

MONITORAMENTO DE PERFORMANCE DE MOTORES DE COMBUSTÃO: uma técnica indispensável para o diagnóstico de falhas ocultas

Thiago Fernandes da Costa Lima
Alisson Bispo Santos

RESUMO

Este artigo tem como objetivo divulgar um grande avanço na atividade de manutenção dos motores de combustão a gás da Unidade de Processamento de Gás Natural da UO-SEAL em Sergipe, com a implementação do monitoramento dessas máquinas sistematizando o diagnóstico de falhas e as intervenções de manutenção. Inicialmente, serão introduzidos os problemas enfrentados pela equipe de manutenção mecânica da UO-SEAL. Em seguida, será feita uma breve abordagem do funcionamento dos motores a combustão e da aplicação da técnica de monitoramento como solução para a eliminação de falhas. E, por fim, serão ilustrados e interpretados alguns resultados conseguidos com essa técnica, confirmando sua importância e viabilidade econômica no cenário atual da Petrobras.

Palavras-chaves: Monitoramento. Motores a combustão.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção, para ser estratégica, precisa estar voltada para os resultados da companhia. É preciso deixar de ser apenas eficiente para ser tornar eficaz, ou seja, não basta reparar o equipamento rápido, mas é preciso manter a função do equipamento reduzindo a probabilidade de uma parada de produção não planejada.

Os conceitos tradicionais de manutenção - após a falha ou por tempo determinado - não permitem que o desempenho dos equipamentos seja otimizado.

Com essas abordagens, muitas perdas possíveis que poderiam ser evitadas não serão, pois as paradas não planejadas e as substituições de componentes antes do tempo não permitirão a maximização dos resultados.

As experiências vividas por muitas empresas mostram que a técnica de manutenção preditiva baseada no monitoramento é capaz de enfrentar esses desafios.

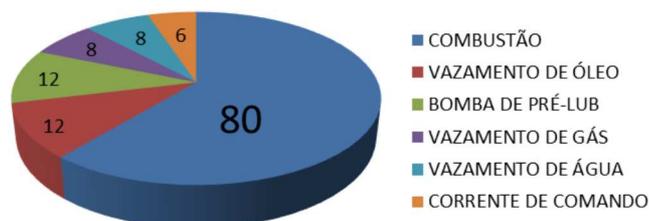
Um levantamento feito em 2014 e 2015 no Polo Atalaia em 7 motores de combustão a gás modelo SVS do fabricante *Ingersoll Rand* revelou que o número de

falhas nesses equipamentos é alarmante, totalizando 120 falhas.

Como pode ser observado no Gráfico 1, a maior causa de intervenção nessas máquinas são problemas relacionados à ineficiência da combustão nos cilindros desses motores que correspondem a 70% do total de intervenções não programadas.

Também se conclui que a execução da manutenção preventiva não é suficiente para o controle dessas falhas por elas serem ocultas, ou seja, só podem ser detectadas com a desmontagem do equipamento e com substituições de componentes, e muitas vezes sem saber qual deles é causa do problema, aumentando o custo da manutenção.

Gráfico 1 - Levantamento de falhas dos motores em 2014-2015.



Fonte: O AUTOR, 2016.

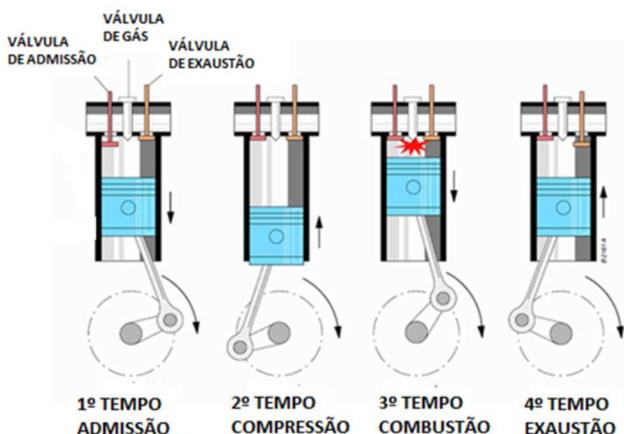
Como exemplo do custo elevado que se pode ter com a ausência de uma técnica preditiva, tem-se uma falha em que o motor ficou indisponível por 3 dias, deixando os compressores acionados por eles de enviar 420.000 m³ de gás para o processo, 24h de recurso humano desperdiçado e substituições de componentes no valor de R\$ 40.000 (cabeçote, pistão e válvulas), onde foi identificado depois de uma análise mais criteriosa que o problema estava num componente que custava R\$ 3.000,00 (bobina do sistema de ignição).

2 UMA BREVE INTRODUÇÃO AOS MOTORES DE COMBUSTÃO - CONCEITO

Motores a combustão são máquinas térmicas que transformam a energia gerada pela queima de uma mistura de ar e combustível em energia mecânica, que pode ser utilizada para acionamento de veículos e outros equipamentos, como bombas centrífugas e compressores. Um mecanismo constituído de pistão,

biela e virabrequim é o responsável por essa transformação. A Figura 1 mostra as 4 etapas de funcionamento para a maioria dos motores.

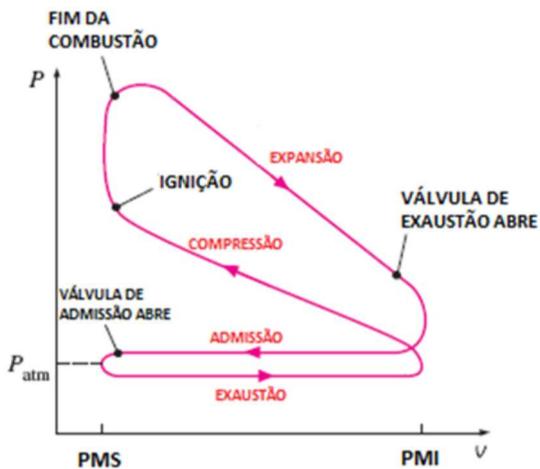
Figura 1 - Os 4 tempos de um motor a combustão.



Fonte: MITHU, 2016, traduzido pelo autor.

O funcionamento dos motores pode ser analisado dividindo o seu ciclo em diferentes processos: admissão, compressão, fornecimento de calor (centelha) e exaustão. O Gráfico 2 ilustra o ciclo de um motor a combustão real através de um diagrama de variação de pressão com o volume deslocado pelo pistão do cilindro.

Gráfico 2 - Diagrama de pressão e volume.

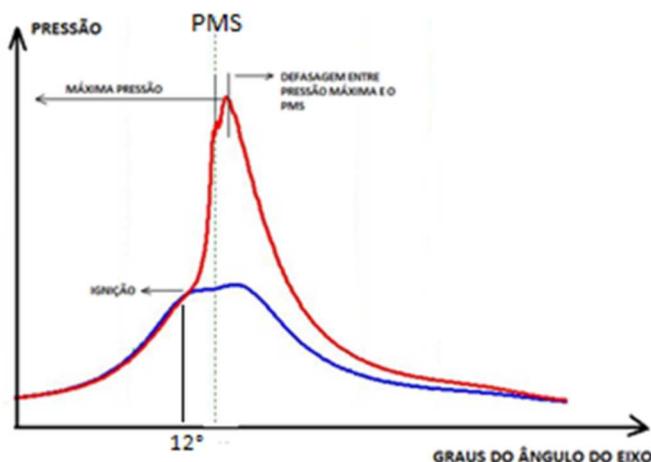


Fonte: CICLO OTTO, 2015, traduzido pelo autor.

Dentro dos cilindros de um motor a combustão, uma centelha elétrica proveniente de uma vela de ignição promove a queima da mistura de ar combustível admitida, iniciando o processo de combustão. A combustão promove a elevação da temperatura e pressão no interior do cilindro que, sendo empurrado para baixo, tem seu movimento retilíneo transformado em rotacional por intermédio do eixo de manivelas (virabrequim).

Essa pressão é influenciada por diversos fatores, sendo que o próprio deslocamento descendente do pistão contribui fortemente para a sua redução após o momento de pressão máxima decorrente da combustão ocorrida no cilindro. O Gráfico 3 mostra um gráfico da pressão interna de um cilindro função do ângulo do eixo (em vez do volume) de um motor SVS da estação de compressão da UO-SEAL gerado pelo equipamento de monitoramento da Petrobras.

Gráfico 3 - Gráfico de pressão.



Fonte: O AUTOR, 2016.

Desse gráfico é possível extrair importantes informações observadas pela engenharia de manutenção:

- a aproximadamente 12° antes do ponto morto superior (PMS - representado pelo ângulo zero do eixo), nota-se que o gráfico da pressão com combustão em vermelho se destaca, determinando uma elevação da pressão causada pelo início da combustão. Ao ultrapassar o PMS, a pressão continua a crescer devido à combustão que ainda está ocorrendo;
- o ângulo da centelha de 12° foi definido pelo fabricante do motor para que a pressão máxima seja atingida após o PMS. Nos SVSs, essa pressão é atingida em torno de 11° a 13° depois do PMS (defasagem). Nesse ponto a combustão está praticamente completa, e o movimento de descida do pistão será impulsionado pela máxima pressão da combustão, com a consequente queda na pressão e aumento do trabalho no eixo;
- com relação à transferência de trabalho, nota-se que, enquanto o gráfico com combustão (linha vermelha) supera o gráfico sem combustão (linha azul), o trabalho está sendo transferido para o motor. Por outro lado, nos tempos de exaustão, admissão e compressão são necessários fornecer trabalho ao sistema.

3 MONITORAMENTO DE PERFORMANCE

O objetivo do monitoramento é acompanhar e avaliar os dados fornecidos pelos equipamentos e com isso tomar as decisões que garantam uma maior disponibilidade e um menor custo de intervenção. Os motores a combustão são responsáveis pelo maior custo de manutenção em comparação com outros acionadores como os motores elétricos.

Por isso, o monitoramento preditivo é uma ferramenta imprescindível nessas máquinas, onde o processo de combustão induz a ocorrência de falhas ou defeitos ocultos, ou seja, falhas que não podem ser percebidas pelo operador quando o equipamento está operando nem pelo mantenedor quando ela está em manutenção.

A manutenção preventiva tradicional obriga o técnico de manutenção a realizar uma inspeção criteriosa no equipamento levando a um gasto de tempo elevado, a substituir componentes sem necessidade, elevando, consequentemente, o custo da manutenção.

Este trabalho propõe uma sistemática de diagnósticos técnicos de falhas nos motores SVS utilizando-se dos diagramas de pressão e ruídos dos cilindros para o monitoramento do processo da combustão. Tais diagramas relacionam as pressões e ruídos que ocorrem no interior do cilindro do motor, durante o seu processo de combustão, com o ângulo de rotação eixo de manivelas do motor, como mostra a Figura 4.

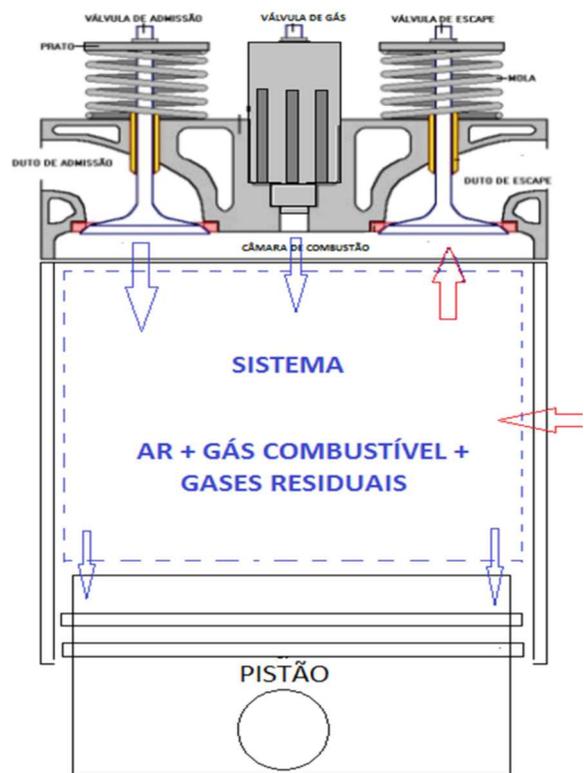
3.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA E SISTEMÁTICA DE IDENTIFICAÇÃO DAS FALHAS

A definição do sistema e das condições de contorno externas a serem monitorados determinam os componentes que serão analisados e o nível de detalhes para a localização das falhas. A Figura 2 mostra a definição do sistema e contornos do motor

SVS. O sistema a ser monitorado é a combustão no interior de cada cilindro do motor que é gerada pela mistura de ar, gás combustível e gases residuais da queima.

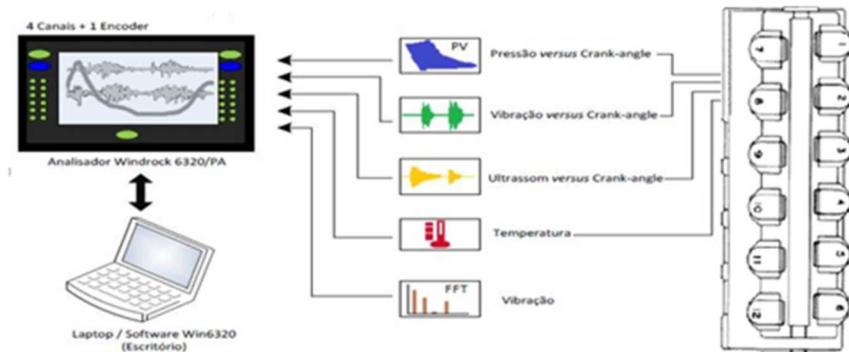
As condições de contorno externas definidas para análise são entrada de ar pela válvula de admissão, entrada de gás combustível pela válvula de gás, saída dos gases pela válvula de exaustão, entrada da centelha pela vela de ignição que apesar de não haver entrada ou saída de massa do sistema será considerada uma condição externa para efeito de análise, e por fim, o escape dos gases pelos anéis do pistão em condições normais de funcionamento.

Figura 2 - Definição do sistema e contornos.



Fonte: O AUTOR, 2016.

Figura 3 - Sistema de monitoramento.



Fonte: O AUTOR, 2016.

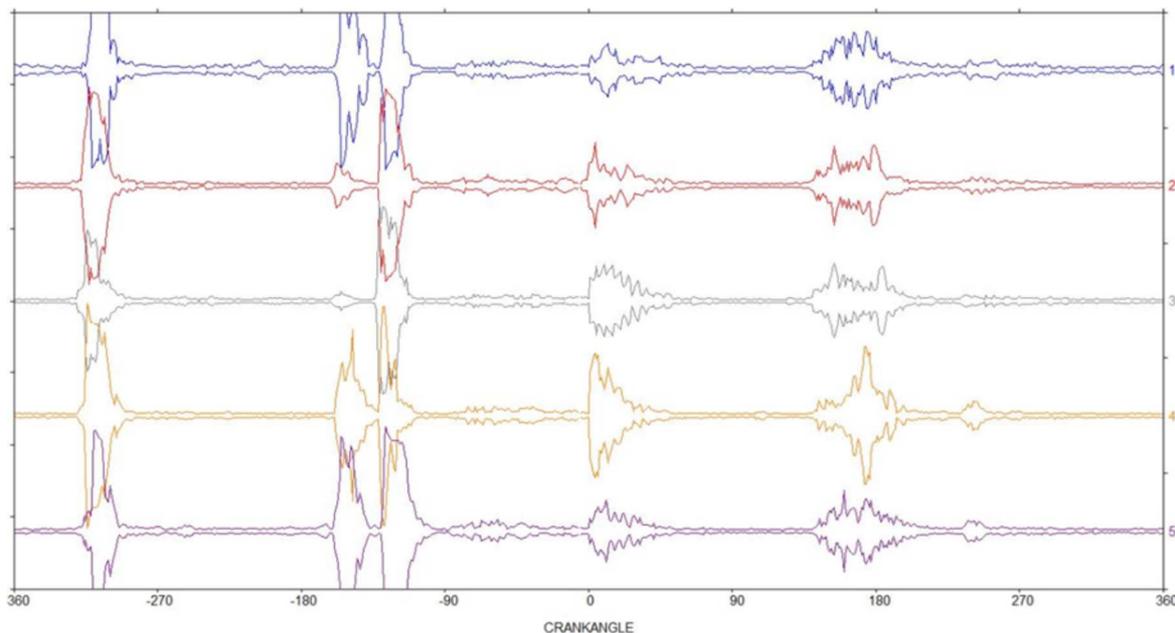
A monitoração da combustão é realizada com o auxílio de sistemas de aquisição, processamento e apresentação dos dados, representados esquematicamente na Figura 3. Os sinais captados pelos sensores são enviados para uma unidade analisadora da Windrock que é responsável pela coleta e processamento das informações captadas pelos sensores. Depois do processamento no analisador, as informações são enviadas a um computador para uma análise mais criteriosa do usuário, onde são emitidos os relatórios.

Para se ter uma ideia da geração de informações captadas e processadas, são ilustrados nos Gráficos 4 e 5 o diagrama de ultrassom com medições para um cilindro, capaz de detectar ruídos e vibrações no

interior do cilindro, e os diagramas de pressão de 6 cilindros, ambos em função do ângulo do eixo girabrequim.

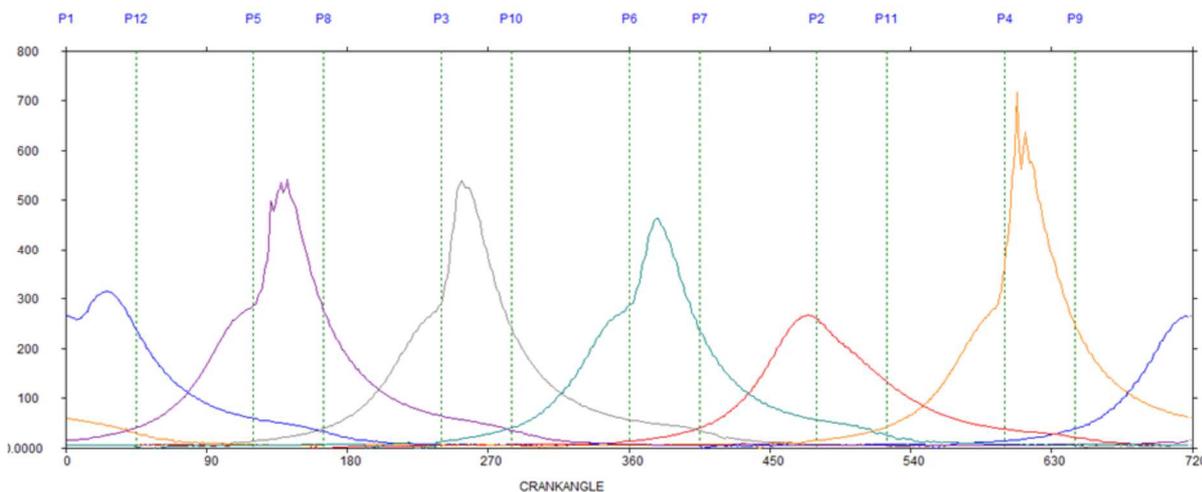
O objetivo de gerar os gráficos em função do ângulo é para melhor visualização dos momentos de abertura e fechamento das válvulas no cilindro. Esse nível de monitoração tem-se mostrado suficiente, com resultados efetivos para a segurança operacional e fornecimento de dados para a elaboração de diagnósticos precisos, que permitam detectar componentes com perda de desempenho antes que se venham falhar efetivamente.

Gráfico 4 - Diagramas de ultrassom de um cilindro.



Fonte: O AUTOR, 2016.

Gráfico 5 - Diagramas de pressão de 6 cilindros.



Fonte: O AUTOR, 2016.

A avaliação do estado de operação e o diagnóstico de falhas constituem procedimentos de caráter geral, aplicáveis ao motor ou a um de seus componentes. Contudo, em um sistema de monitoração, ambos adquirem um caráter complementar mútuo. A avaliação do estado de operação faz uma análise das condições de funcionamento do motor e de seus componentes, cujo objetivo é o de identificar possíveis anormalidades.

As conclusões sobre o estado de operação, formuladas através desta análise, fornecem, então, os subsídios necessários para o diagnóstico de falhas e a consequente sugestão de medidas operacionais e/ou de manutenção a serem adotadas. A Figura 4 mostra a sistemática de intervenções a serem adotadas, baseada na análise dos gráficos gerados.

Figura 4 - Sistemática de diagnóstico de falhas e intervenção.

Cilindro do motor: Relatório de performance		
Parâmetro	Status	Comentários
Cilindro 01	A	Inspecionar a válvula de exaustão
Cilindro 02	A	Inspecionar sistema de ignição
Cilindro 04	B	Inspecionar cilindro com o boroscópio e verificar existência de carbonização
Cilindro 09		Duto de refrigeração posicionado a frente da válvula de tomada de pressão. Alterar o percurso
Cilindro 10	A	Inspecionar sistema de ignição
Cilindro 11	A	Inspecionar sistema de ignição

Tabela de status		
Status	Cor	Ação
A	Red	Parar imediatamente
B	Orange	Reparar o mais rápido possível
C	Blue	Reparar na próxima manutenção programada
D	Light Green	Monitorar a evolução
E	Dark Green	Não requer ação

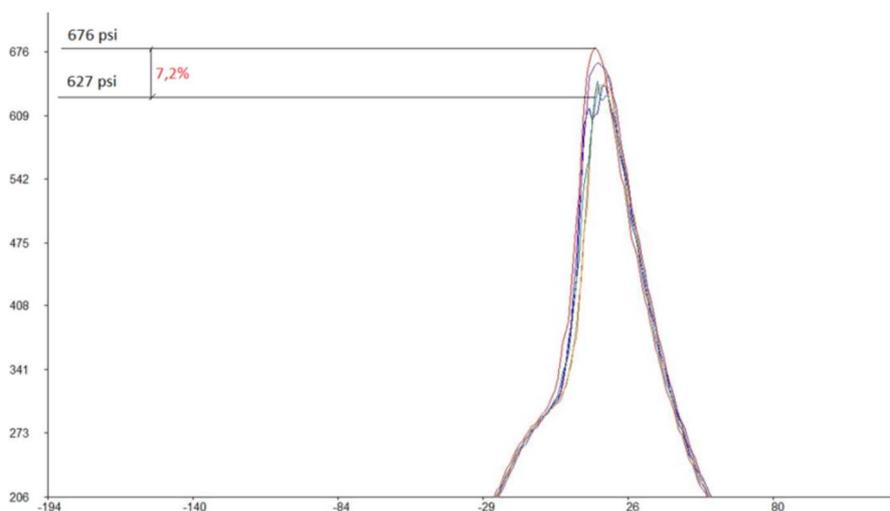
Fonte: O AUTOR, 2016.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Gráfico 6 apresenta o gráfico da pressão no interior do cilindro 4 do SVS 3 que está queimando bem, mas indicando um comportamento cíclico da máxima pressão de combustão com uma variação em torno de 7,2%. É notório de pesquisas realizadas em motores que esse comportamento é devido à variação da mistura de ar, combustível e gases residuais em cada ciclo, o que deve gerar uma diferença de até 10% da pressão máxima sem comprometer a queima.

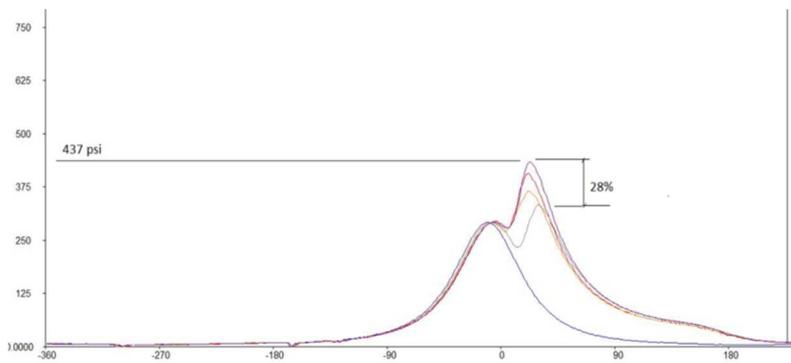
Já no cilindro 2, tem-se um problema de baixa temperatura de combustão e uma variação de pressão de 28% (Gráfico 7), indicando que esse comportamento cíclico foi agravado por um possível problema de centelhamento na vela. Após a intervenção constatamos as velas com os eletrodos gastos.

Gráfico 6 - Comportamento cíclico da pressão.



Fonte: O AUTOR, 2016.

Gráfico 6 - Falha de centelhamento da vela.

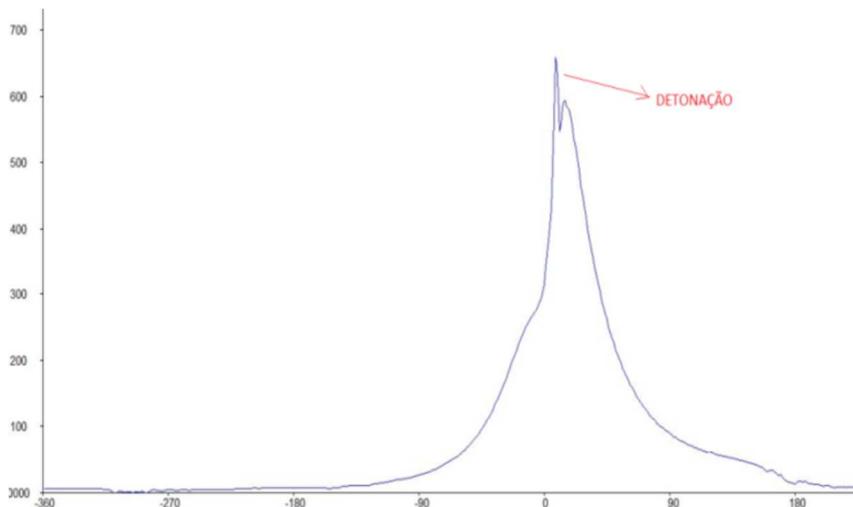


Fonte: O AUTOR, 2016.

O diagrama do Gráfico 8 mostra outro caso e a principal causa de danos aos motores, com maiores consequências para os pistões e para os cabeçotes: a detonação. Houve muitas substituições desses componentes ao longo desses anos devido a trincas e quebras que surgiam até mesmo com pouco tempo de operação dos componentes. A detonação ocorre quando uma carga maior é demandada pelos cilindros fazendo com que eles recebam mais combustível para não perder potência.

Esse aumento na massa de combustível faz com que se formem vários pontos de autoignição no interior do cilindro após a centelha próxima ao ângulo de pressão máxima, gerando ondas de choque e impactos nocivos ao motor (o “tec-tec” que se ouve em motores de automóveis na hora de acelerar), que em escala industrial muitas vezes só são perceptíveis com sensores. Após a intervenção, identificamos danos na válvula de admissão antes do tempo previsto no cilindro 4 do motor SVS 2.

Gráfico 8 - Detonação e suas consequências.



Fonte: O AUTOR, 2016.

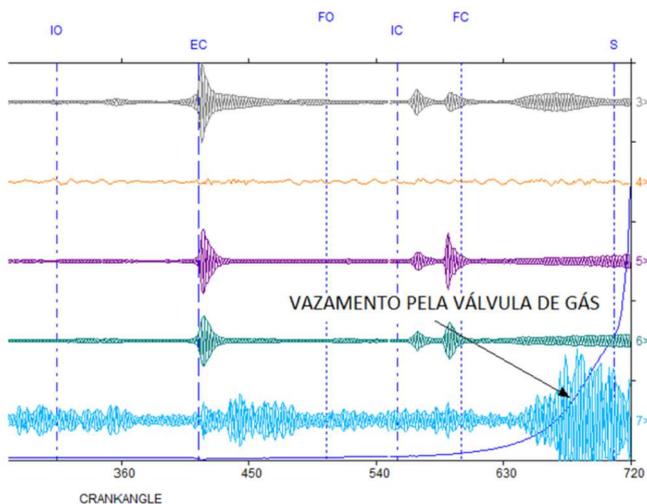
Figura 5 - Trinca..



Fonte: O AUTOR, 2016.

Outro problema responsável pela substituição desnecessária de componentes são os vazamentos de válvulas mostrados no Gráfico 9. Além de controlar o fluxo dos gases e do combustível para o interior dos cilindros, as válvulas devem garantir a vedação do cabeçote de modo que os gases não escapem durante a fase de compressão e queima no cilindro. No gráfico é identificada uma perturbação elevada no ultrassom do cilindro 10 do motor SVS 1 e ao lado a causa desse vazamento. Esses problemas não eram possíveis de serem identificados pelo operador durante a fase de combustão nem pela equipe de manutenção em curto prazo, gerando perda de tempo para identificação do problema e aumentando o custo da manutenção.

Gráfico 9 - Vazamento pela válvula de gás.



Fonte: O AUTOR, 2016.

Figura 6 - Assentamento da válvula de gás com desgaste.



Fonte: O AUTOR, 2016.

5 CONCLUSÃO

A técnica de monitoração da performance dos motores a combustão permite apresentar um diagnóstico preciso dos defeitos e falhas ocultas, não só pela análise individual de cada cilindro, como pela comparação de todos eles. O retorno obtido com essa ferramenta é indiscutivelmente superior aos obtidos com as técnicas tradicionais de manutenção funcionando isoladamente.

Conseguiu-se um planejamento efetivo das intervenções nesses motores, permitindo uma redução no custo de peças de reposição e perdas de produção com paradas melhor programadas.

ABSTRACT

This article aims to disclose a major breakthrough in the activity maintenance of the combustion engines of the Natural Gas Processing Unit (UOSEAL) in Sergipe, with the implementation of the monitoring of these machines systematizing the fault diagnosis and maintenance operations. Initially, it will be introduced to the problems faced by mechanical maintenance team OU-SEAL. Then a brief overview of the operation of combustion engines and the application of monitoring technique as a solution to the elimination of faults will be made. Finally, some results obtained with this technique are illustrated and interpreted, confirming its importance and economic viability in the current scenario of Petrobras.

Keywords: Monitoring. Combustion engine.

REFERÊNCIAS

CICLO OTTO. In: ESCUELA Técnica Superior de la Universidad de Sevilla. Wiki del Departamento de Física Aplicada III. Sevilha, 2015. Disponível em: <http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Otto>. Acesso em: 15 set. 2016.

MITHU. Principles of diesek engine operation. Handcaretips. 2016. Disponível em: <<http://handcaretips.com/technology/principles-dieselengine-operation/>>. Acesso em: 15 set. 2016.

OBERT, Edward F. Motores de combustão interna. Porto Alegre: Editora Globo, 1971.



Thiago Fernandes da Costa Lima
Graduação (2003) em Engenharia Mecânica pela UFPE.
Engenheiro de Equipamentos PL da Petrobras. UO-SEAL/UTPF/MIPFaracaju, SE.
E-mail: enthi@petrobras.com.br



Alisson Bispo Santos
Graduação (2009) em Sistemas de Informação pela FANESE. Técnico de Manutenção PL da Petrobras. UO-SEAL/ENGP/EMI-Aracaju-SE.
E-mail: alissonbs@petrobras.com.br