



PBPC
ISSN 2674-9432



Qualis A3
CAPES 2021-2024



DOI - Crossref

Latindex

Indexado no
Google Acadêmico

UM ESTUDO DE CASO APLICADO EM TURBINAS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÓLEO E GÁS

Bruno Ribeiro Bastos; Murillo de Oliveira Dias



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n2p1007-1026>

Artigo recebido em 19 de Fevereiro e publicado em 19 de Abril de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

O presente artigo analisa um estudo de caso único e descritivo, cuja unidade de análise é a gestão estratégica da confiabilidade e disponibilidade operacional das GTG (*Gas Turbine Generator* - Turbina Geradora de Energia a Gás) integradas a embarcações do tipo FPSO (Floating Production, Storage and Offloading - Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência). O estudo é fundamentado na aplicação de metodologias estruturadas de análise de risco, especificamente ao FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis* - Análise de Modos e Efeitos de Falha) para o mapeamento e a priorização de vulnerabilidades operacionais. De forma complementar, emprega-se a modelagem RAM (*Reliability, Availability and Maintainability* - Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade) para simular o comportamento dos ativos sob condições reais de exploração em ambiente *offshore*. As estratégias propostas enfatizam a manutenção preditiva apoiada por monitoramento remoto em tempo real e diagnósticos avançados, medidas que favoreceram o prolongamento da vida útil dos equipamentos e a redução expressiva dos custos operacionais. Nesse contexto, os resultados obtidos evidenciam um aumento substancial na disponibilidade das GTG, validando, assim, as práticas adotadas como um referencial técnico para a gestão sustentável e inovadora de ativos críticos no âmbito da engenharia *offshore*.

Palavras-chave: Confiabilidade, GTG, Manutenção Preditiva, Disponibilidade Operacional, Engenharia Offshore.



ABSTRACT

This article analyzes a single and descriptive case study, whose unit of analysis is the strategic management of the reliability and operational availability of GTG (*Gas Turbine Generator*) integrated into FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) vessels. The study applies structured risk analysis methodologies, specifically FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), to map and prioritize operational vulnerabilities. In a complementary way, RAM (*Reliability, Availability, and Maintainability*) modeling is used to simulate the behavior of assets under real exploration conditions in an *offshore* environment. The proposed strategies emphasize predictive maintenance supported by real-time remote monitoring and advanced diagnostics, measures that extend equipment's useful life and significantly reduce operating costs. In this context, the results obtained indicate a substantial increase in the availability of GTGs, thereby validating the practices adopted as a technical reference for the sustainable and innovative management of critical assets in *offshore engineering*.

Keywords: Reliability, GTG, Predictive Maintenance, Operational Availability, Offshore Engineering.

Instituição afiliada – Escola Politécnica - Departamento de Engenharia Naval e Oceânica MBA ENGEMAN - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ)

Autor correspondente: *Murillo de Oliveira Dias*

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





1 INTRODUÇÃO

O presente estudo de caso foi desenvolvido a partir da análise de uma Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência (*Floating Production, Storage and Offloading* - FPSO) em operação na Bacia de Santos, com foco no desempenho das Turbina Geradora de Energia a Gás (*Gas Turbine Generator* - GTG). Inicialmente, são descritas as características da empresa e da unidade offshore, contextualizando o ambiente operacional e os requisitos de produção. Em seguida, são aplicadas as metodologias de análise da confiabilidade para avaliação dos riscos e da disponibilidade do ativo, culminando na proposição de estratégias técnicas voltadas ao incremento da confiabilidade e da disponibilidade operacional das GTG.

A empresa analisada está entre as organizações de destaque no setor de energia, com capitalização de mercado estimada em US\$ 1,6 bilhão e atuação internacional em 18 países, o que reforça sua relevância no segmento de petróleo e gás. Além disso, apresenta receita contratual estimada em aproximadamente US\$ 23,1 bilhões, refletindo sua expressiva participação no mercado offshore.

Com especialização na gestão e operação de ativos na indústria de óleo e gás, a organização opera atualmente 9 FPSO em âmbito global, consolidando experiência nas atividades de desenvolvimento e produção. Suas operações são orientadas por valores como confiabilidade, disponibilidade, adaptabilidade e sustentabilidade, os quais guiam suas práticas em diferentes regiões.

Nesse contexto, a empresa concentra-se no ciclo de vida do petróleo e gás, com ênfase nas fases de desenvolvimento e produção, evidenciando compromisso com soluções eficientes, qualidade operacional e padrões de segurança. O FPSO analisado apresenta uma trajetória operacional bem consolidada e uma evolução técnica relevante ao longo dos anos. Seu casco foi originalmente construído em 1989 para atuar como navio petroleiro, destinado ao transporte de petróleo bruto entre países. Em 2013, passou por um processo de conversão para FPSO, ampliando suas capacidades e adequando-o às exigências de operação em ambiente offshore e à produção em águas sob jurisdição brasileira. A unidade está instalada na Bacia de Santos, a aproximadamente 185 km da costa, na região do litoral de Niterói (RJ), e foi projetada



para operar em lâmina d'água de 1.650 m. Do ponto de vista operacional, o FPSO é dimensionado para conduzir uma campanha significativa, com capacidade para operar 08 poços simultaneamente.

Sua capacidade de produção é de 7.949 m³/dia de óleo e 350.000 nm³/dia de gás, além de ter capacidade de armazenamento de até 264.962 m³ de óleo. Para sustentar a continuidade das operações a bordo, a unidade dispõe de duas GTG como fonte principal de geração elétrica. A demanda total de energia elétrica é de 21.701,5 kW, sendo 20.757 kW destinados ao sistema de força principal, 473 kW aos sistemas auxiliares e 471 kW aos sistemas de emergência, assegurando um suporte adequado em situações críticas.

A análise parte da contextualização da empresa e da unidade em estudo, destacando sua trajetória operacional e os requisitos de produção. Em seguida, são aplicadas metodologias de confiabilidade para identificar riscos, avaliar a disponibilidade e propor estratégias técnicas voltadas ao incremento da confiabilidade e da disponibilidade operacional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Estudos de engenharia tornam possível examinar de forma aprofundada as condições atuais das GTG e da planta de processo como um todo em um FPSO. Esse exame envolve a avaliação de componentes, sistemas, subsistemas e práticas operacionais, o que permite reconhecer fragilidades, limitações de desempenho e possíveis mecanismos de falha. Ao mesmo tempo, o entendimento técnico das particularidades construtivas e operacionais das GTG subsidia a formulação de estratégias de operação e manutenção compatíveis com as exigências reais de serviço e com o contexto específico da unidade (ABS, 2023).

A identificação dos componentes mais críticos das GTG permite direcionar esforços e recursos de manutenção para os pontos de maior impacto, o que reduz custos, maximiza a eficiência operacional e contribui para o prolongamento da vida útil dos equipamentos (BRAIDOTTI JR., 2016).

Adicionalmente, a análise de modos de falha fundamentada em estudos de engenharia tende a reduzir riscos operacionais, ao possibilitar a antecipação e a mitigação

de potenciais falhas. Com isso, torna-se viável minimizar paradas não programadas, elevando a disponibilidade das GTG e, por consequência, a disponibilidade global do FPSO. Os estudos RAM constituem ferramentas que permitem compreender o desempenho de sistemas, incluindo as GTG, ao fornecerem informações quantitativas sobre confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (ISO, 2018). A partir desses estudos, torna-se possível identificar fragilidades, reconhecer os principais pontos de falha e estruturar estratégias voltadas ao aprimoramento tanto da confiabilidade quanto da disponibilidade dos equipamentos avaliados.

O objetivo central de um estudo RAM consiste em estimar a vida útil global prevista de um sistema ou equipamento, bem como avaliar a disponibilidade e a eficiência do ativo. Além disso, esses estudos fornecem subsídios para a definição de soluções economicamente viáveis e rentáveis ao longo do ciclo de vida de um projeto de desenvolvimento de ativos, conforme ilustrado na Figura 1.

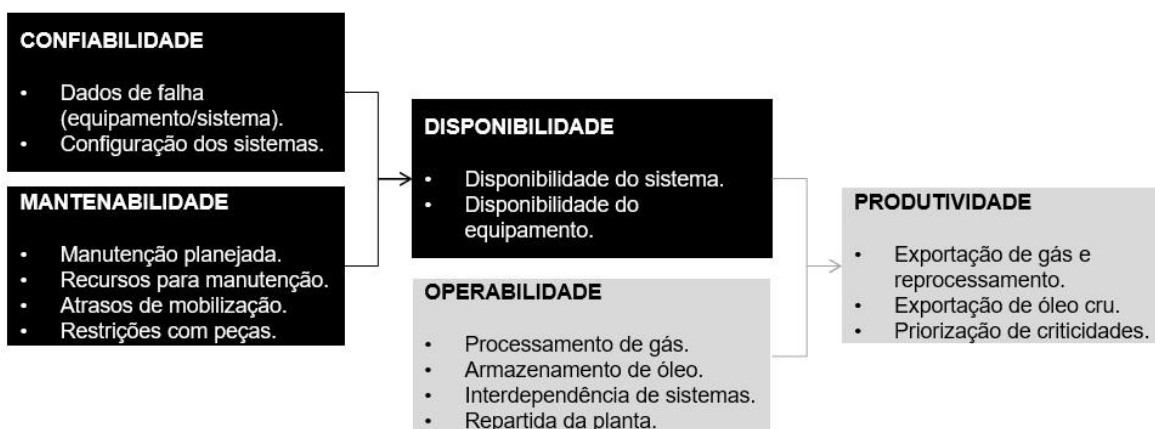


Figura 1 - Objetivos Principais de um Estudo RAM

Fonte: Adaptado do padrão: Garantia da Produção e Gerenciamento da Confiabilidade (ISO, 2018)

A FMEA consiste em uma metodologia sistemática que avalia cada componente de um sistema quanto aos seus modos de falha potenciais, às respectivas causas e aos efeitos dessas falhas sobre o desempenho do sistema como um todo, conforme apresentado na Figura 2.

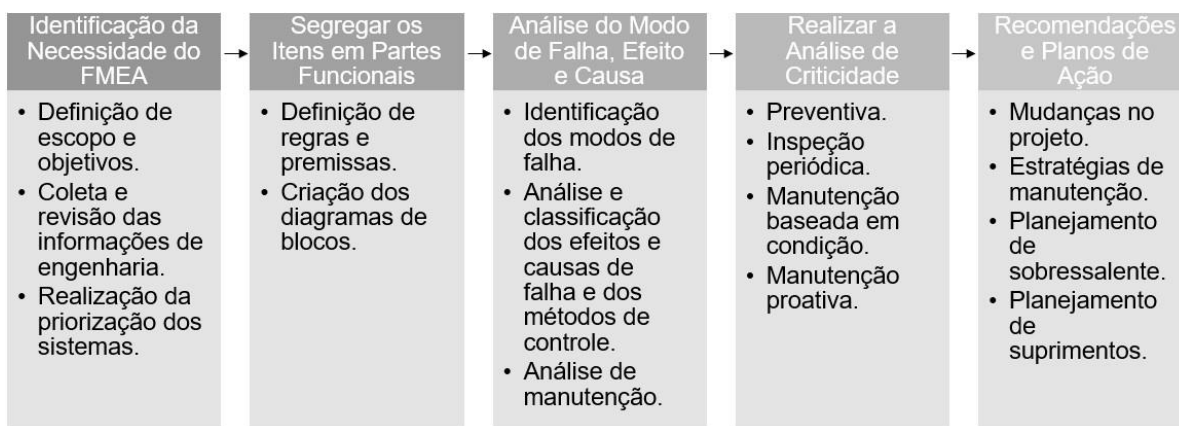


Figura 2 - Fluxograma da análise FMEA

Fonte: Adaptado do livro "Failure Mode and Effect Analysis" (ASQ, 2003)

Ao aplicar o FMEA, é possível que engenheiros consigam antecipar e mitigar potenciais problemas antes de sua ocorrência. A identificação dos modos de falha mais críticos e de seus efeitos associados permite implementar medidas preventivas para reduzir a probabilidade de falhas catastróficas, além de apoiar a priorização das atividades de manutenção e o direcionamento de recursos para as áreas de maior risco.

Tratando-se do aprimoramento da confiabilidade, da disponibilidade e da manutenibilidade das GTG em um FPSO, o desenvolvimento de estratégias de manutenção eficazes é fundamental. Uma estratégia de manutenção adequada deve preservar a confiabilidade e a segurança do ativo, maximizar sua disponibilidade e, simultaneamente, minimizar os custos associados ao longo da operação.

As estratégias de manutenção consistem em um conjunto de planos elaborados para cada tipo de equipamento, contemplando atividades específicas e os recursos necessários para prevenir falhas antes que resultem em indisponibilidades não programadas.

A estratégia a ser aplicada aos ativos deve estar alinhada à sua classificação de criticidade, aos resultados dos estudos RAM e FMEA e às recomendações pertinentes dos fabricantes, de modo a manter a confiabilidade e a integridade do equipamento em níveis adequados de segurança e viabilidade econômica, maximizando, assim, a disponibilidade operacional.

No âmbito das estratégias de manutenção, torna-se essencial compreender as categorias fundamentais que orientam a preservação e a otimização das GTG em um FPSO. Essas categorias estruturam abordagens específicas voltadas a assegurar

confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade em condições operacionais desafiadoras. Sob a ótica da confiabilidade, da disponibilidade e da manutenibilidade das GTG, a manutenção preventiva se destaca como uma estratégia prioritária a ser aplicada no contexto de um FPSO.

Conforme apresentado na Figura 3, essa abordagem se desdobra em manutenção baseada na condição e manutenção predeterminada, cujas subestratégias, quando implementadas de forma integrada, contribuem para o aumento da confiabilidade, da disponibilidade e da manutenibilidade das GTG na unidade *offshore*.



Figura 3 - Categorias de Manutenção

Fonte: Adaptado do padrão: Coleta de Dados de Confiabilidade e Manutenção (ISO, 2016)

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa foi orientada pela pesquisa exploratória qualitativa, usando tanto a pesquisa bibliográfica quanto a pesquisa com base em conhecimentos práticos e acadêmicos disponíveis em livros e artigos técnicos relacionados às GTG. Outrossim, este estudo emprega uma metodologia qualitativa de estudo de caso (Saunders et al., 2009), que permite entender melhor como a operação acontece na prática. A unidade de análise foi definida como um estudo de caso único e descritivo, conforme a abordagem de Yin (2004), permitindo examinar em detalhe os processos de manutenção e gestão de confiabilidade das GTG em um FPSO específico.

Além disso, abordagem estratégica foi fundamentada na aplicação de métodos de análise de risco e confiabilidade, como FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis* - Análise de Modos e Efeitos de Falha), estudo RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*

(Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade) e RCM (*Reliability Centered Maintenance* (Manutenção Centrada na Confiabilidade), visando, assim, transformar dados técnicos em informações acionáveis, o que permite a antecipação de falhas, o aumento da vida útil dos equipamentos, a redução de custos operacionais e os riscos ambientais e de segurança. A coleta de dados usou registros da empresa, opiniões das pessoas que participaram, análises financeiras e técnicas e também contou com observações feitas durante a participação nas atividades. A metodologia combinou duas abordagens complementares: o FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), que permitiu identificar modos de falha, causas e efeitos, classificando-os segundo severidade, ocorrência e detecção; e o RAM (*Reliability, Availability, Maintainability*), que possibilitou a modelagem quantitativa da disponibilidade operacional, utilizando dados de confiabilidade do OREDA (2015) e simulações no software MAROS, com horizonte de 20 anos. Juntar essas metodologias ajudou a montar estratégias de manutenção que colocam a confiabilidade em primeiro lugar, como no caso da RCM. Assim, o estudo ficou com uma base técnica firme e, além disso, serviu bem para usar no dia a dia.

4 RESULTADOS e DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos ao longo de doze meses de análise, a partir da avaliação da implementação das quatro estratégias de manutenção descritas, com foco no aumento da confiabilidade e da disponibilidade operacional das GTG.

Essas estratégias foram estruturadas no início do ciclo de vida operacional da unidade, com o propósito de potencializar os resultados esperados relacionados à extensão da vida útil dos ativos.

Portanto, buscou-se aprimorar o ciclo de vida dos equipamentos por meio da detecção antecipada de riscos de indisponibilidade, da otimização das intervenções de manutenção e da tomada de decisão com fundamentos em dados estatísticos.

4.1 Prolongamento da Vida Útil das GTG

Após a primeira inspeção por boroscopia das GTG, correspondente à manutenção preventiva de Nível 1, verificou-se que não havia componentes em condição degradada, inclusive naqueles em que normalmente são possíveis antecipar o surgimento de

degradação inicial. Com base no histórico de confiabilidade, a deterioração de componentes internos de uma GTG, tanto na seção fria quanto na seção quente, está associada a duas causas principais.

A primeira causa diz respeito à contaminação interna por sais e ao consequente processo corrosivo, efeito que foi reduzido com a adoção da lavagem do sistema de admissão de ar. No período avaliado, essa lavagem ocorreu nos meses 6 e 12, conforme apresentado na Tabela 1. A segunda está associada à lubrificação inadequada dos componentes das GTG, condição que foi minimizada por meio do aprimoramento da gestão de lubrificação e do monitoramento remoto dos principais parâmetros operacionais das máquinas.

Tabela 1 - Síntese das Estratégias de Manutenção Identificadas

	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Monitoramento Remoto e Diagnóstico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gestão da Lubrificação	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gestão do Estoque						X	X	X	X	X	X	X
Lavagem da Admissão de Ar						X						X
Revisão com Boroscopia												X

Fonte: Elaborado pelos autores.

No intervalo avaliado, não foram observados desvios em variáveis como temperatura, pressão, consumo de combustível, carga gerada ou quaisquer outras grandezas capazes de provocar indisponibilidade das GTG. Esse controle foi mantido de forma contínua e diária durante o período analisado. Vale destacar que a gestão de lubrificação também viabilizou a obtenção de dados sobre a qualidade do óleo e o nível de pureza disponibilizado ao sistema de lubrificação fechada da GTG, com base na classificação ISO 4406 (ISO, 2017), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Indicação da Pureza do Óleo Lubrificante

	Mês												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Antes do Tratamento	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18	21/18
Após o Tratamento	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14	17/14
Relatório Laboratorial			18/15			18/15			18/15				18/15

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observou-se que todos os tambores de óleo lubrificante abertos para recompor o nível do sistema de lubrificação fechado das GTG apresentavam grau de limpeza ISO 21/18 (NAS 09), condição altamente nociva aos componentes internos dessas máquinas em razão da elevada concentração de partículas contaminantes. Tal cenário decorre do caráter praticamente inevitável da contaminação dos lubrificantes, uma vez que práticas inadequadas de armazenamento ou transporte, após o acondicionamento em tambores, podem resultar em contaminação não perceptível a olho nu.

Diante desse diagnóstico, o técnico de lubrificação realizou o tratamento do óleo previamente ao abastecimento do tanque de lubrificação das GTG, reduzindo a presença de partículas e umidade no fluido. Com isso, o nível de pureza foi elevado até ISO 17/14 (NAS 05), faixa considerada pelo fabricante como recomendada para contribuir com a extensão da vida útil dos equipamentos.

Como medida de verificação, efetuaram-se análises laboratoriais trimestrais para acompanhar a evolução do grau de limpeza do óleo. Constatou-se uma discreta redução para ISO 18/15 (NAS 06), ainda compatível com os limites aceitos pelo fabricante para a manutenção da confiabilidade operacional.

Por se tratar de equipamento sensível a variações de parâmetros operacionais, o

controle do nível de pureza do lubrificante constitui um ponto crítico nos manuais de operação e manutenção desses fabricantes. Em termos gerais, recomenda-se manter o óleo entre ISO 17/14 (NAS 05) e ISO 18/15 (NAS 06) a fim de assegurar a adequada proteção dos componentes rotativos (BRUN e KURZ, 2019).

Com referência a base de dados de confiabilidade industrial da Noria Corporation (NORIA, 2023), organização reconhecida globalmente na área de lubrificação, e na calculadora de extensão de vida útil disponibilizada por sua subsidiária Machinery Lubrication (MACHINERY LUBRICATION, 2023), verificou-se que a adoção de uma gestão de lubrificação adequada nas GTG elevou a vida útil desses equipamentos em 1,8 vezes, em função da melhoria do nível de pureza do óleo, conforme exibido na Figura 4.

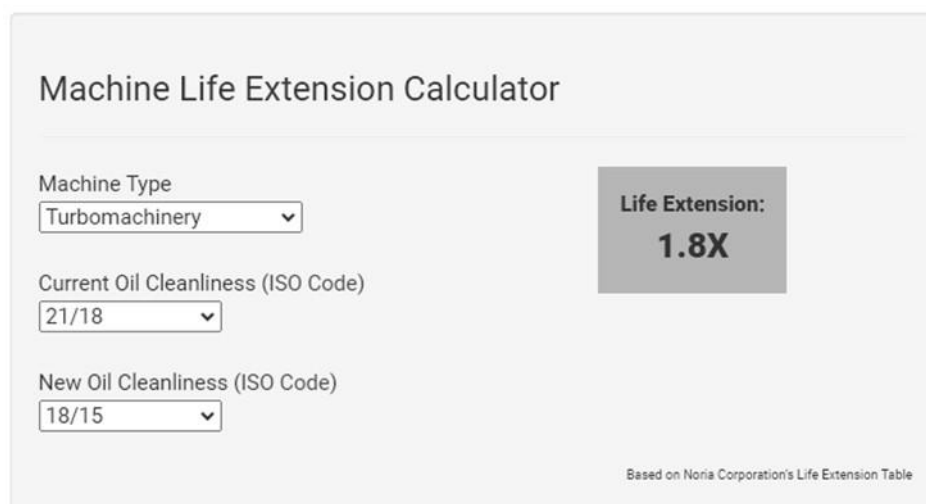


Figura 4 - Demonstração do Cálculo de Extensão da Vida Útil das GTG
Fonte: Machine Life Extension Calculator (MACHINERY LUBRICATION, 2023)

3.2 Otimização da Disponibilidade Operacional

Durante o período analisado, identificou-se também um resultado associado à disponibilidade operacional do sistema de geração de energia elétrica, quando comparado aos demais sistemas críticos do FPSO em estudo, conforme sintetizado na Tabela 3.

Tabela 3 - Total de Eventos de Indisponibilidade Operacional por Sistemas

Sistemas do FPSO	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12



UM ESTUDO DE CASO APLICADO EM TURBINAS GERADORAS
DE ENERGIA ELÉTRICA EM INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÓLEO E GÁS

Bastos et. al.

Sistema de Água Produzida	4	1	0	4	0	1	0	5	3	0	4	2
Sistema de Aquecimento Intermediário	3	0	1	5	5	0	4	5	0	0	4	3
Sistema de Gás Combustível	5	5	5	2	5	3	2	1	5	3	5	1
Sistema de Separação e Estabilização do Petróleo Bruto	2	5	4	5	4	4	4	5	4	4	3	4
Sistema de Geração de Energia Elétrica	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

Foi possível observar que o sistema de geração de energia elétrica, cujo equipamento central são as GTG, destacou-se como aquele com os maiores índices de confiabilidade e disponibilidade, registrando o menor quantitativo de eventos de indisponibilidade entre os sistemas críticos do FPSO em análise. Como consequência, houve incremento da disponibilidade global e o cumprimento da meta de 97%, verificado por meio de uma nova simulação do estudo RAM, apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Taxa de Disponibilidade Anual após Aplicação do RCM

Ano	Disponibilidade Anual (%)	Ano	Disponibilidade Anual (%)
1	97,52	11	97,93
2	97,75	12	98,02
3	98,01	13	98,08
4	97,85	14	98,15
5	98,31	15	98,16
6	97,44	16	98,26
7	97,61	17	98,33



8	97,75	18	98,23
9	97,84	19	98,35
10	97,92	20	98,34

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Resultados Financeiros e de Eficiência

As manutenções preventivas de maior porte, classificadas como nível 2 e nível 3, foram dimensionadas em conjunto com o fabricante das GTG para execução no FPSO em estudo, conforme o consolidado apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Manutenções Preventivas de Nível 2 e 3 (Antes do RCM)

ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nível 2				X								X								X
Nível 3								X								X				

Fonte: Elaborado pelos autores.

Verificou-se que, após a implementação do RCM e a definição das estratégias de manutenção, cuja eficácia foi corroborada pela primeira revisão com boroscopia, correspondente à manutenção de Nível 1 realizada no mês doze (12), tornou-se possível reprogramar as manutenções preventivas de níveis 2 e 3 de acordo com a condição dos componentes internos das GTG, conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 6 - Manutenções Preventivas de Nível 2 e 3 (Depois do RCM)

ANO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nível 2						X												X		
Nível 3												X								

Fonte: Elaborado pelos autores.

Do ponto de vista contratual, as manutenções preventivas de nível 2 e nível 3 apresentam os seguintes valores de execução:



- Nível 2 = US\$ 4,6M
- Nível 3 = US\$ 14,8M

Dessa forma, constatou-se que a gestão da lubrificação, isoladamente, resultou em uma redução de custos das manutenções preventivas das GTG da ordem de US\$ 19,4M, além de contribuir para evitar gastos com manutenção corretiva ao diminuir falhas em componentes e elevar a disponibilidade operacional. De modo geral, os dispêndios com manutenção corretiva podem alcançar valores até 30% superiores aos das manutenções preventivas (BRAIDOTTI JR., 2016).

2 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste trabalho, foram examinados os aspectos dos riscos associados aos processos produtivos das GTG em um FPSO. Tanto o objetivo geral quanto os objetivos específicos foram alcançados a partir de uma abordagem sistemática que combinou estudos de FMEA e RAM, a análise dos dados obtidos através do monitoramento online dos parâmetros de operação das GTG, a avaliação dos contratos da gestão da lubrificação e do fornecimento de peças sobressalentes, além do uso da inspeção por boroscopia, que serviu de fundamentação técnica para o adiamento do calendário de intervenções preventivas.

Inicialmente, a aplicação do estudo FMEA possibilitou analisar os modos de falha das GTG, bem como seus efeitos e causas potenciais. A partir dessa etapa, foi obtida uma classificação de priorização que evidenciou a criticidade desses equipamentos para a continuidade operacional do FPSO. Em seguida, foi conduzida a análise RAM, direcionada aos sistemas essenciais à produção de petróleo, com atenção especial às GTG. Considerando dados de produção, tempos de reparo e de repartida, bem como ocorrências de manutenção planejada e disparos espúrios, o estudo apontou a GTG como o elemento mais crítico no quesito da disponibilidade operacional.

Dessa forma, o estudo evidenciou a importância de analisar os mecanismos de falha e de degradação das GTG, revelando como principais desafios fenômenos como fluência, ambiente de operação, fadiga termomecânica, fadiga de alto ciclo, danos por objeto estranho e falhas de modo misto. Em resposta a esses desafios, foram avaliadas estratégias de manutenção preventiva, com base na condição e no tempo de operação,



as quais se mostraram altamente eficazes ao longo do período analisado.

Nesse contexto, verificou-se que a implementação de um serviço de monitoramento remoto e diagnóstico em tempo real, associada a uma gestão aprimorada da lubrificação, contribuiu para a extensão qualitativa da vida útil das GTG, com melhoras no aumento da segurança operacional, na redução dos custos de manutenção preventiva e na diminuição da indisponibilidade desses equipamentos. Observou-se que tais ganhos foram viabilizados pela transformação dos dados operacionais em informações acionáveis e quantificáveis, gerando um alerta avançado capaz de antecipar falhas potenciais e prevenir interrupções não programadas.

Constatou-se que a gestão eficiente do estoque de peças sobressalentes viabilizou uma resposta ágil a falhas iminentes identificadas pelo serviço de monitoramento remoto e diagnóstico. Além disso, os termos dos contratos estruturados sob a lógica JIT para componentes associados às GTG asseguraram o fornecimento das peças no momento adequado, evitando atrasos nas intervenções de manutenção e elevados custos de estoque.

Observou-se ainda o desenvolvimento de estratégias de manutenção preventiva complementares às recomendações dos fabricantes das GTG, como a lavagem periódica do sistema de admissão de ar. Este procedimento foi particularmente relevante para mitigar falhas associadas às condições agressivas do ambiente offshore, o que frequentemente favorecia a contaminação do ar de admissão por sal e processos corrosivos.

Além disso, verificou-se que uma abordagem proativa na gestão da lubrificação, incluindo análises laboratoriais regulares e a adoção de ações corretivas adequadas, teve papel determinante na prevenção de falhas associadas ao quesito da lubrificação, as quais poderiam comprometer significativamente os componentes internos das seções fria e quente. Após a primeira inspeção por boroscopia, evidenciou-se que as estratégias implementadas estavam gerando resultados importantes, uma vez que não foram identificados componentes degradados, o que indica a efetividade na prevenção de falhas críticas.

Como resultado da integração dessas estratégias, observou-se uma melhoria expressiva na disponibilidade operacional do sistema de geração de energia elétrica. A análise comparativa indicou que, em relação aos demais sistemas críticos do FPSO, as



GTG registraram menor ocorrência de eventos de indisponibilidade, contribuindo para o aumento da disponibilidade global da unidade em foco e para a mitigação dos riscos apontados pelos estudos de FMEA e RAM, no âmbito da metodologia RCM. Dessa forma, a pergunta problema que orientou o estudo foi respondida com base em dados históricos, que evidenciaram de maneira quantitativa o incremento da disponibilidade, o fortalecimento da segurança operacional e a redução de impactos financeiros e operacionais.

Como proposta de trabalhos futuros, recomenda-se a expansão desta metodologia de gestão integrada para outros sistemas críticos, como compressores de gás e bombas de injeção, visando validar a escalabilidade do modelo estudado. Além disso, sugere-se a aplicação de algoritmos de Inteligência Artificial e Machine Learning sobre a base de dados do monitoramento remoto, com o objetivo de desenvolver modelos de manutenção preditiva e alcançar maior capacidade de antecipação de falhas incipientes, refinando ainda mais os índices de disponibilidade global do FPSO.

Em síntese, evidencia-se a importância de as empresas adotarem uma abordagem integrada de confiabilidade e disponibilidade operacional aplicada às GTG em FPSO. As estratégias avaliadas não apenas contribuiram para a extensão da vida útil dos equipamentos, como também foi possível proporcionar economias relevantes e melhoras substanciais na disponibilidade operacional das máquinas.



3 REFERÊNCIAS

ABEPRO. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Portal**

ABEPRO, 2023. Disponível em <https://portal.abepro.org.br/>. Acesso em 21 de setembro de 2023.

ABNT. **Confiabilidade e Manutenibilidade (NBR 5462).** São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.

ABNT. **Indústria de Petróleo e Gás Natural - Coleta e Intercâmbio de Dados de Confiabilidade e Manutenção para Equipamentos (NBR ISO 14224).** 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

ABNT. **Gestão de Ativos (NBR ISO 55001).** São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABS. **Guide For Surveys Based on Machinery Reliability and Maintenance Techniques.**

Houston: American Bureau of Shipping, 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

Gestão de Contratos de E&P, 2023. Disponível em

<https://www.gov.br/anp/ptbr/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/gestao-decontratos-de-e-p>. Acesso em 14 de outubro de 2023.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Regulamento**

Técnico do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional das

Instalações Marítimas de Perfuração e Produção de Petróleo e Gás Natural, 2023. Disponível em https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-egasesseguranca-operacional/arq/regulamento_sgso.pdf. Acesso em 17 de outubro de 2023.

API. **Gas Turbines for the Petroleum, Chemical and Gas Industry Services (API STD 616).** 6. ed.

Washington: American Petroleum Institute, 2022.

ASQ. **Failure Mode and Effect Analysis.** 2. ed. Milwaukee: American Society for Quality, 2003.

BRAIDOTTI JR., J. W. **A Falha Não É Uma Opção.** Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2016.

BRAIDOTTI JR., J. W. **A Governança da Manutenção na Obtenção de Resultados**

Sustentáveis. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2016.



BRAIDOTTI JR., J. W. et al. **Entendendo a Gestão de Ativos (ISO-55001) na Prática**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2020.

BRAIDOTTI JR., J. W.; BRAIDOTTI, F. R. **A Anatomia do PPCM**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2021.

BRUN, K.; KURZ, R. **Introduction to Gas Turbine Theory**. 3. ed. San Diego: Solar Turbines, 2019.

FILHO, G. B. **Indicadores e Índices de Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2006.

FILHO, G. B. **A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2008.

GILKS, W. R.; RICHARDSON, S.; SPIEGELHALTER, D. J. **Markov Chain Monte Carlo in Practice**. 1. ed. New York: Springer, 1996.

HUNTER, I. et al. **Analysis of Hot Section Failures on Gas Turbines in Process Plant**

Service, 1999. CORE - The Open University. Disponível em <https://core.ac.uk/download/pdf/87265352.pdf>. Acesso em 25 de outubro de 2023.

IBP. INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Panorama Geral do Setor de Petróleo e Gás - Uma Agenda para o Futuro, 2023**. Disponível em <https://www.ibp.org.br/publicacoes/panorama-geral-do-setor-de-petroleo-e-gas-uma-agendapara-o-futuro-2023/>. Acesso em 17 de outubro de 2023.

IEC. **Dependability Management - Application Guide - Reliability Centred Maintenance (IEC 60300-3-11)**. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.

IOPG. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS. **Guideline for Managing Marine Risks Associated with FPSO, 2006**. Disponível em <https://www.iogp.org/bookstore/>. Acesso em 17 de outubro de 2023.

ISO. **Asset Management - Management Systems - Requirements (ISO 55001)**. London: International Standards Organization, 2014.

ISO. **Asset Management - Overview, Principles and Terminology (ISO 55000)**. London: International Standards Organization, 2014.

ISO. **Lubricants, Industrial Oils and Related Products (Class L) - Classification - Part 4 - Family H (Hydraulic Systems) (ISO 6743-4)**. London: International Standards Organization, 2015.



ISO. **Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries - Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment (ISO 14224)**. London: International Standards Organization, 2016.

ISO. **Hydraulic Fluid Power - Fluids - Method for Coding the Level of Contamination by Solid Particles (ISO 4406)**. London: International Standards Organization, 2017.

ISO. **Asset Management - Management Systems - Guidelines for the Application of ISO 55001 (ISO 55002)**. London: International Standards Organization, 2018.

ISO. **Lubricants, Industrial Oils and Related Products (Class L) - Classification - Part 6 - Family C (Gear Systems) (ISO 6743)**. [S.l.]: International Standards Organization, 2018.

ISO. **Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries - Production Assurance and Reliability Management (ISO 20815)**. 2. ed. London: International Standards Organization, 2018.

ISO. **Risk Management - A Practical Guide (ISO 31000)**. 1. ed. London: International Standards Organization, 2018.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

MACHINERY LUBRICATION. **Machine Life Extension Calculator, 2023**. Disponível em <https://www.machinerylubrication.com/Read/95/machine-life-extension>. Acesso em 25 de outubro de 2023.

MARINHA DO BRASIL. DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. **Normas da Autoridade Marítima, 2023**. Disponível em <https://www.marinha.mil.br/dpc/normas>. Acesso em 22 de agosto de 2023.

MATHER, A. **FPSO Handbook**. Livingston: Witherby Seamanship International, 2009. MOUBRAY, J. **Reliability Centred Maintenance**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

NORIA. NORIA CORPORATION. **Noria Corporation Database, 2023**. Disponível em <https://www.noria.com/>. Acesso em 25 de outubro de 2023.

OHNO, T.; BODEK, N. **Toyota Production System - Beyond Large-Scale Production**. 1. ed. New York: Productivity Press, 1988.



OREDA. **Offshore Reliability Data Handbook**. 6. ed. Trondheim: Offshore Reliability Data, 2015.

PALMER, R. D. **Maintenance Planning and Scheduling Handbook**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 2005.

PMI. **Project Management Body of Knowledge (PMBOK)**. 7. ed. Newton Square: Project Management Institute, 2021.

SAUNDERS, M.; LEWIS, P.; THORNHILL, A. **Research Methods for Business Students**. 5. ed. Harlow: Prentice Hall, 2009.

SMITH, D. J. **Reliability, Maintainability and Risk**. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

YIN, R. K. **The case study anthology**. Thousand Oaks: Sage, 2004.