



**Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT**

**PROGNÓSTICO DE VIDA REMANESCENTE E DANO ACUMULADO EM TURBINAS DE GERAÇÃO TERMELÉTRICA**

**BRUNO REIS CARDOSO(1); CARLOS FREDERICO TROTTA MATT(1); HELOISA CUNHA FURTADO(1); VICTOR VIEIRA MAUDONET(1); ANDRÉ TOMAZ DE CARVALHO(1); LUIZ HENRIQUE DE ALMEIDA(2); JOÃO ANTONIO FERREIRA(3); DIOGO RAFAEL CORRASA MARQUES(3); CEPEL(1); UFRJ(2); PUC-Rio(3);**

**RESUMO**

As plantas termelétricas brasileiras são utilizadas, na maioria das vezes, de forma cíclica, o que pode inferir em uma série de danos e prejuízos, visto que as mesmas foram projetadas para operar em regime de base. No presente informe técnico, apresenta-se uma metodologia de estimativa de acúmulo de dano e de vida remanescente para os mecanismos de fluência e fadiga, que leva em consideração modelos consagrados na literatura e utiliza leitura direta de dados provenientes da operação. Os algoritmos desenvolvidos, integrados a um sistema de monitoramento, fornecem uma resposta mais rápida e menos conservadora aos engenheiros de manutenção.

**PALAVRAS-CHAVE**

Turbinas a Vapor, Fluência, Fadiga, Monitoramento, Prognóstico

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A matriz energética brasileira é constituída em sua maior parte pela geração hidrelétrica, seguida da geração termelétrica, que pode ser dividida em diferentes fontes de acordo com o combustível utilizado: óleo combustível, carvão, biomassa, gás e nuclear.

Por questões econômicas e ambientais, a geração de energia por plantas termelétricas no Brasil é utilizada em momentos de picos de energia. Este tipo de demanda pode inferir em uma série de danos e prejuízos não previstos, pois a maioria das plantas termelétricas nacionais foi projetada para operar em regime de base, ou seja, com o mínimo possível de ciclos de partidas e paradas.

A grande maioria dos materiais utilizados em plantas de processo e plantas termelétricas foi projetada para suportar condições de fluência. No entanto, como as usinas operam sob regimes de ciclos de paradas, partidas e manobras de cargas, os materiais são submetidos a uma nova condição, na qual o mecanismo de dano de fadiga termomecânica passa atuar em conjunto com a fluência, oriunda da operação em base.

Esse tipo de solicitação nos componentes é praticado há muito tempo no Brasil. Recentemente, outros países do mundo começaram a colocar suas plantas termelétricas mais antigas em operação cíclica, dado o aumento da utilização de fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica (1). Como estas fontes são utilizadas em períodos específicos, as termelétricas suprem a demanda de energia na ausência das demais. Como consequência dessa nova condição operacional, questionamentos em relação às propriedades dos materiais utilizados nos projetos e construções de componentes, a interação entre os diferentes mecanismos de dano e os métodos de previsão de vida residual utilizados são objeto de constante investigação científica. Vale destacar que todo o esforço nessa área tem como principal função garantir a operação segura e confiável das usinas.

Usualmente, avaliações de integridade em usinas termelétricas são realizadas de forma periódica, durante visitas ao campo, onde são feitas análises dos registros de operação das usinas. Após o tratamento dos dados, valores de dano são estimados para diferentes condições operacionais registradas durante o período de análise, e o dano total acumulado é estimado a partir do somatório dos valores de dano obtidos. Este tipo de avaliação periódica e pontual costuma consumir muito tempo. Por outro lado, a escassez de dados geralmente leva a análises imprecisas e demasiado conservadoras.

Contraopondo-se à avaliação periódica, o monitoramento contínuo apresenta grandes vantagens, permitindo acompanhar a evolução gradual de defeitos no componente de interesse, ou mesmo identificar com antecedência danos mais severos em função de eventuais condições operacionais extremas.

O objetivo do presente informe técnico é apresentar a metodologia desenvolvida pelo Cepel para o monitoramento em tempo real do dano acumulado e da vida remanescente de componentes que operam em condições de fadiga termomecânica e fluência. A metodologia desenvolvida utiliza como dados de entrada os principais parâmetros de operação de uma planta termelétrica, tais como temperatura, pressão e vazão do vapor, e fornece como resultado o dano acumulado nos componentes monitorados a cada janela de 48 horas. Cálculos de danos acumulados e vidas residuais dos equipamentos são finalmente incorporados ao sistema supervisor da usina.

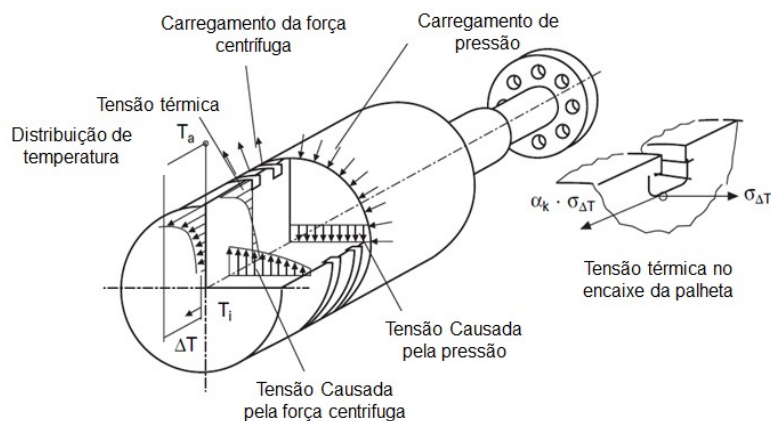
A metodologia proposta, implementada através do sistema SOMA-TURBODIAG e integrada ao sistema de supervisão de uma usina termelétrica nacional, têm fornecido estimativas em tempo real de vida remanescente e dano acumulado para o rotor de alta pressão de uma turbina a vapor monitorada.

Os principais resultados fornecidos pelo sistema SOMA-TURBODIAG são os acréscimos de dano por fluência e fadiga termomecânica a cada 48 horas e a vida remanescente do rotor do turbogerador monitorado. As informações de saída são disponibilizadas em uma interface *Web* por meio de gráficos de evolução do dano por fluência ( $D_C$ ) e fadiga termomecânica ( $D_F$ ) ao longo do tempo e por meio do diagrama  $D_F$  versus  $D_C$ . Com este diagrama, operadores da usina e equipes de engenharia de manutenção podem visualizar em tempo real a trajetória do dano em direção à região de segurança especificada pelo fabricante da turbina.

A metodologia apresentada mostrou ser uma poderosa ferramenta para o acompanhamento da condição operacional de componentes críticos de uma usina termelétrica, podendo ser utilizada pelas equipes de operação e manutenção para auxiliar em processos de tomada de decisão, no planejamento de inspeções, e até mesmo fornecer orientações em relação aos regimes de operação mais adequados para cada equipamento e instalação pela perspectiva da gestão da expectativa de vida destes ativos.

## 2.0 - METODOLOGIA

A metodologia apresentada a seguir aplica-se para a estimativa de vida residual e dano acumulado do primeiro estágio de um rotor de uma turbina de alta pressão. A escolha de tal componente foi realizada devido à severidade das condições operacionais do mesmo, em termos de temperaturas, pressões, cargas dinâmicas em regime permanente, e suas variações. A Figura 1 mostra um desenho esquemático das tensões presentes num rotor de uma turbina a vapor.



FIFIGURA 1 – Desenho esquemático das solicitações impostas a um rotor, adaptado de (2).

## 2.1 Algoritmos propostos

Os algoritmos propostos para estimativa de vida de rotores de alta pressão de turbinas a vapor submetidos aos mecanismos de dano por fluência e fadiga foram elaborados em Python®.

Os blocos fundamentais dos programas propostos são:

- Tratamento das grandezas de operação;
- Especificação das propriedades do material do rotor e dados dimensionais;
- Cálculo das grandezas de engenharia;
- Cálculo do tempo de ruptura ou número de ciclos até a fim da vida útil;
- Cálculo da vida remanescente e do dano acumulado.

Foram elaborados dois algoritmos, um para estimar a vida remanescente por fluência e outro para a fadiga. A Figura 2 apresenta um diagrama detalhado das principais etapas dos algoritmos desenvolvidos no presente informe técnico.

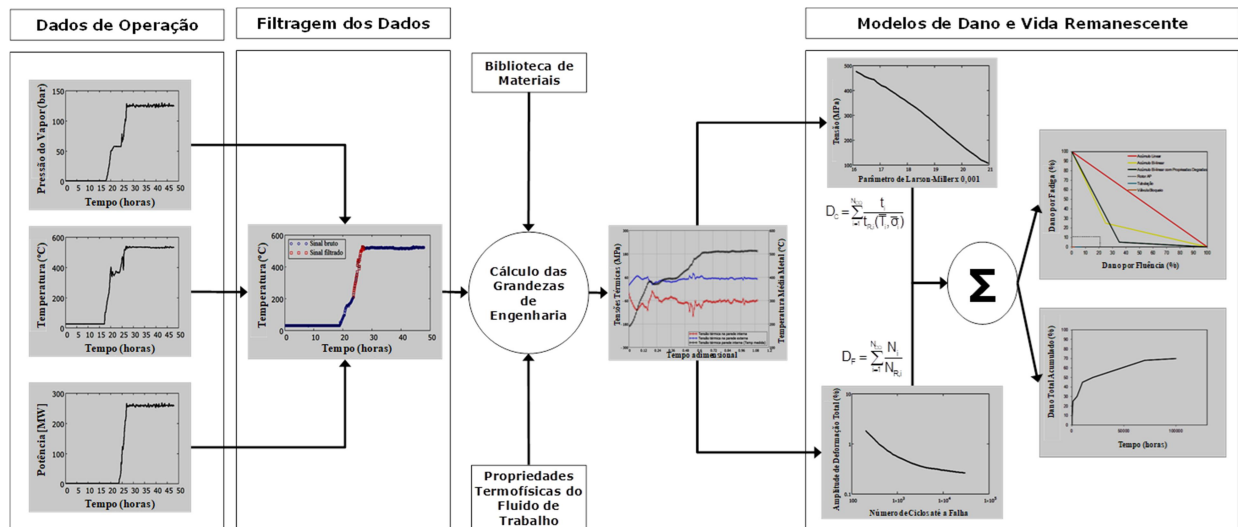


FIGURA 2 – Diagrama detalhado das principais etapas dos algoritmos propostos.

As grandezas de processo necessárias para avaliação do dano por fluência e fadiga termomecânica no rotor de alta pressão são a pressão e temperatura do vapor d'água na entrada da turbina, a temperatura de metal na superfície interna da carcaça, a potência gerada e a velocidade de rotação da turbina. Todas essas grandezas são medidas por sensores apropriados e armazenadas em um sistema de supervisão. Para a metodologia proposta, essas grandezas podem ser gravadas em um banco de dados com um período de amostragem fixado em 5 minutos.

A primeira etapa da metodologia compreende a aquisição e pós-processamento das grandezas de processo relevantes. Representam-se, respectivamente, por  $T_C$  e  $T_F$  os períodos de tempo de aquisição das grandezas de processo para avaliação do dano por fluência e fadiga termomecânica. Na metodologia elaborada, fixou-se  $T_C = 24$  horas e  $T_F = 48$  horas. Fixou-se  $T_F$  em 48 horas porque, ocasionalmente, manobras de partida e parada da turbina podem se estender pela madrugada do dia seguinte, de modo que 24 horas de aquisição são insuficientes para finalização daquelas manobras. Com o pós-processamento, obtêm-se os valores das grandezas de processo para a condição de carregamento estacionário (regime permanente) e de carregamento cíclico (regime transiente).

Para que seja possível determinar o acúmulo de dano por fluência de um componente de interesse, é necessário, em um primeiro momento, realizar uma filtragem de dados, em que há o registro de todos os dados de operação do componente, por meio de sensores. Dentre os dados registrados, serão selecionados os dados de interesse e dentre estes uma grandeza de controle, de modo que seja possível identificar, por meio do método da janela móvel, o início e o fim do transiente no componente. Realizada a identificação, estes dados de interesse serão armazenados em um banco de dados.

Após a filtragem dos dados, para se determinar o acúmulo do dano por fluência, dentre os dados filtrados, seleciona-se aqueles que foram medidos antes do início e após o fim do transiente e a uma temperatura acima da temperatura mínima de ativação do mecanismo de degradação por fluência.

Após a seleção dos dados de interesse filtrados, são calculados os valores médios para avaliação do dano por fluência.

Nas análises teóricas realizadas para o regime permanente de operação são consideradas as tensões térmicas oriundas de gradientes espaciais de temperatura ao longo do rotor, tensões centrífugas oriundas da rotação da turbina e tensões mecânicas oriundas da pressão do vapor sobre a superfície do rotor, conforme apresentado na Figura 1. A bibliografia não conta com um número razoável de modelos analíticos que pudessem ser utilizados para descrever o comportamento de rotores de turbinas a vapor e, além disso, que pudessem ser transformados em um algoritmo. Diante de tal constatação, adotou-se o modelo analítico proposto por Mitrović e Živković (3), pois o mesmo apresentava formulações apropriadas para o fenômeno de transferência de calor envolvido no estudo, assim como, as formulações das tensões mecânicas aplicadas no modelo do rotor.

Após o cálculo das temperaturas e das tensões equivalentes de Von-Mises nas regiões de interesse do rotor, o tempo de ruptura por fluência é estimado utilizando as curvas mestre dos parâmetros de Larson-Miller (4) e Manson-Haferd (5).

Para determinação do acúmulo do dano por fadiga de um componente também é preciso realizar a seleção e a filtragem de dados através dos sensores instalados no componente de interesse, assim como realizado para determinar o acúmulo de dano por fluência. Após a filtragem dos dados, selecionam-se os dados de interesse que caracterizam o transiente, ou seja, os dados que se encontram entre o início e o fim do transiente identificado na filtragem.

A primeira abordagem para estimar o dano de fadiga termomecânica foi proposta por Timo (6) e se encontra documentada na literatura (7). O objetivo é estimar as deformações térmicas correspondentes aos transientes aplicados aos rotores durante as manobras de operação, assim como os fatores de concentração de deformação em regiões críticas dos rotores. A magnitude da deformação térmica produzida depende da magnitude da taxa de aquecimento, do coeficiente de troca térmica na superfície do rotor, da massa do rotor e das propriedades térmicas do material do componente (7). Cabe ressaltar que a literatura utiliza a metodologia apenas para análises pontuais, ou seja, durante uma análise de integridade do componente, e, até o presente momento, não foi identificada junto à comunidade científica, a aplicação desta metodologia em algum algoritmo computacional, como o apresentado no presente informe técnico.

Uma vez estimada a variação de deformação total, utiliza-se a curva de resistência à fadiga termomecânica do material do componente, para obtenção do número de ciclos até a iniciação de trincas.

O dano por fadiga termomecânica também foi estimado por outro método, baseado nas curvas de desgaste cíclico da turbina, extraídas do manual de operação do componente avaliado no presente informe técnico. Essas curvas são utilizadas para o controle de partidas e paradas da turbina. A incorporação das curvas de desgaste cíclico ao algoritmo de fadiga permite uma melhor verificação dos processos e manobras de operação da turbina.

Uma vez estabelecidos os métodos para avaliar os mecanismos de dano presentes no componente investigado, a etapa seguinte consiste em definir as regras para o acúmulo de dano e do critério de falha do equipamento, o que permite calcular a vida remanescente do equipamento.

Em geral, os projetos de componentes operando em regimes de fluência-fadiga são elaborados de maneira a prevenir a iniciação de trincas, onde a iniciação da trinca pode ser definida arbitrariamente como a presença de trincas as quais podem ser detectadas visualmente, como por exemplo, trincas com 1mm de comprimento.

Diversas regras foram propostas para estimar o acúmulo de dano pelos mecanismos de fluência e fadiga (8, 9). A mais utilizada é a regra do acúmulo linear de dano, obtida pela seguinte expressão:

$$D = D_C + D_F \quad (1)$$

Onde D é o dano total acumulado,  $D_C$  é o dano acumulado por fluência e  $D_F$  é o dano acumulado por fadiga. Por sua vez,  $D_C$  e  $D_F$  são obtidos por regras de acúmulo de dano lineares, conhecidas como regra de Robinson, para o dano por fluência (10), e regra de Miner para o dano de fadiga (11), dessa forma, D pode ser expresso da seguinte maneira:

$$D = \sum \frac{t}{t_R} + \sum \frac{N}{N_R} \quad (2)$$

Onde t é o tempo no qual o componente ficou exposto a uma certa condição de fluência, e  $t_R$  é o tempo no qual o material rompe sob tal condição. Para o dano em fadiga, N é o número de ciclos em dado intervalo de deformação e  $N_R$  é a vida em fadiga para o mesmo intervalo de deformação. Quando o valor de D é igual à unidade, presume-se que a vida útil do componente foi extinta (8). A vida remanescente para ambos os mecanismos de dano é estimada a partir da extrapolação da evolução temporal do dano, admitindo-se o fim da vida útil quando os danos atingem o valor de 0,9 (90%).

## 2.2 Sistema SOMA-TURBODIAG

Nesta seção é descrita de maneira sucinta a arquitetura do sistema computacional SOMA-TURBODIAG desenvolvido pela equipe do projeto SOMA-CEPEL. Este sistema encontra-se instalado atualmente em um servidor localizado nas instalações de uma usina termelétrica nacional. O núcleo do sistema é baseado em tecnologia *WEB*, banco de dados *Postgres* e Plataforma *Field Point* e *PXI*, da *National Instruments*. O sistema é composto de módulos independentes, cada qual com suas características e funcionalidades. A Figura 3 apresenta a arquitetura do sistema SOMA-TURBODIAG.

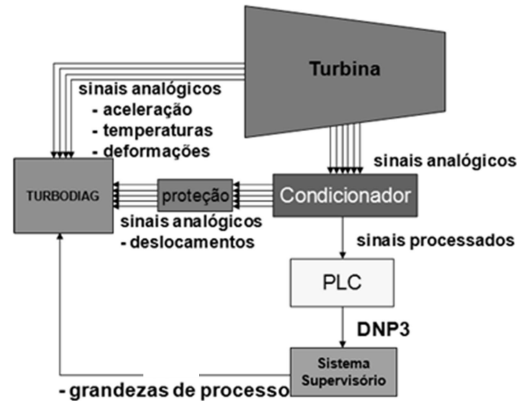


FIGURA 3 – Arquitetura proposta para o sistema SOMA-TURBODIAG.

A arquitetura básica do sistema computacional SOMA-TURBODIAG contempla um módulo de aquisição de sinais analógicos, um módulo de aquisição de sinais digitais provenientes do sistema de supervisão da turbina e um módulo de avaliação de dano e vida remanescente, que integra os algoritmos desenvolvidos em Python®, descritos na sessão anterior. Esse último módulo utiliza os dados provenientes do sistema supervisão da usina, pois não foram instalados sensores complementares no rotor de alta pressão da turbina.

O sistema conta com três telas de avaliação: a primeira contendo um módulo denominado monitor, onde são observadas, em tempo real, diversas grandezas de operação em cada um dos componentes monitorados; a segunda tela apresenta o histórico dos dados; e a terceira, apresentando o resultado dos cálculos da evolução temporal do dano e da vida remanescente. Na terceira tela, também é possível realizar análises de acordo com o diagrama de acúmulo de dano.

## 3.0 - RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados resultados obtidos com o sistema SOMA-TURBODIAG. Os resultados apresentados foram extraídos da interface gráfica do sistema. O sistema conta com dados correspondentes ao período de março de 2013 até o momento atual.

A Figura 4 apresenta a tela do módulo denominado monitor, indicando os componentes monitorados, as grandezas em tempo real e os valores de dano acumulado para os mecanismos de fluência e fadiga termomecânica.

A Figura 5 apresenta um gráfico contendo a evolução temporal da temperatura de metal da carcaça interna do rotor de alta pressão, região mais próxima ao primeiro estágio do rotor de alta pressão, no primeiro eixo vertical, e no segundo eixo vertical, a evolução temporal do dano máximo acumulado por fluência e fadiga termomecânica. É possível notar que nos períodos em que a turbina está operando em base, ou seja, com uma temperatura de metal por volta de 520°C, o mecanismo de dano por fluência atua no componente, nota-se uma evolução linear do dano nesses períodos. Por outro lado, nos períodos onde há um transiente de temperatura, referente às partidas da máquina, onde o mecanismo de fadiga atua, saltos significativos na evolução do dano aparecem, indicando a severidade do dano por fadiga.

Os resultados obtidos mostram-se coerentes com o esperado e apontam a robustez da integração dos algoritmos desenvolvidos junto ao sistema de monitoramento.

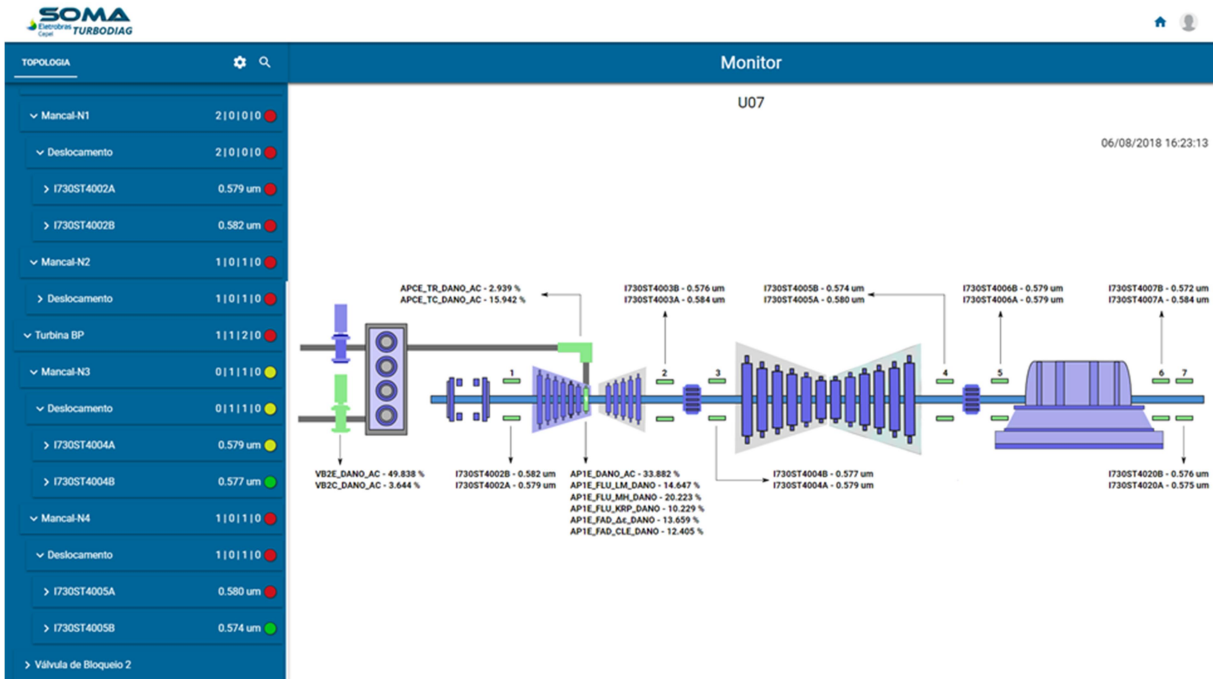


FIGURA 4 – Tela do módulo monitor do sistema SOMA-TURBODIAG, onde é possível observar, em tempo real, grandezas de operação e os valores de dano acumulado pelos mecanismos de fluência e fadiga termomecânica.

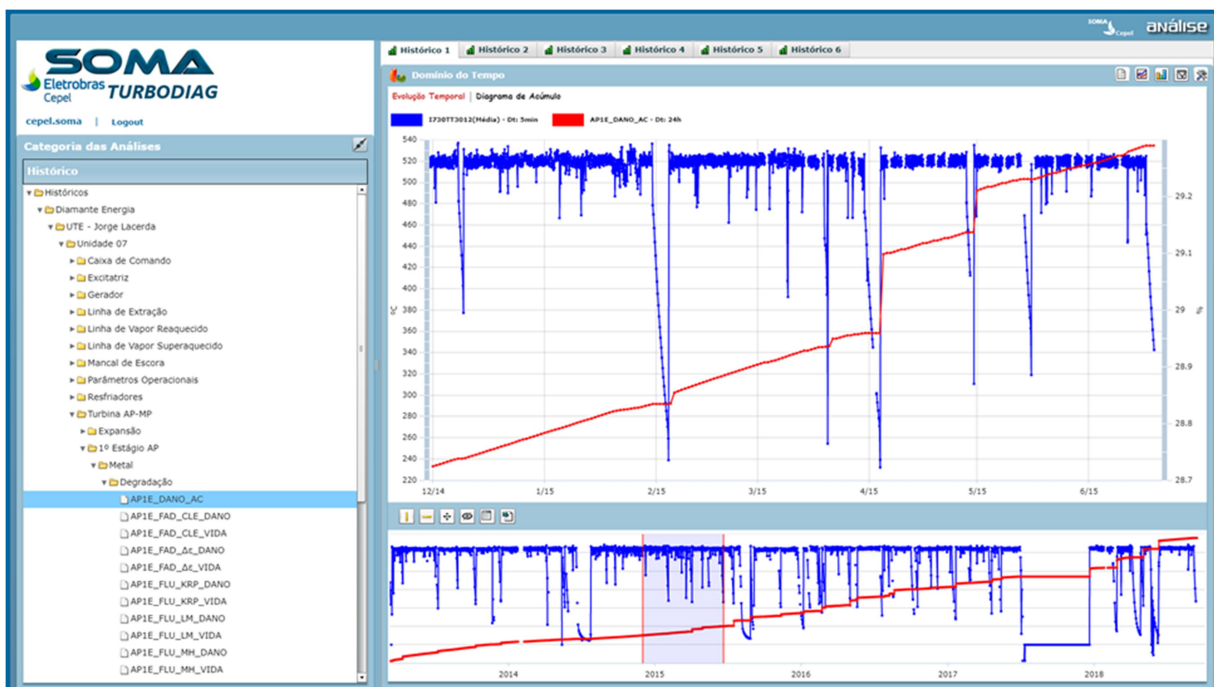


FIGURA 5 – Tela do módulo análise do sistema SOMA-TURBODIAG, onde é possível observar a evolução histórica do dano acumulado e da temperatura de metal da carcaça interna da turbina.

A Figura 6 apresenta a tela com o envelope de dano, o qual representa uma outra forma de avaliação da atuação combinada dos mecanismos de dano por fluência e fadiga termomecânica. São apresentados três diagramas, um linear e dois bi lineares. Envelopes de dano bi lineares são obtidos a partir de ensaios de fadiga termomecânica. Estes ensaios podem ser realizados em materiais isentos de dano e em materiais degradados após o uso em campo. Deve-se observar que envelopes de dano bi lineares restringem sobremaneira a região de segurança, pois um pequeno dano de fadiga limita significativamente o dano máximo por fluência a que o material pode ser submetido, para que a integridade estrutural do componente não seja comprometida.

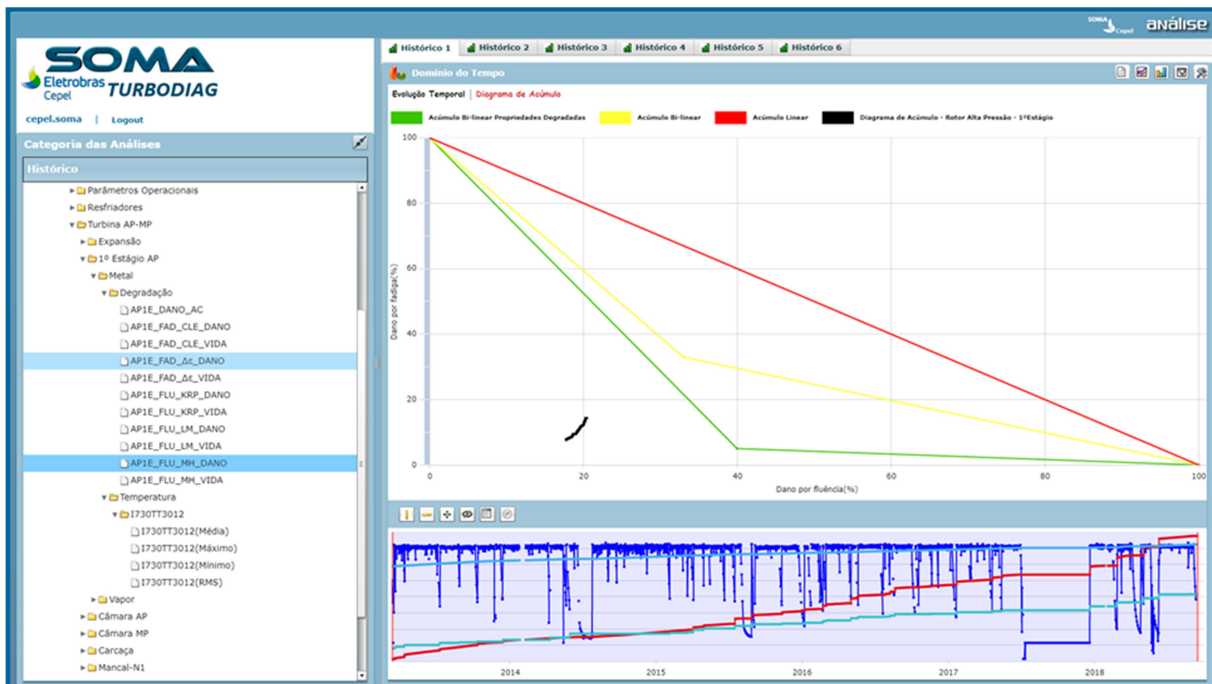


FIGURA 6 – Tela do módulo análise do sistema SOMA-TURBODIAG, onde é possível observar os diagramas de acúmulo de dano por fluência e fadiga.

Considerando o fato que os algoritmos foram elaborados para funcionarem recebendo dados periódicos do sistema de supervisão de uma usina, e que os mesmos disponibilizam seus dados para apresentação visual no mesmo sistema ou em qualquer outra ferramenta de interesse, conforme apresentado nas figuras anteriores, pode-se considerar que os mesmos atenderam a demanda atual do sistema elétrico brasileiro, que não possui uma ferramenta computacional de prognóstico para avaliação dos mecanismos de dano por fluência e fadiga termomecânica em rotores de turbinas a vapor.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Os algoritmos inseridos no sistema desenvolvido, baseado nas grandezas de operação medidas em campo para estimar a vida de rotores de turbinas a vapor submetidos aos mecanismos de dano por fluência e fadiga termomecânica, medem o acúmulo de dano referente ao período de tempo determinado dentro do arquivo de entrada de dados. As informações de saída são disponibilizadas na interface gráfica da plataforma SOMA-TURBODIAG por meio de gráficos de evolução do dano por fluência ( $D_C$ ) e fadiga termomecânica ( $D_F$ ) ao longo do tempo e por meio do diagrama  $D_F$  versus  $D_C$ . Neste diagrama, o par ordenado ( $D_C$ ,  $D_F$ ) representa um ponto e é possível visualizar a trajetória deste ponto em direção em relação a regiões de operação insegura.

Pode-se considerar que a ferramenta apresentada no informe técnico atende a demanda atual do sistema elétrico brasileiro, que não possui uma ferramenta computacional de prognóstico para avaliação do mecanismo de dano por fluência e fadiga termomecânica em rotores de turbinas a vapor.

A metodologia apresentada mostrou ser uma poderosa ferramenta para o acompanhamento da condição operacional de componentes críticos de uma usina termelétrica, podendo ser utilizada pelas equipes de operação e manutenção para auxiliar em processos de tomada de decisão, no planejamento de inspeções, e até mesmo fornecer orientações em relação aos regimes de operação mais adequados para cada equipamento e instalação pela perspectiva da gestão da expectativa de vida destes ativos.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KEATLEY, P., SHIBLI, A., HEWITT, N. J., "Estimating Power Plant Start Costs in Cyclic Operation" *Applied Energy*, v. 111, pp. 550–557, 2013.
- (2) ABE, F., "Introduction". In: Abe, F., Torsten-Ulf, K., Viswanathan, R. (eds), *Creep-resistant Steels*, chapter 1, Cambridge, Woodhead Publishing, 2008.

- (3) MITROVIĆ, D., ŽIVKOVIĆ, D., "Estimated Consumption of Working Life of high Pressure Steam Turbine Rotor in Stationary Work", *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, v. 1, n.8, pp 1083-1090, 2001.
- (4) LARSON, F.R. E MILLER, J., "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stress", *Transactions of ASME*, v. 74, pp. 765-775, 1952.
- (5) MANSON, S. S., HAFERD, A. M., "A Linear Time-Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress-Rupture Data", NACA Technical Note 2890, 1953.
- (6) TIMO, D. P., "Designing Turbine Components for Low Cycle Fatigue", In: LITTLER, D. J. (ed), *Thermal Stresses and Thermal Fatigue*, Session IV, pp. 453-469, Butterworths, 1969.
- (7) VISWANATHAN, R., *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*, 2 ed. New York, ASM International, 1993.
- (8) HOLDSWORTH, S. R., "Creep-fatigue Properties of High Temperature Turbine Steels", *Materials at High Temperatures*, v. 18, n.4, pp. 261-265, 2001.
- (9) ZHAO, N., WANG, W., JIANG, J., LIU, Y., "Study of Creep-Fatigue Behavior in a 1000 MW Rotor Using a Phenomenological Lifetime Model" *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 31, n. 2, pp. 605-614, 2017.
- (10) ROBINSON, E. L., "Effect of Temperature Variation on the Long-time Rupture Strength of Steels", *Transactions of ASME*, v. 74, pp. 777-781, 1952.
- (11) MINER, M. A., "Cumulative Damage in Fatigue", *Journal of Applied Mechanics*, v. 12, pp. A159-A164, 1945.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Bruno Reis Cardoso

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (2004), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (2007) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2017). Atualmente é pesquisador II do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando principalmente nos seguintes temas: alta temperatura, avaliação de integridade, fluência, fadiga, estimativa de vida residual, caldeiras e turbinas.