

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

SISTEMA DE INFORMAÇÃO PARA MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DO DESEMPENHO TERMODINÂMICO OPERACIONAL DE UMA PLANTA DE POTÊNCIA MODULAR EQUIPADA COM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Ciro Colonna Ribeiro, ciro_cr@hotmail.com¹

João Luiz Marcon Donatelli, donatelliufes@gmail.com¹

José Joaquim Conceição Soares Santos, jjcsantos@yahoo.com.br¹

Carla César Martins Cunha, carla@ele.ufes.br¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Resumo: No Brasil, a geração hidroelétrica é tradicionalmente predominante, mas, nos últimos anos, a participação das termelétricas na geração de energia elétrica tem ganhado importância, incluindo as equipadas com motores de combustão interna. Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de informação para o monitoramento e diagnóstico do desempenho termodinâmico operacional de uma termelétrica equipada com motores de combustão interna. O sistema de informação em questão constitui uma ferramenta muito importante, capaz de auxiliar positivamente nas atividades de operação e manutenção. O processo de desenvolvimento do referido sistema é discutido em cada etapa, abordando as características e dificuldades que surgiram, bem como as soluções implementadas. O conjunto de dados para a modelagem do estado de referência estava incompleto, o relatório técnico do comissionamento muito pobre em informações e a execução de testes de desempenho completos era impossível e onerosa. Porém, dados técnicos adicionais foram usados para superar essas dificuldades. O sistema de informação foi concebido para usar somente dados provenientes da instrumentação existente e disponibilizada no sistema supervisor da termelétrica. Assim, considera-se que a ferramenta desenvolvida apresenta características práticas e bons resultados, úteis na função de auxílio à operação e manutenção da termelétrica.

Palavras-chave: monitoramento e diagnóstico, desempenho termodinâmico, termelétrica.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a geração hidroelétrica é tradicionalmente predominante, mas, nos últimos anos, a participação das termelétricas na geração de energia elétrica tem ganhado importância. Neste cenário se inclui também as usinas termelétricas equipadas com motores alternativos de combustão interna (MACI), que são normalmente concebidas como usinas de disponibilidade. Assim, no caso de operação quase continuada dessas termelétricas, manter, ou até aumentar, seu desempenho é oportuno e importante, tanto do ponto de vista econômico como ambiental.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema de informação para o monitoramento e diagnóstico do desempenho termodinâmico operacional de uma usina termelétrica equipada com MACI. Esse sistema foi concebido para usar somente dados provenientes da instrumentação existente e disponibilizada no sistema supervisor da termelétrica. A aquisição dos dados não é automática e muito menos em tempo real, mas, mesmo assim, esse sistema permite monitorar e diagnosticar o desempenho termodinâmico operacional da usina, constituindo-se em uma ferramenta muito importante e prática, capaz de auxiliar positivamente nas atividades de operação e manutenção.

O processo de desenvolvimento desse sistema de informação é discutido em cada etapa, abordando as características e obstáculos que surgiram, bem como as soluções implementadas. A definição do estado de referência, que é muito importante para o diagnóstico termodinâmico de sistemas térmicos, apresentou muitas dificuldades. O conjunto de dados para a modelagem do estado de referência encontrava-se incompleto, o relatório técnico do comissionamento da termelétrica estava muito pobre em informações e a execução de testes de desempenho completos nos motores e seus geradores mostrou-se impossível e onerosa. Contudo, dados técnicos adicionais, provenientes de várias fontes, foram usados, juntamente com suposições adequadas, ajustes e modelagens em um simulador de processo (*Thermoflex*), para superar essas dificuldades e obter o estado de referência a partir de alguns poucos ensaios.

A configuração básica da usina termelétrica apresenta 20 motores de combustão interna, sendo praticamente “iguais” e independentes, isto é, sem interferência no desempenho termodinâmico um do outro, pois cada um é considerado um volume de controle único no qual ocorre a principal conversão de energia (combustível em trabalho) e seus rejeitos térmicos descartados no meio ambiente. Assim, as funções de diagnóstico e prognóstico concebidas não seguem exatamente nenhuma das metodologias descritas na literatura, que são capazes de explorar as interdependências entre os diversos componentes de um sistema térmico, pois neste caso tais capacidades não se mostraram necessárias. Portanto, o sistema de informação desenvolvido é considerado uma ferramenta com características práticas, com resultados úteis para o auxílio à operação e manutenção da termelétrica.

2. DESCRIÇÃO DA TERMELÉTRICA

A usina termelétrica em questão é composta, como já mencionado anteriormente, por 20 motores alternativos de combustão interna, modelo Wärtsilä W20V32, com capacidade nominal de 9.000 kW nas condições ISO. Cada motor é acoplado a um gerador elétrico modelo AvK Cummins DIG 167g/10 – 13,8 kV – 10.913 kVA. As unidades motogeradoras são montadas em paralelo, com admissão de ar, descarga de gases de exaustão e radiadores independentes, arranjadas em quatro módulos de cinco motores. A potência elétrica nominal é de 8.822 kW nas condições ISO, mas, devido provavelmente às condições ambientais médias locais, a potência elétrica máxima permitida foi fixada no sistema supervisório em 8.730 kW, determinando uma capacidade instalada total de 174,6 MW.

O motor Wärtsilä W20V32 possui 20 cilindros em V, com diâmetro de 320 mm e curso de 400 mm, potência de eixo nominal de 9.000 kW nas condições estabelecidas pela ISO 3046-1, com consumo específico de combustível de 183 g/kWh e rendimento de 46 %, quando no modo de operação de alta eficiência energética. O óleo combustível utilizado é o OCB-1, com poder calorífico menor que o previsto na condição ISO, necessitando ser aquecido para obter viscosidade adequada para a queima. O vapor produzido em cinco caldeiras de recuperação de calor do tipo flamotubular, cada uma acoplada a um motor e aproveitando os seus gases exaustos, destina-se principalmente ao aquecimento do óleo combustível. O ar de combustão, após ser comprimido em dois turbocompressores, é resfriado e enviado a um único coletor de ar de admissão. As turbinas são acionadas separadamente pelos gases exaustos provenientes de dois coletores de descarga. Conforme Wärtsilä (2009), nos motores que não possuem caldeiras, os gases de exaustão são lançados diretamente na atmosfera, como se pode ver no esquema da Fig. 1 que ilustra o sistema de gases de exaustão.

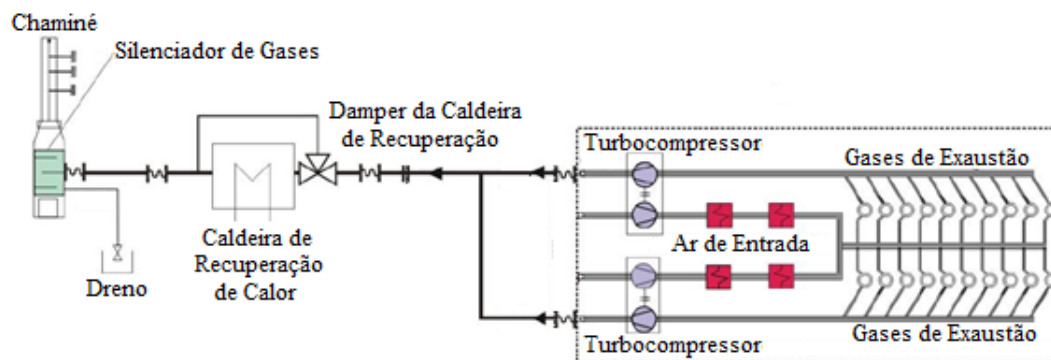


Figura 1. Esquema do sistema de exaustão de gases (WÄRTSILÄ, 2009).

Já no sistema de resfriamento do motor, a água é circulada em circuito fechado. Essa água é utilizada no inter-resfriamento do ar de combustão, para resfriar o óleo lubrificante e também o bloco do motor. O calor absorvido pela água é rejeitado para o ar atmosférico em radiadores remotos. O motor possui 2 radiadores com 6 ventiladores cada. O controle da temperatura da água de resfriamento nos circuitos baixa (resfriamento do ar e do óleo lubrificante) e alta (resfriamento do bloco do motor) temperaturas é realizado por meio de válvulas termostáticas.

Finalmente, no sistema supervisório da termelétrica são feitas, da sala de controle, as principais manobras operacionais e o monitoramento do desempenho por meio, basicamente, da observação dos parâmetros medidos e com aquisição automática neste sistema. Contudo, alguns parâmetros, como perda de carga no filtro de ar, não são explicitados no referido sistema supervisório. Além disso, a composição dos gases de combustão, a pressão nos coletores de descarga e a temperatura na chaminé não são medidas.

3. DEFINIÇÃO DO ESTADO DE REFERÊNCIA

O monitoramento, diagnóstico e prognóstico do desempenho termodinâmico operacional de uma usina termelétrica equipada com motor alternativo de combustão interna objetiva, basicamente, identificar as deficiências no desempenho termodinâmico da planta, a localização dos componentes defeituosos e a quantificação do impacto causado por essas deficiências, bem como os benefícios com suas soluções.

A metodologia básica prevê a comparação, em uma mesma base, isto é, nas condições ISO, do desempenho operacional (real) da planta com o desempenho considerado normal para a mesma configuração operacional. O desempenho normal deve ser determinado pela modelagem de referência. Essa modelagem de referência deve ser capaz de prescrever com exatidão o funcionamento correto da planta, mediante uma determinada configuração operacional e condições ambientais, sendo fundamental para se obter bons resultados a partir da metodologia básica de diagnóstico de desempenho termodinâmico adotada. Portanto, a metodologia de diagnóstico é baseada em modelagem.

As curvas de desempenho dos motores em função das diversas configurações operacionais e condições ambientais de funcionamento da planta, que são as informações completas e ideais para elaboração da modelagem de referência, não foram encontradas de forma completa na documentação técnica dos testes de comissionamento da termelétrica e nem fornecidas pelo fabricante dos motores. Assim, mediante a essa dificuldade, soluções alternativas foram adotadas para se obter uma boa modelagem de referência, que fosse simples, exata e adequada ao sistema para monitoramento e diagnóstico de desempenho termodinâmico da termelétrica.

A realização de testes de desempenho em todos os motores, considerando o uso de um conjunto pertinente de instrumentação, incluindo instrumentos adicionais aos existentes, permitiria o fechamento dos balanços de massa e energia. Contudo, a realização de teste apenas em um motor e com a instrumentação existente, exigiu a necessidade de ajustes nos balanços de massa e energia por meio de suposições em modelagem desenvolvida no simulador de processos *Thermoflex*, além da utilização de uma modelagem de referência única para todos os motores.

Ajustes nos balanços de massa e energia, considerando a alteração dos parâmetros não medidos para se obter uma melhor concordância entre os resultados do teste (medidos), da simulação (modelagem do motor com caldeira de recuperação de calor no *Thermoflex*) e do fabricante, não proporcionaram bons resultados. Os ajustes nos balanços de massa e energia baseados na distribuição percentual dos fluxos de calor, conforme dados do fabricante do motor, também usando modelagem no *Thermoflex*, apresentaram melhores resultados. Cabe mencionar que as potências elétricas e consumo de combustível de teste foram considerados nestes ajustes. Assim, o estado de referência usado para o diagnóstico do desempenho termodinâmico da termelétrica é definido por um conjunto de curvas obtidas a partir da modelagem de referência baseada na distribuição percentual dos fluxos de calor, conforme dados do fabricante do motor. As equações ajustadas, a partir dessas curvas, foram usadas no *MS-Excel*, onde se realiza os cálculos do diagnóstico de desempenho termodinâmico, para evitar a necessidade continuada de uso do *Thermoflex*, que foi muito útil no ajuste da modelagem de referência.

As correções de potência e consumo específico das condições de teste para as condições ISO são feitas conforme as normas ISO 3046-1 (ISO, 2002a) e ISO 15550 (ISO, 2002b), além de informações do fabricante dos motores, sendo, de acordo com as referidas normas ISO, preferencial a utilização das informações dos fabricantes, quando existirem.

4. MODELAGEM DAS FUNÇÕES DE DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO

Os índices de desempenho, usados nas funções de diagnóstico e prognóstico, são calculados no ambiente do *MS-Excel* a partir de dados provenientes de um banco de dados. A aquisição desses dados é feita manualmente, sendo os mesmos constituídos basicamente por parâmetros medidos e disponibilizados no sistema supervisor da termelétrica. Os dados são organizados para cada hora de operação da termelétrica, considerando condição de regime permanente e sem falhas (erros grosseiros) de instrumentação. Entretanto, algumas leituras relacionadas às caldeiras de recuperação de calor são realizadas manualmente em instrumentação de campo.

O cálculo desses índices de desempenho é executado para a condição operacional e para a condição de referência, onde os parâmetros ambientais são os informados na ISO 3046-1 e ISO 15550. Assim, muitas vezes esses índices precisam ser corrigidos da condição operacional para a condição ISO e vice-versa. As expressões adequadas para essas correções podem ser encontradas na documentação técnica do comissionamento da termelétrica e nas citadas normas.

4.1. Funções de Diagnóstico

A metodologia básica de diagnóstico de desempenho termodinâmico prevê a comparação dos índices de desempenho nas condições operacionais e de referência. Contudo, nas funções de diagnósticos descritas a seguir, também ocorre a comparação com índices de desempenho informados pelo fabricante dos motores e com os obtidos nos outros motores. Além disso, algumas funções permitem visualizar tendências e comparar valores dos diversos parâmetros usados nos cálculos.

O principal índice de desempenho dos motores é o *Consumo Específico de Combustível* (em g/kWh), que é determinado dividindo-se a vazão de combustível pela potência de eixo. A vazão de combustível para cada motor é medida, mas parte dele retorna e só é avaliado esporadicamente, sendo usado aqui um valor médio geral para todos os motores de 0,412 % da vazão de combustível. A potência de eixo ($\dot{W}_{eixo}$) não é medida diretamente, sendo determinada a partir da potência elétrica ($\dot{W}_{ele}$) da curva do gerador, representada pela Eq. (1). O consumo específico de combustível operacional é então corrigido para a condição ISO, conforme expressões da documentação técnica de comissionamento da termelétrica, as quais estão em conformidade com as normas ISO 3046-1 e ISO 15550.

$$\dot{W}_{eixo} = 3,067245 \times 10^{-7} (\dot{W}_{ele})^2 + 1,008232 \times \dot{W}_{ele} + 80,18165 \quad (1)$$

No sistema supervisorio da termelétrica, a potência elétrica máxima permitida é de 8.730 kW, independente das condições ambientais. Entretanto, a capacidade dos motores é influenciada pelas condições ambientais (ISO, 2002a; ISO, 2002b). Assim, como as condições ambientais variam, não parece lógico fixar a potência elétrica máxima permitida no sistema supervisorio. Portanto, na função de diagnóstico intitulada *Uso da Capacidade de Geração de Energia Elétrica*, a potência elétrica máxima que seria permitida nas condições operacionais é determinada e comparada com a potência elétrica gerada. Para isso, a potência de eixo nominal de 9.000 kW na condição ISO, conforme informação do fabricante do motor, é corrigida para a condição operacional, o que possibilita determinar a potência elétrica máxima ($\dot{W}_{ele,m\acute{a}x}$) permitida, a partir da curva do gerador, como mostra a Eq. (2).

$$\dot{W}_{ele,m\acute{a}x} = 1,94709 \times 10^{-6} (\dot{W}_{eixo,m\acute{a}x})^2 + 0,9646095 \times \dot{W}_{eixo,m\acute{a}x} - 9,085714 \quad (2)$$

A *Carga Real* do motor é a razão entre a potência de eixo corrigida para a condição ISO e a capacidade nominal do motor, que é de 9.000 kW na condição ISO.

Dois índices de desempenho são monitorados na função de diagnóstico *Derating e Desvio de Potência*. O termo *derating* significa uma redução na capacidade do motor, determinada pelo próprio sistema supervisorio da termelétrica a partir de vários parâmetros, sendo alguns não disponibilizados, com o objetivo de proteger o motor de sobrecargas. Medidas visando controlar os parâmetros que causam o *derating* podem ser viabilizadas mediante a queda de geração registrada por esse motivo. Entretanto, para isso, as expressões usadas na sua determinação deveriam ser explicitadas. Já o *desvio de potência* é determinado pela diferença entre a potência elétrica gerada e a potência elétrica setada no sistema supervisorio, que está relacionado basicamente ao desempenho da malha de controle da termelétrica.

A função de diagnóstico intitulada *Demanda Interna de Energia Elétrica na Usina* monitora informação proveniente diretamente do sistema supervisorio da termelétrica, comparando a demanda de energia elétrica na própria usina com a capacidade instalada, com a potência gerada e com um valor de referência informado pela gerência operacional da termelétrica, a saber, 2,1% da potência gerada.

Duas diferenças de temperatura relacionadas ao resfriamento do ar de combustão são calculadas na função de diagnóstico designada por *Diferenças de Temperatura no Resfriador de Ar de Baixa Temperatura*. A temperatura do ar no coletor de admissão do motor deve ser a menor possível, mas limitada por seu ponto de orvalho. A primeira diferença de temperatura é entre o ar no coletor de admissão do motor e sua temperatura de orvalho do ar, determinada pelo sistema supervisorio da termelétrica. A segunda diferença é entre a temperatura de orvalho do ar, determinada pelo sistema supervisorio, e a temperatura da água de resfriamento na entrada do resfriador de ar da baixa temperatura, sendo informado um valor a ser mantido em torno de 2°C. A temperatura de orvalho do ar também é calculada por modelagem própria, considerando o ar como gás ideal, para comparação com o valor determinado pelo sistema supervisorio.

Na função de diagnóstico intitulada *Comparação da Distribuição dos Fluxos de Calor Entre Unidades Motogeradoras ou Com as Referências*, os diversos fluxos de calor são determinados na condição operacional, sendo a sua distribuição comparada entre dois motores quaisquer na condição operacional. Também é possível comparar a distribuição dos fluxos de calor de um motor com valores de referência e informações do fabricante dos motores, mas agora na condição ISO. Os fluxos de calor rejeitados para o ambiente são provenientes do bloco do motor, do resfriador de ar de alta temperatura, do resfriador de óleo lubrificante, do resfriador de ar de baixa temperatura, dos gases de exaustão e por radiação e convecção.

Investigar anormalidades nas demais funções de diagnóstico, quando provenientes de falhas na instrumentação, é uma possibilidade oriunda da função de diagnóstico denominada *Avaliação de Parâmetros*. Um determinado parâmetro pode ser avaliado para os 20 motores. Também é possível avaliar o desvio relativo de um ou mais parâmetros entre dois motores quaisquer, sendo um definido como base de comparação. Assim, essa função permite identificar falhas nos dados, que podem ser provenientes do sistema supervisorio (instrumentação), de digitação (instrumentação de campo) ou erro de cálculo. Outra utilidade desta função de diagnóstico é a possibilidade de comparação, parâmetro a parâmetro, entre dois motores com desempenhos diferentes, na busca de causas específicas.

Na função de diagnóstico designada *Coefficiente Global de Transferência de Calor*, esse índice de desempenho é calculado para cada uma das cinco caldeiras de recuperação de calor da termelétrica. Esse cálculo exige a composição dos gases de exaustão, a área de troca térmica da caldeira (266 m²), pressões, temperaturas e vazões em vários pontos, para determinação completa do balanço de energia. Assim, este índice de desempenho pode ser comparado com um valor de referência para a caldeira, permitindo monitorar a eficiência de transferência de calor na mesma. Incrustações no lado água e depósitos de fuligem no lado gás podem prejudicar a transferência de calor na caldeira.

Na função de diagnóstico nomeada *Perda de Carga no Lado Gás*, monitora-se esse parâmetro diretamente pela leitura, em campo, de um manômetro diferencial localizado no corpo da caldeira de recuperação de calor. O valor lido é comparado com um valor de referência, obtido por meio do teste de desempenho realizado em uma das cinco caldeiras. A perda de carga no lado gás varia com a vazão de gases através da caldeira e do depósito de fuligem nos tubos. O monitoramento deste índice de desempenho, combinado com o *coeficiente global de transferência de calor*, permite determinar a necessidade de limpeza nos tubos da caldeira.

A quantidade de vapor produzida na caldeira de recuperação de calor na condição operacional é comparada com a geração máxima de vapor que seria possível com o fluxo de gases de exaustão disponibilizado pelo motor na função de diagnóstico designada por *Uso dos Gases de Exaustão para Geração de Vapor*. A soma dessas diferenças nas cinco caldeiras indica o potencial de geração de vapor adicional que poderia ser utilizado para diversos fins. A geração de

vapor operacional, embora não medida, foi calculada por meio de balanço de massa e energia na caldeira. A produção máxima de vapor na caldeira é estimada considerando-se que a vazão de gases de exaustão disponibilizada pelo motor na condição operacional escoe integralmente pela caldeira (*dampers* da caldeira 100% aberto).

Na função de diagnóstico intitulada *Análise de Tendência*, a maioria dos índices de desempenho das funções de diagnóstico descritas é calculada para todos os lotes de dados que compõem um determinado período de tempo escolhido para ser analisado. Assim, é possível analisar a evolução ao longo do tempo dos índices de desempenho e também dos parâmetros. Os dois índices não analisados nesta função de diagnóstico são a distribuição dos fluxos de calor no motor, de referência, modelagem própria e a informada pelo fabricante do motor, além do desvio relativo de parâmetros entre dois motores, por não ter sentido físico.

4.2. Funções de Prognóstico

Os componentes da termelétrica não apresentam interdependência, sendo motores, isto é, volumes de controle, independentes e montados em paralelo. Assim, para o prognóstico de desempenho termodinâmico, não se faz necessário e vantajoso o uso de uma modelagem capaz de determinar o desempenho dos motores face à eliminação das deficiências, que são normalmente identificadas por volume de controle. Neste caso, o desempenho dos motores com e sem deficiências seriam comparados para determinar os ganhos com suas eliminações. Portanto, considerando as características do sistema térmico (termelétrica) em análise, as funções de prognóstico concebidas exploram características práticas, como, por exemplo, simular o desempenho da termelétrica com os motores operando a 100% de carga para as condições ambientais de operação, assumindo o desempenho do melhor motor.

As funções de prognóstico concebidas utilizam como base de comparação três desempenhos, a saber, o de referência, o do melhor motor e o informado pelo fabricante dos motores. Visto que o diagnóstico não é capaz de identificar deficiências específicas, o prognóstico considera a correção simultânea de todas as deficiências que afetam cada motor. Os ganhos são avaliados a partir de dados médios para cada hora de operação, mas é possível, de forma semelhante à função de diagnóstico *Análise de Tendência*, definir um período de tempo envolvendo várias horas de operação, sendo determinada a acumulação dos ganhos. Os ganhos para a termelétrica como um todo é obtido pela soma dos ganhos em cada motor.

Na função de prognóstico designada *Reserva e Desvio de Potência*, o ganho de potência elétrica devido à adoção de uma potência elétrica máxima no sistema supervisor variável com as condições ambientais, ao invés de um valor fixo de 8.730 kW, é determinado. O desvio de potência é calculado pela diferença entre a potência elétrica gerada e a potência elétrica setada no sistema supervisor, que está relacionado basicamente ao desempenho da malha de controle da termelétrica.

Na função de prognóstico nomeada *Redução no Consumo de Combustível Operacional*, determina-se a redução obtida no consumo de combustível com os motores a 100% de carga e com seus desempenhos operacionais mantidos e devidamente projetados para 100% de carga.

O comportamento do consumo específico de combustível em função da carga do motor, obtido de informações do fabricante dos motores, permite determinar o fator de projeção (*FP*) do consumo específico de combustível em função da carga (Eq. 3).

$$FP = -1,198508 \times 10^{-6} (C)^3 + 3,248777 \times 10^{-4} (C)^2 - 2,955559 \times 10^{-2} \times C + 1,905128 \quad (3)$$

A metodologia para avaliação de ganho aplicada na função de prognóstico intitulada *Redução no Consumo de Combustível Operacional*, está esquematizada na Fig. 2. As curvas para projeção do consumo específico de combustível para 100 % de carga seguem a Eq. (3). Os pontos ①, ② e ③ representam os consumos específicos projetados para 100% de carga para o motor em análise, o melhor motor e o desempenho do fabricante, respectivamente. O motor de melhor desempenho operacional é identificado pelo menor consumo específico de combustível operacional projetado para 100% de carga. As letras *E* e *F* representam, respectivamente, a economia de combustível em relação ao motor de melhor desempenho e em relação ao desempenho do fabricante.

Na função de prognóstico nomeada *Redução Combinada no Consumo de Combustível Operacional Elétrico*, determina-se a redução obtida no consumo específico de combustível, com base na potência elétrica, considerando os motores a 100% de carga e assumindo também o melhor desempenho operacional possível. Dependendo da base de comparação, os motores assumem um desses três desempenhos, o de referência, o do melhor motor e o informado pelo fabricante dos motores.

Na sequência básica de cálculo desta função de prognóstico a carga real do motor é calculada, permitindo determinar o fator de projeção do consumo específico, de acordo com Eq. (3), e o consumo específico de combustível operacional elétrico projetado para 100% de carga.

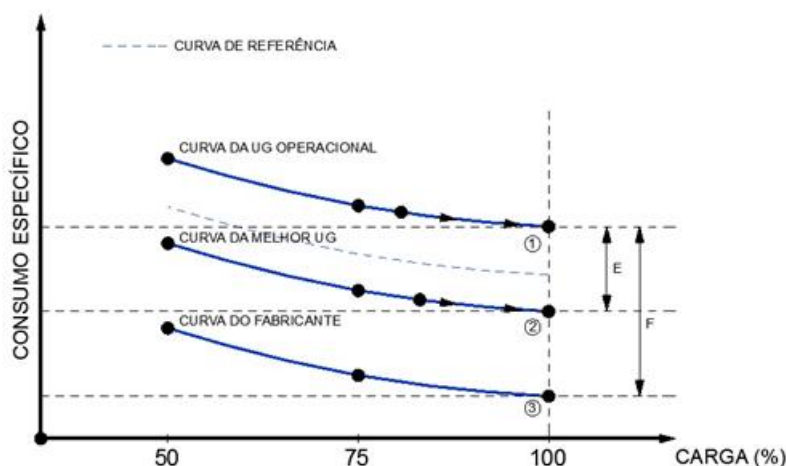


Figura 2. Metodologia para avaliação de ganho aplicada na função de prognóstico *Redução no Consumo de Combustível Operacional*.

A metodologia para avaliação de ganho aplicada na função de prognóstico intitulada *Redução Combinada no Consumo de Combustível Operacional Elétrico*, está esquematizada na Fig. 3. As curvas para projeção do consumo específico de combustível elétrico para 100% de carga seguem a Eq. (3). Os pontos ①, ② e ③ representam os consumos específicos projetados para 100% de carga para o motor em análise, o melhor motor e o desempenho do fabricante, respectivamente. O motor de melhor desempenho operacional é identificado pelo menor consumo específico de combustível operacional projetado para 100% de carga. A letra A representa a redução no consumo específico de combustível se o motor passar a operar com desempenho do fabricante. A letra B representa a redução no consumo específico de combustível se o motor passar a operar com 100% de carga. A letra C representa a redução no consumo específico de combustível combinando esses dois efeitos. A letra D representa essa redução no consumo específico de combustível quando a base de comparação é o motor de melhor desempenho.

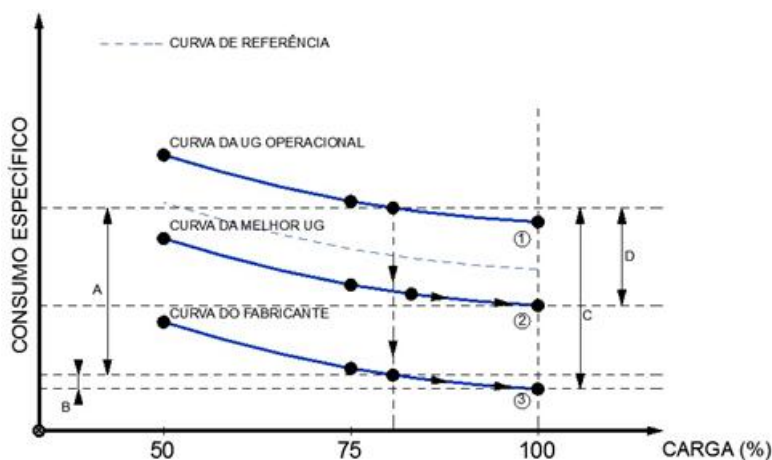


Figura 3. Metodologia para avaliação de ganho aplicada na função de prognóstico *Redução Combinada no Consumo de Combustível Operacional Elétrico*.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Alguns resultados obtidos, aplicando-se as funções de diagnóstico e prognóstico do desempenho termodinâmico a um conjunto de dados referentes a apenas uma hora de operação da termelétrica, são apresentados e discutidos a seguir. Portanto, a função designada *Análise de Tendência* não foi aplicada devido à inexistência de dados para um período de operação. Os dados analisados podem ser encontrados em Ribeiro (2014).

O *Consumo Específico* de combustível, mostrado na Fig. 4, deve ser analisado em conjunto com a carga do motor, mostrada na Fig. 5, pois o consumo específico é influenciado pela carga. Uma comparação direta dos consumos específicos requer a projeção desses valores para 100% de carga. Contudo, visto que as cargas são praticamente as mesmas, tal comparação pode ser realizada e, além disso, nota-se que o consumo específico operacional e de referência estão bem acima do desempenho declarado pelo fabricante. O motor da UG02 é identificado como o de melhor desempenho, pois apresenta o menor consumo específico de combustível (190,7 g/kWh), e o motor da UG20 o pior, pois possui o maior valor (195,4 g/kWh).

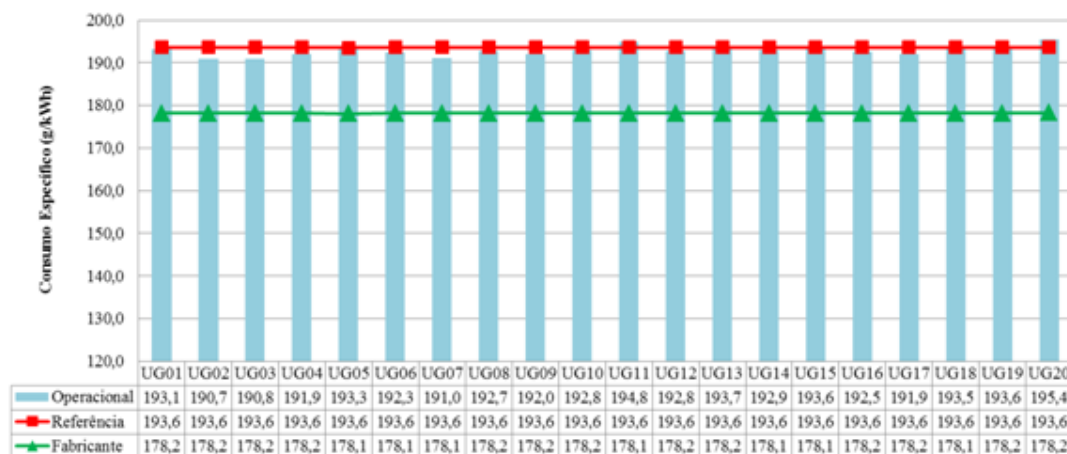


Figura 4. Consumo Específico de combustível nos motores das UGs.

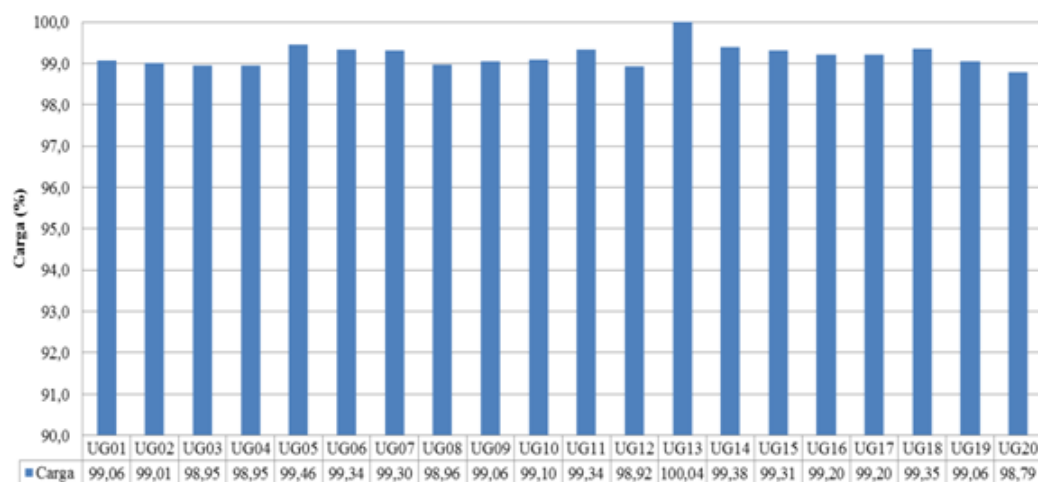


Figura 5. Carga dos motores das UGs.

A potência elétrica máxima permitida, mostrada na Fig. 6, é determinada a partir das condições ambientais locais e da pressão no coletor de ar de admissão do motor. A potência elétrica gerada é, de forma geral, menor que potência elétrica máxima permitida, que apresenta valor anormal para o motor da UG13. Esse valor anormal é explicado pela falha na medição da pressão no coletor de ar de admissão do referido motor, conforme mostrado na Fig. 7, pois as condições ambientais são as mesmas para todos as máquinas. Visto que a pressão no coletor de ar de admissão do motor também influencia no cálculo da carga, isso também explica uma carga superior a 100% no motor da UG13, mostrado na Fig. 5. Desta forma, fica evidente a importância da função de diagnóstico designada *Avaliação de Parâmetros* para identificar falhas na instrumentação, isto é, medições com erros grosseiros.

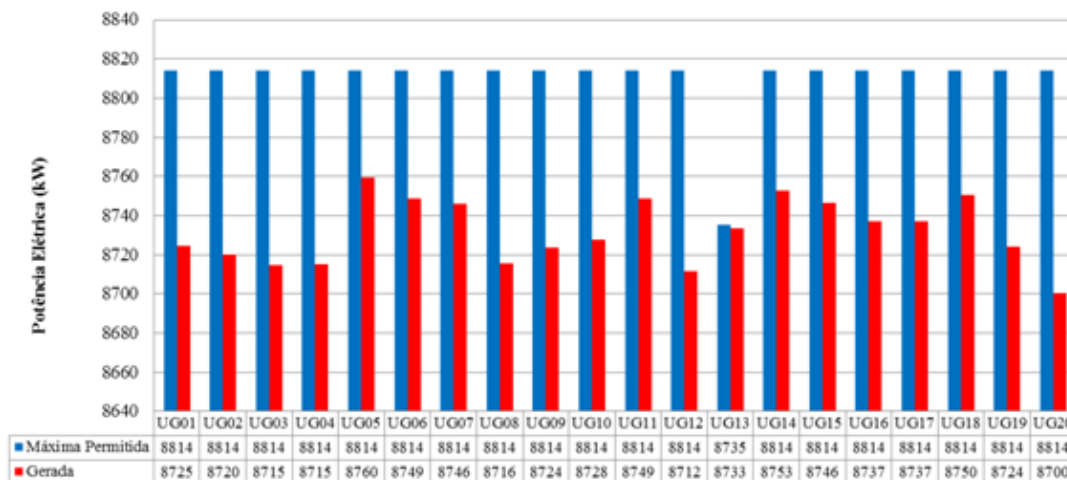


Figura 6. Potência elétrica gerada e a máxima permitida.

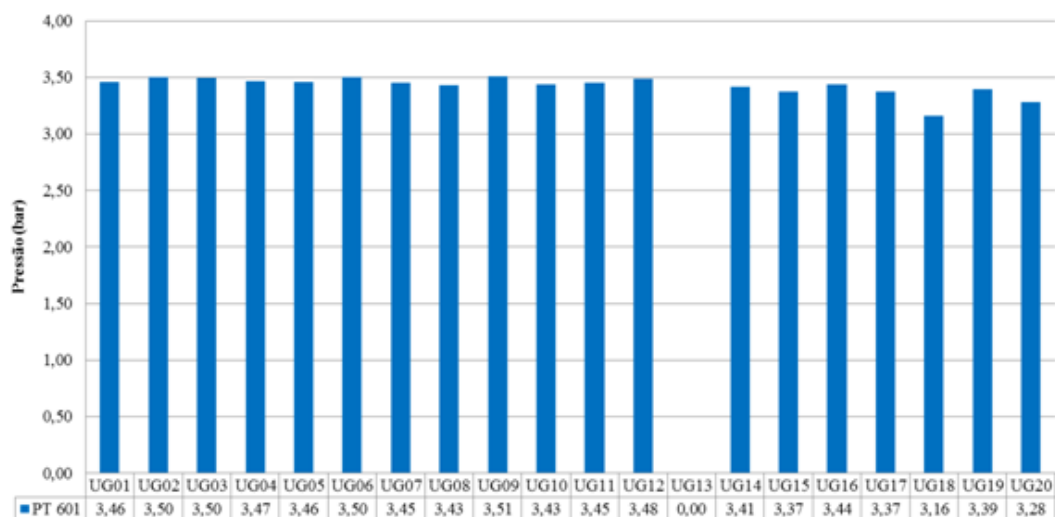


Figura 7. Pressão no coletor de ar de admissão dos motores.

Na metodologia básica das funções de prognóstico, o ganho é determinado pela recuperação do desempenho ótimo, e não pela eliminação de deficiências específicas, pois as funções de diagnóstico, como concebidas, não identificam deficiências específicas.

A economia de combustível operacional que pode ser obtida com os motores operando a 100% de carga e mantendo o seu desempenho operacional é mostrada na Fig. 8. Neste caso, a economia de combustível na termelétrica seria de 363,07 kg/h, considerando o motor da UG02, de melhor desempenho, como referência.

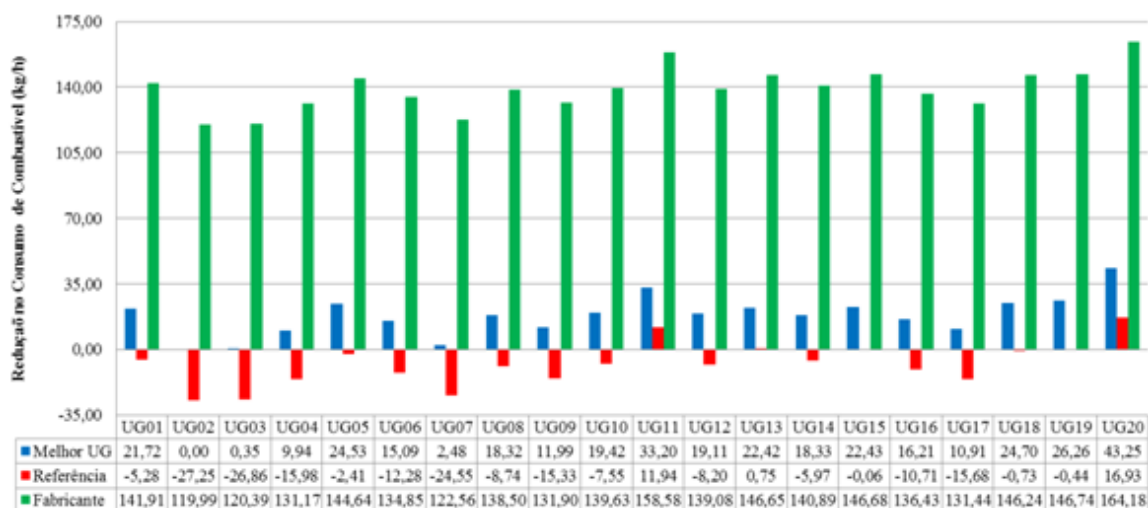


Figura 8. Resultado da função de prognóstico *Redução no Consumo de Combustível Operacional*.

O resultado da função de prognóstico nomeada *Redução Combinada do Consumo Específico de Combustível Operacional Elétrico*, conforme ilustrado na Fig. 9, representa um ganho total para a termelétrica de 2,2 g/kWh considerando o motor da UG02, de melhor desempenho, como referência. O desempenho obtido com a modelagem do estado de referência, descrito no Item 3, às vezes é melhor e outras vezes pior que o desempenho dos motores, gerando valores positivos e negativos para os mesmos, como pode ser observado nas Fig. 8 e Fig. 9.

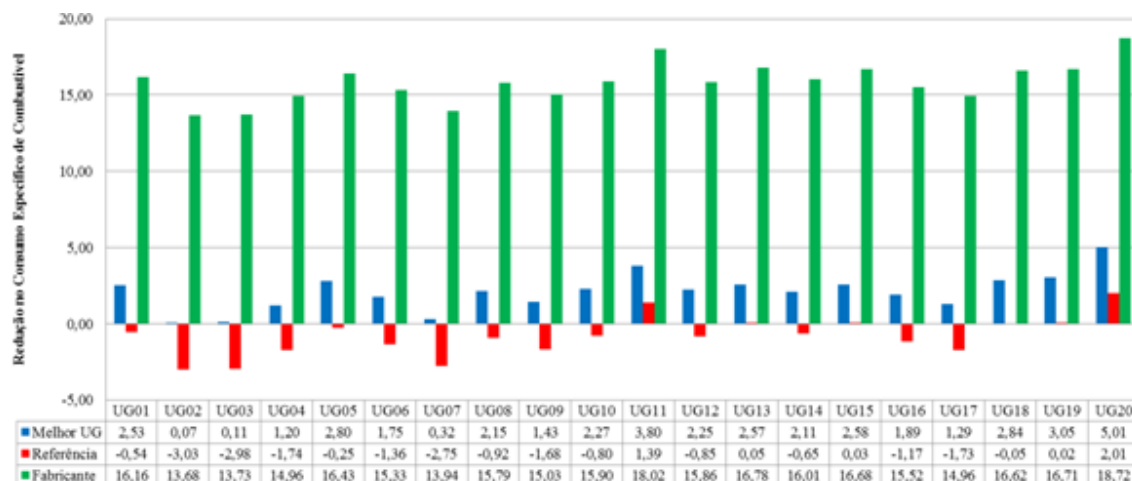


Figura 9. Resultado da função de prognóstico *Redução Combinada no Consumo Específico de Combustível Operacional Elétrico*.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

O desenvolvimento de um sistema de informação para o monitoramento, diagnóstico e prognóstico do desempenho termodinâmico operacional de uma termelétrica equipada com 20 motores de combustão interna modelo Wärsilä W20V32, com capacidade nominal de 9.000 kW nas condições ISO, conforme descrito, foi alcançado. Apesar de ter sido aplicado para analisar dados de somente uma hora de operação, o que não permitiu usar a função de diagnóstico intitulada *Análise de Tendência*, os resultados foram considerados bons e suas características práticas são úteis e complementares ao sistema supervisorio na função de auxílio à operação e manutenção da termelétrica. Contudo, vários aspectos devem ser mais bem analisados e aprimorados.

As funções de diagnóstico concebidas não são capazes de identificar deficiências específicas, mas constituem uma boa base de informações, que em conjunto com suas flexibilidades, permite ao engenheiro ou técnico analisar o desempenho termodinâmico da termelétrica e ainda facilitar a elaboração de relatórios técnicos. Portanto, quando alguma deficiência de desempenho é detectada, mesmo que por meio de índices gerais, testes e análises específicas, às vezes usando instrumentação e técnicas especiais, devem ser realizadas para identificar e eliminar a causa. Tais funções podem também determinar a necessidade de manutenção. Por outro lado, a concepção de funções de contabilidade energética seria útil para a elaboração de relatórios técnicos mensais da termelétrica.

A condição ideal a ser considerada para a modelagem do estado de referência deve ter por base a utilização de um conjunto completo de informações de desempenho dos motores no relatório técnico dos testes de comissionamento da termelétrica. Sem essas informações, testes de desempenho nos motores, embora problemáticos e onerosos na sua execução, constituem-se uma alternativa. No caso em estudo, o teste de desempenho em apenas um dos motores, usando a instrumentação existente, foi a única opção. Porém, com medições insuficientes, suposições foram assumidas, juntamente com dados técnicos adicionais, para ajustar a modelagem do estado de referência no simulador de processo *Thermoflex*. Assim, após análise dos resultados, vários aspectos na definição do estado de referência devem ser examinados de forma mais detalhada e aperfeiçoados. Considerando as dificuldades na definição do estado de referência, outras bases de comparação foram adotadas, como o desempenho do motor de melhor rendimento, cujo caráter prático é evidente, bem como o desempenho declarado pelo fabricante.

O sistema de informação foi concebido para usar somente dados provenientes da instrumentação existente e disponibilizada no sistema supervisorio da usina. Contudo, visto que a combustão nos cilindros do motor é o principal processo de conversão de energia, a análise dos gases exaustos deve ser incluída na instrumentação existente. Outras medições adicionais são sugeridas, como a temperatura na chaminé para o fechamento do balanço de massa e energia na caldeira, além da pressão nos coletores de descarga e as temperaturas nas saídas dos compressores para uma melhor análise dos turbocompressores. Também se torna necessário explicitar todas as medições no sistema supervisorio, principalmente as usadas na determinação do *derating*, como, por exemplo, a perda de carga no filtro de ar.

A aquisição manual de dados no sistema supervisorio é uma tarefa muito trabalhosa. Uma aquisição *on-line* seria um avanço, porém necessita uma rotina para identificação de condição de operação em regime permanente para então liberar os dados para análise, visto que a modelagem é concebida para regime permanente. Além disso, como observado nos resultados, algumas medições apresentaram problemas e afetaram os índices de desempenho. Assim, a implantação de uma modelagem para reconciliação de dados com detecção de erros grosseiros certamente traria benefícios ao diagnóstico, além de auxiliar no monitoramento da instrumentação.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e à Termelétrica Viana S.A. - TEVISA, empresa geradora de energia elétrica que deu suporte financeiro a este projeto.

8. REFERÊNCIAS

- International Organization of Standardization, 2002a, "Reciprocating Internal Combustion Engines – Performance – Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumption, and test methods – Additional requirements for engine for general use – ISO 3046-1"
- International Organization of Standardization, 2002b, "Internal Combustion Engines – Determination and method for the measurement of engine power – General requirements – ISO 15550"
- Ribeiro, C.C., 2014, "Sistema de Informação para a Monitoração e Diagnóstico de Desempenho de uma Unidade Termelétrica com Motores de Combustão Interna", Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo.
- WÄRTSILÄ, 2009, "Protocolos de teste das Unidades Motogeradoras".

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFORMATION SYSTEM FOR OPERATIONAL MONITORING AND DIAGNOSING THERMODYNAMIC PERFORMANCE OF A MODULAR INTERNAL COMBUSTION ENGINE POWER PLANT

Ciro Colonna Ribeiro, ciro_cr@hotmail.com¹
João Luiz Marcon Donatelli, donatelliufes@gmail.com¹
José Joaquim Conceição Soares Santos, jjcssantos@yahoo.com.br¹
Carla César Martins Cunha, carla@ele.ufes.br¹

¹Federal University of Espírito Santo – UFES

Abstract. *In the last years, the thermal power plants are gaining importance in electric energy generation in Brazil, including those equipped with internal combustion engines. This work present the development of an information system for monitoring and diagnosing thermodynamic performance of a thermal power plant equipped with internal combustion engines. An information system for monitoring and diagnosing thermodynamic performance of these plants is a very important tool able to assist the activities of operation and maintenance. This development process is discussed in each step, approaching characteristics and difficulties that were aroused and the solutions implemented. Data set to model reference state was incomplete, very poor commissioning technical report and impossibility to execute complete performance test, but additional technical data was used to solve this problem. This system was conceived to use data available from only existing instruments of the supervisory system. Thus, a good and practical tool was developed.*

Keywords: *monitoring and diagnosis, thermodynamic performance, thermal power plant.*