fadiga dos componentes do gerador, combinada com um profundo conhecimento das disciplinas envolvidas e também sólida experiência no desenvolvimento desta avaliação. Como resultado, uma questão levantada por muitos proprietários pode ser respondida com embasamento técnico, se um componente que atingiu o fim de sua vida em fadiga pode ser reutilizado após um pequeno retrabalho.

O procedimento adotado pela GE é adequado para analisar os aspectos mecânicos mais relevantes relacionados a problemas de fadiga nos componentes das unidades geradoras. O método de cálculo é aplicado para destacar os componentes em situação de risco, analisar o fenômeno de fadiga e propagação de trinca e também estimar o tempo de vida residual através de uma avaliação detalhada. Baseado nos resultados obtidos por modelos numéricos e também através de inspeções adicionais nos componentes pode-se definir uma estratégia de reparo assegurando a melhor solução para atender as necessidades do cliente.

2.0 - ANÁLISE GLOBAL DE FADIGA

O procedimento para análise de fadiga baseado no guia FKM ou outro guia similar utilizando juntamente os resultados detalhados de análises por elementos finitos permite realizar a previsão da vida em fadiga de uma estrutura, isto é, o cálculo do número de ciclos admissíveis até o início da formação de uma trinca. O guia FKM (Forschungs Kuratorium Maschinenbau) foi elaborado por um grupo de especialistas na área de resistência dos materiais e fadiga na Alemanha na década de 90 [3]. Este guia é um procedimento extenso e comentado caracterizado por equações e tabelas de informações, e representa o atual estado-da-arte. Ele possibilita uma análise da resistência mecânica dos componentes sob cargas estáticas e também uma análise dos componentes sujeitos a carregamentos dinâmicos relacionados ao limite de fadiga. A sexta edição de 2013 é a mais recente. O guia é válido para componentes usinados e soldados produzidos em aço, ferro fundido e ligas de alumínio. O guia aborda componentes com entalhes e juntas soldadas sob carregamentos estáticos e dinâmicos com mais de 10000 ciclos de amplitude constante ou variável.

Estudos experimentais prévios realizados pela GE validaram o procedimento de análise de fadiga do guia FKM com boa correspondência entre os resultados [4]. O teste incluiu um grande número de amostras com carregamentos o mais próximos da realidade. O número de ciclos até a fase de iniciação da trinca foi previsto pelo guia FKM e comparado com os resultados correspondentes medidos.

A análise de fadiga dos componentes rotativos, por exemplo: eixo, aranha do rotor, anel magnético, pólos do rotor, suportes das conexões interpolar e suportes das conexões do barramento amortecedor, é escopo de uma análise mecânica compreensiva considerando os carregamentos esperados desde a rotação nominal até a rotação de disparo, respectivamente [5]. A análise é definida como fadiga de baixo ciclo (LCF) para os componentes sujeitos principalmente a ciclos relacionados com a rotação de rejeição de carga e disparo, por outro lado, a fadiga de alto ciclo (HCF) está relacionada com a rotação nominal.

Para todos os componentes, é possível através de cálculos analíticos ou métodos numéricos modernos identificar as limitações existentes nestes componentes. Muitas vezes, um rotor completo ou um componente individual é calculado pelo método dos elementos finitos em 2D ou 3D, isto é feito para a obtenção de uma estimativa precisa da vida útil do componente. Uma análise em elementos finitos em 3D requer um profundo conhecimento na interação dos diferentes componentes para determinação da distribuição de tensão nas seções críticas, e este conhecimento é adquirido através da experiência acumulada.

Os pré-requisitos para uma boa análise compreensiva é ter a maior quantidade de informação possível em relação à geometria do componente, propriedades mecânica do material e o histórico das condições de operação. A qualidade dessas informações determina a confiabilidade da estimativa de vida útil.

No guia FKM, diferentes tipos de tensões mecânicas podem ser usadas para estimar a vida útil: tensão nominal, tensão estrutural e tensão local. A melhor precisão na análise da vida útil é obtida quando utilizado o conceito de tensão local, isto é, tensão local devido a um concentrador de tensão. A análise usando o conceito de tensão local é altamente recomendada, pois a ação da fadiga é determinada pelo efeito do concentrador de tensão e pela soma do dano acumulado. Também é de suma importância a escolha de fatores de segurança apropriados em decorrência da realização de inspeções periódicas, da probabilidade de ocorrência dos carregamentos previstos e das consequências devido à falha do componente.



Figura 1 Campo de análise de fadiga

O objetivo é evitar que uma unidade geradora opere com algum componente com trinca, logo a análise apoia-se na análise de fadiga [6], como mostrado na Figura 1.

Os modelos de elementos finitos de componentes individuais ou estrutural completas são utilizados para identificar as tensões locais e o nível de tensão em seções críticas, as Figuras 2 e 3 mostram a distribuição de tensão no canto da placa de pressão e no pé do pólo da placa de pressão de um gerador hidrelétrico de 490 MWA, 300 rpm e 24 pólos.

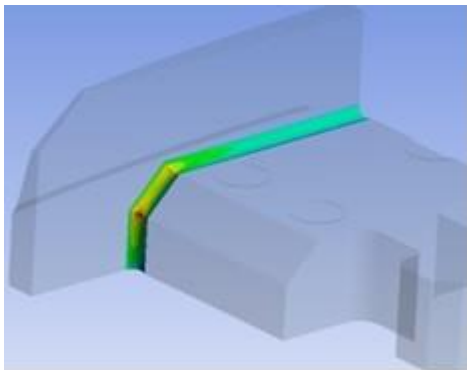


Figura 2 Distribuição de tensão (Sapata)

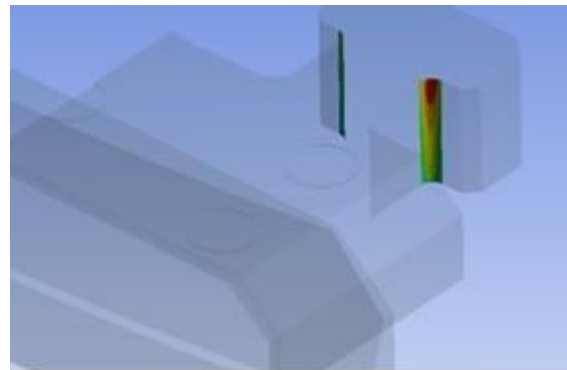


Figura 3 Distribuição de tensão (Pé)

Os resultados obtidos são usados para estimar a vida útil do componente. No caso que a componente já atingiu a vida útil especificada na fase de projeto, uma inspeção através de teste não destrutivo é necessária. Esta inspeção poderá revelar qualquer problema estrutural devido a qualquer condição de operação que a máquina já operou, mas sozinha não é possível confirmar que qualquer problema relacionado à fadiga não existe no componente.

3.0 - SOLUÇÕES PARA COMPONENTES NO FINAL DA VIDA ÚTIL

As possíveis soluções após uma inspeção com ensaios não destrutivos são mostradas na Figura 4. Basicamente há três caminhos: uma substituição ou reparo como uma solução definitiva, o monitoramento do crescimento da trinca até o tamanho crítico como uma solução temporária enquanto uma solução definitiva esta sob desenvolvimento.

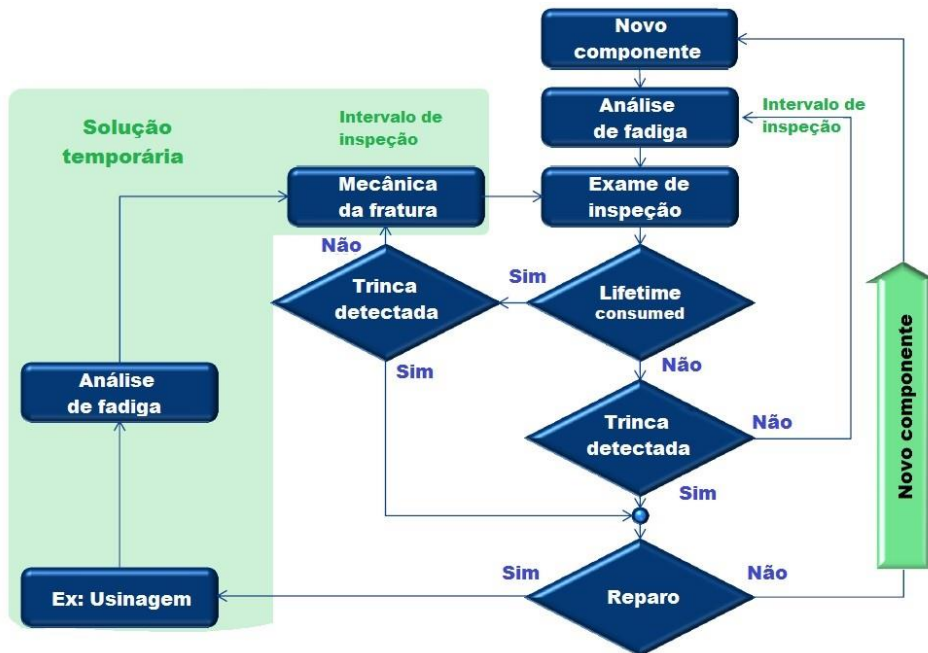


Figura 4 Soluções para um componente no final de vida em fadiga

3.1 Soluções definitivas

O reparo de um componente com ou sem trinca mas no final de sua vida em fadiga deve ser a primeira alternativa de solução. Este reparo está limitado a máxima quantidade de material que pode ser removido pois isto geralmente leva a uma redução da área da seção crítica. Os critérios de projeto devem ser respeitados na análise estática e dinâmica. A Figura 5 mostra inicialmente uma trinca no pé do pólo de uma placa de pressão detectada através de um ensaio não destrutivo de partículas magnéticas, e mostra também a geometria final obtida através da usinagem para a remoção completa da trinca, Figura 6. Mesmo não encontrando trinca numa região crítica é possível suavizar um canto vivo e reiniciar a vida em fadiga do componente, como mostrado nas Figuras 7 e 8.

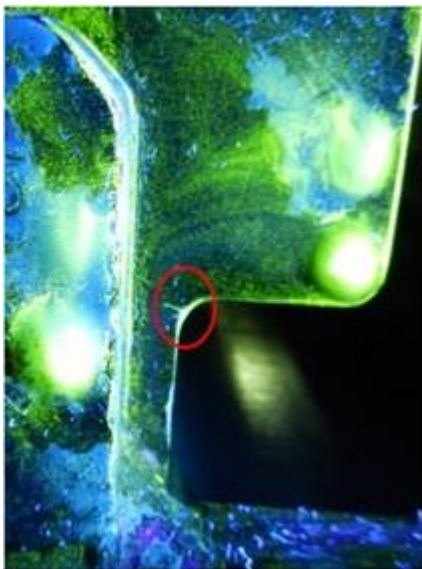


Figura 5 Trinca detectada



Figura 6 Solução implementada



Figura 7 Canto vivo



Figura 8 Canto suavizado

Um novo projeto é claramente uma solução permanente com muito mais possibilidades, tais como: nova geometria, novos materiais ou até mesmo novos conceitos. Esta escolha permite considerar os atuais regimes de operacionais, como exemplo: um maior número de partidas e paradas por dia. O uso de modernas ferramentas de projeto também permite otimizar a estrutura como mostrado na Figura 10, e abre a possibilidade de se retrabalhar um determinado componente que não apresenta falha substituindo somente o componente necessário, na Figura 12 é exemplificado a substituição dos pólos danificados e o retrabalho no anel magnético para um gerador com rotação de disparo de 920 rpm que não atendia os critérios de projeto.

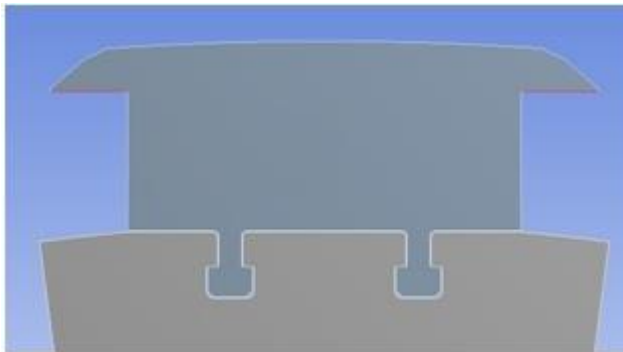


Figura 9 Projeto original

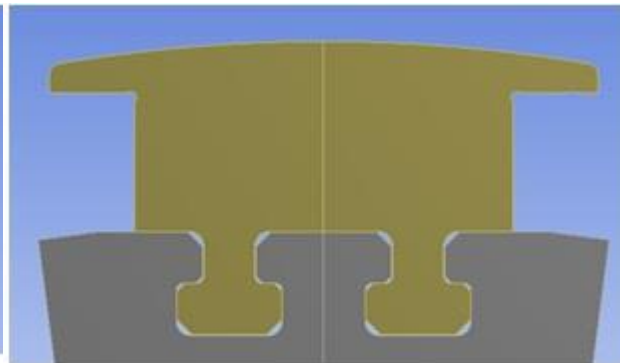


Figura 10 Novo projeto

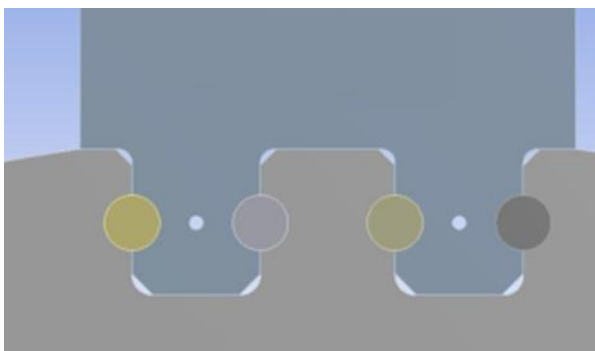


Figura 11 Projeto original



Figura 12 Novo projeto

3.2 Soluções temporárias

Uma solução temporária para componentes com trincas ou não após o final da vida em fadiga é a permissão de operação da unidade geradora sob a condição de inspeções em intervalos regulares de tempo definido pela

análise de mecânica da fratura. Neste caso, se já houver a presença da trinca é feito o acompanhamento do crescimento dela até um tamanho seguro para o funcionamento da unidade geradora. Na Figura 14 é mostrado o furo realizado em um braço de uma aranha do rotor para garantir a parada da propagação da trinca, esta solução foi adotada para permitir a operação da unidade geradora enquanto uma solução definitiva estava em desenvolvimento. Já a Figura 15 mostra o monitoramento de uma trinca no pé do pólo permitindo a operação da unidade geradora enquanto era estudada uma solução definitiva, neste caso não era possível eliminar completamente a trinca.

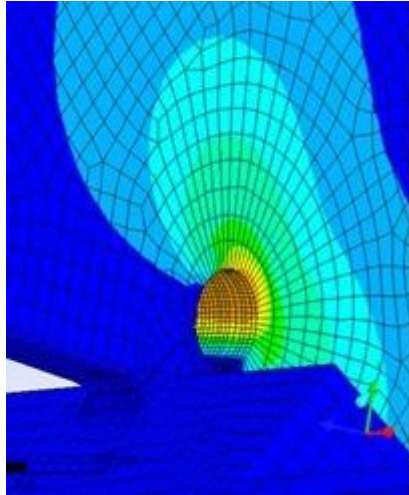


Figura 13 Modelo estudado

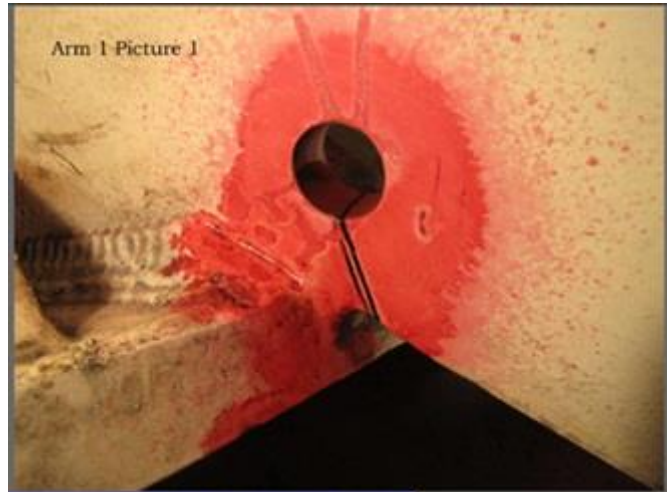


Figura 14 Solução implementada (furo)

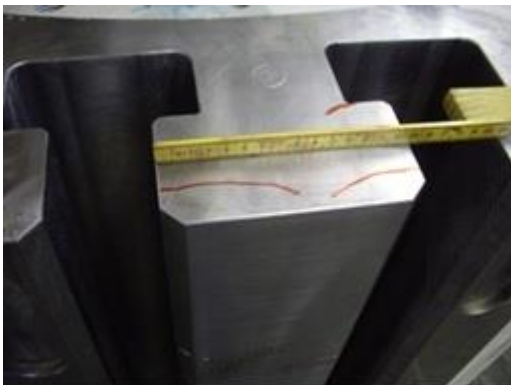


Figura 15 Inspeção

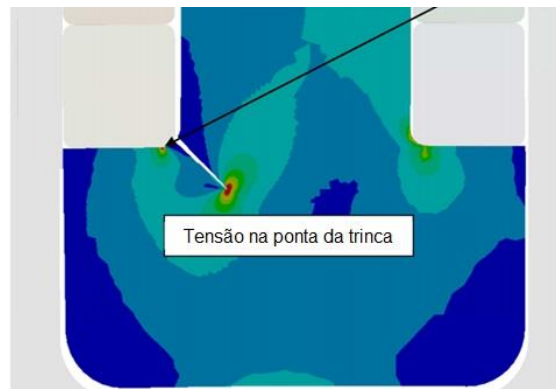


Figura 16 Tamanho crítico da trinca

4.0 - CONCLUSÃO



A estimativa de vida em fadiga de um componente depende de vários parâmetros, por exemplo: propriedade dos materiais, tolerâncias geométricas e também o espectro de ciclos de carregamento, como consequência, é necessário experiência na adoção de fatores de segurança para englobar todas as incertezas, senão uma unidade geradora pode ser liberada para operação em uma situação de risco. Como cada unidade geradora possui uma única condição de operação, a estimativa de vida somente é válida para esta unidade geradora considerada.

A GE tem um procedimento objetivo e confiável para a análise de fadiga dos componentes críticos do conjunto girante da unidade geradora permitindo o reparo ou a substituição. E a busca pela solução é acompanhada por uma forte cooperação entre o proprietário das máquinas e a GE.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEME, A.A. A reforma do setor elétrico no Brasil, Argentina e México: contrastes e perspectivas em debate. Rev. Sociol. Polit., Curitiba , v.17, n.33, p.97-121, Jun. 2009.
- [2] CARVALHAL, R. Influence of the number of start/stop, overspeed and runaway cycles in the generator mechanical design. VI Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2014.
- [3] FKM GUIDELINE: Analytical Strength Assessment of Components, Forschungskuratorium Maschinenbau, 6th Edition, VDMA Verlag, 2012.
- [4] WALSER H., DEPLANQUE S., BINDER S. Lifetime assessment of a pole rim connection in a pump storage unit experiencing many starts and stops. The International Journal on Hydropower & Dams, 2012.
- [5] KUNZ T., HAVARD D., WALSER H. Mitigation measures for cycling of existing hydro generators experiencing more starts and stops. Hydrovision International Conference, 2011.
- [6] DEPLANQUE S., WALSER H., DABAGH N. High cycle fatigue on generators: An emerging concern. HYDRO 2016.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Marcos V. D. Silva nasceu em Porto Alegre/RS em 1977. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2001. Ingressou na indústria em 2001, na divisão de geradores elétricos de pequeno e médio porte da ALSTOM. Na ALSTOM, passou por várias posições, desde Engenheiro Calculista, Coordenador da Engenharia de Projeto de geradores e Coordenador Técnico de Integração de Plantas. Também atuou na GE (General Electric) na divisão Bently Nevada, na área de monitoramento de máquinas. Em 2007 retornou para a Alstom Renewable Power. Atualmente, trabalha na divisão de Base Instalada para usinas hidrelétricas na GE Renewable Energy, onde possui a função de Coordenador Técnico da Engenharia de Geradores. Já publicou trabalhos como autor ou co-autor no XXIII SNPTEE, em 2015, e no VII CIGRÉ ENAM, em 2016.</p>
	<p>Ricardo Carvalhal nasceu em Londrina/PR em 1981. Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Estadual Paulista UNESP de Ilha Solteira em 2003. Mestre em Engenharia Mecânica pela mesma universidade em 2005. Trabalha na GE Renewable Energy desde 2005 como Engenheiro de cálculo estrutural de Geradores. Desde 2012 atua no departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (R&D) com foco no desenvolvimento de ferramentas de cálculo para otimização estrutural e análise de vibração. Publicou trabalho como autor no VI CIGRÉ ENAM, em 2014.</p>