



A Importância do Intervalo P-F na Manutenção dos Circuitos de Refrigeração do Reator IEA-RI

Alexandre Rubio de Oliveira¹; Thadeu das Neves Conti¹

✉ alexandre.rubio@alumni.usp.br

1. *IPEN/USP Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil.*

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 23 de agosto de 2022

Aceito em: 06 de março de 2023

Publicado em: 30 de abril de 2023

Resumo: As máquinas e equipamentos industriais não foram construídos para durar para sempre, mas eles podem durar muito mais do que as recomendações dos fabricantes realizadas nas manutenções preventivas. Falhas de ativos não são eventos, mas sim processos de degradação. Por meio da curva P-F, busca-se representar a condição de um equipamento ou componente ao longo do tempo, o que possibilita identificar estes processos e agir proativamente para evitar a falha. A curva P-F é uma representação gráfica na análise de confiabilidade dos ativos monitorados, com base nos conceitos do RCM (Manutenção Centrada na Confiabilidade ou, do inglês, "Reliability Centered Maintenance"). Neste trabalho serão apresentadas as condições atuais de monitoramento e as técnicas recomendadas para o monitoramento das condições de trabalhos dos conjuntos motobomba responsáveis pela refrigeração do circuito primário e secundário do Reator IEA-RI.

Palavras-chave: Manutenção Centrada na Confiabilidade, Monitoramento de condição, Análise de Falhas, Intervalo P-F.

The Importance of the P-F Interval in the Maintenance of the IEA-RI Reactor Cooling Circuits

Abstract: Industrial machinery and equipment are not built to last forever, but they can last much longer than manufacturers' recommendations for preventive maintenance. Asset failures are not events, but degradation processes. Through the P-F curve, we seek to represent the condition of an equipment or component over time, which makes it possible to identify these processes and act proactively to avoid failure. The P-F curve is a graphical representation in the reliability analysis of monitored assets, based on the concepts of RCM (Reliability Centered Maintenance). This work will present the current monitoring conditions and the recommended techniques for monitoring the working conditions of the pump sets responsible for cooling the reactor's primary and secondary circuit.

Keywords: Reliability Centered Maintenance, Condition Monitoring, Fault Analysis, P-F interval.

La Importancia del Intervalo P-F en el Mantenimiento de los Circuitos de Refrigeración del Reactor IEA-RI

Resumen: La maquinaria y los equipos industriales no están contruidos para durar para siempre, pero pueden durar mucho más que las recomendaciones de los fabricantes para el mantenimiento preventivo. Las fallas de activos no son eventos, sino procesos de degradación. A través de la curva P-F buscamos representar el estado de un equipo o componente a lo largo del tiempo, lo que permite identificar estos procesos y actuar proactivamente para evitar fallas. La curva P-F es una representación gráfica en el análisis de confiabilidad de los activos monitoreados, basada en los conceptos de RCM (Reliability Centered Maintenance). Este trabajo presentará las condiciones de monitoreo actuales y las técnicas recomendadas para monitorear las condiciones de trabajo de los grupos de bombas encargados de enfriar el circuito primario y secundario del reactor.

Palabras clave: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Monitoreo de Condición, Análisis de Fallas, Intervalo P-F.

INTRODUÇÃO

Reator IEA-RI

O IEA-RI é um reator de pesquisa tipo piscina, moderado e refrigerado a água leve e que utiliza elementos de berílio e de grafite como refletores, que se encontra no Centro de Pesquisas do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) na USP em São Paulo. Projetado para operar a uma potência máxima de 5 MW, atualmente, é utilizado para as diversas finalidades, como produção de radioisótopos para uso em medicina nuclear, de fontes radioativas para gamagrafia industrial e de radioisótopos, pesquisas em Física Nuclear, serviços de neutrongrafia e treinamento de pessoal licenciado para operação de reatores. Portanto, sua manutenção e operação dentro dos melhores parâmetros de rendimento e produtividade é de destacada importância para execução destas atividades (IPEN, 2022).

Muitos modos de falhas não estão relacionados com a idade do equipamento e quando estão próximos de ocorrer apresentam algum tipo de alarme onde é possível tomar algumas decisões que podem prevenir e ou evitar consequências indesejáveis. Para identificar os alarmes que ocorrem durante os modos de falhas é necessário o monitoramento da máquina e ou equipamento aplicando as técnicas de manutenção conhecidas como monitoramento de condição.

As técnicas de monitoramento de condição são responsáveis em detectar os efeitos de falhas identificando mudanças nas características de vibração, temperatura, partículas no óleo lubrificante, vazamento e são classificadas como efeitos dinâmicos, efeitos das partículas, efeitos químicos, efeitos físicos, efeitos de temperatura e efeitos elétricos. Estas técnicas são

sensíveis e conseguem alertar sobre as falhas em apenas alguns dias, meses ou em muitos anos.

O Intervalo P-F (Potential Failure) é uma ferramenta analítica que representa a vida útil do equipamento. Com isso você consegue identificar os pontos de falhas do seu equipamento ajustando o seu plano de manutenção preventiva, preditiva, lubrificação e inspeção para sanar estas falhas agindo antes que aconteçam.

Através dos resultados obtidos no monitoramento de condição é possível analisar o intervalo P-F identificando o momento certo de intervenção do equipamento, realizando uma preventiva com maior precisão e não simplesmente substituindo peças conforme recomendações do fabricante independente da condição da máquina/equipamento.

Intervalo P-F

De acordo com Apelgren/Reliable Plant (2021) o intervalo de falha potencial para falha funcional (intervalo P-F) é um dos conceitos mais importantes quando se trata de realizar a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM). Notavelmente, o intervalo P-F também é um dos conceitos RCM mais mal compreendidos. A análise do modo de falha se torna ainda mais complicada quando você está lidando com vários intervalos P-F para um modo de falha.

Segundo Teles (2018), a falha potencial é uma falha em estágio inicial, ela não compromete por completo o funcionamento do equipamento, mas diminui seu rendimento conforme o tempo de utilização. Segue abaixo algumas falhas potenciais comuns em bombas centrífugas:

1. Elevação dos níveis de temperatura;
2. Aumento dos níveis de vibrações;
3. Queda de pressão e vazão;
4. Aumento dos níveis de ruídos.

A falha funcional é uma falha com perda de função onde o sistema não consegue entregar a capacidade ou desempenho esperado conforme o projetado ou especificado. Segue abaixo algumas falhas funcionais:

1. Motor elétrico desarmando por sobrecarga;
2. Quebra de rolamentos;

3. Vazamento;
4. Queima do motor elétrico.

De acordo com MOUBRAY (2000), o intervalo P-F, e não a curva P-F, ou o período de tempo compreendido entre a falha potencial e a funcional, este sim deve ser corretamente interpretado e estimado. Se a periodicidade de monitoramento for muito pequena, o custo será muito alto, se for muito grande, a eficácia do monitoramento será perdida. Por isso é importante identificar as técnicas de manutenção corretas nas frequências corretas, daí a importância do intervalo. A letra P indica o ponto onde podemos descobrir que a máquina ou equipamento está falhando (Falha Potencial) e a letra F o ponto onde a máquina ou equipamento falhou (Falha Funcional), como pode ser visto na (figura 1).

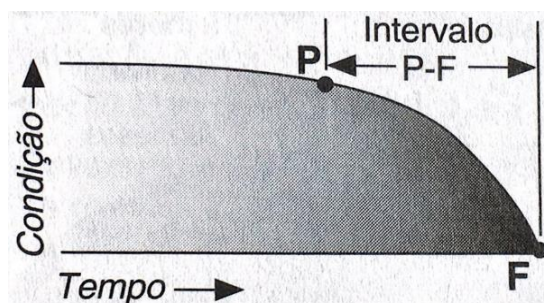


Figura 1. Intervalo P-F.
Fonte: MOUBRAY, 2000.

O intervalo P-F nos mostra frequentemente como devem ser as tarefas perante a condição de trabalho. Se desejamos detectar a falha potencial antes que se torne uma falha funcional, o intervalo entre as verificações deve ser menor que o intervalo P-F (MOUBRAY,2000).

Para MARINELLI (2022) a tecnologia utilizada no monitoramento do intervalo P-F é uma estratégia inteligente com maior assertividade e confiabilidade na manutenção dos seus equipamentos e com isso a equipe de manutenção pode evitar as quebras repentinas gerando custos elevados.

De acordo com TOSMANN (2022) as falhas identificadas entre os pontos P e F da curva, podem ser corrigidas evitando uma falha funcional e o uso de softwares, sensores e inteligência artificial realizando a coleta de dados das máquinas, terá uma visão completa dos processos industriais.

Tipos de manutenção

Basicamente temos 3 tipos de manutenção, a primeira é a *corretiva* onde o reparo é realizado após a quebra de uma máquina ou equipamento, a segunda temos a *preventiva* com periodicidade das manutenções indicando o que deve ser trocado independente da condição das peças e a terceira a *preditiva* utilizada nas máquinas e equipamentos que são vitais para o processo da empresa, ou seja, possui um monitoramento constante das condições operacionais tendo como resultado o momento certo de troca dos componentes antes que ocorra a falha (OLIVEIRA, 2018).

Técnicas de monitoramento de condições

A maioria das falhas apresentam sinais quando estão próximas de ocorrer. Esses sinais são chamados de falhas potenciais onde possui uma condição física que pode ser detectável com técnicas que inspecionam a condição da máquina utilizando padrões de desempenho. Caso não for detectável acontecerá a falha funcional onde impede o seu o seu funcionamento. Desde o início da humanidade os sentidos humanos (visão, audição, tato e cheiro) são utilizados para detectar condições de falhas potenciais, porém não apresentam uma confiabilidade e consequentemente diminui o intervalo da falha potencial até a falha funcional, ou seja, o intervalo P-F. Quanto mais cedo for detectado uma falha potencial maior será o seu intervalo P-F (MOUBRAY,2000).

As técnicas utilizadas para o monitoramento da condição são classificadas conforme os efeitos gerados pelas falhas potenciais. Abaixo temos os efeitos gerados das técnicas recomendadas para conjuntos motobombas em locais de acesso restrito:

- Efeitos dinâmicos: encontrados com maior frequência nos equipamentos rotativos, causam anormalidades na vibração e ruído. A técnica indicada para detecção desta falha potencial é a *análise de vibração*.
- Efeitos de partículas: falhas potenciais causadas por partículas de diferentes tamanhos e formas presentes nos óleos lubrificantes oriundas de fontes externas (falta de isolamento, filtragem etc.) ou internas (falta de lubrificação, desgaste dos elementos de máquinas etc.). A técnica indicada para detecção desta falha potencial é a *ferrografia*.
- Efeitos químicos: falhas potenciais que indicam a quantidade de elementos químicos presentes nos fluidos proveniente do desgaste de metais medidos em óleos

lubrificantes (Antimônio, Cromo, Ferro, Magnésio, Níquel etc.). A técnica indicada para detecção desta falha potencial é a *espectroscopia de emissão atômica*.

- Efeitos físicos: falhas potenciais que englobam as mudanças na aparência física do equipamento e comportamento do óleo. As técnicas indicadas para detecção destas falhas potenciais são a *termografia e o monitoramento da viscosidade*.
- Efeitos de temperatura: falhas potenciais que indicam o aumento de temperatura nos mancais de rolamentos. As técnicas indicadas para detecção destas falhas potenciais são a *termografia e o monitoramento com sensor para mancais*.
- Efeitos elétricos: falhas potenciais que indicam mudanças na corrente elétrica e no potencial dielétrico em águas dos trocadores de calor de usinas nucleares. As técnicas indicadas para detecção destas falhas potenciais são o *controle de corrente elétrica e a resistência de polarização linear*.

O objetivo deste artigo é recomendar as técnicas de manutenção preditiva mais adequadas para o monitoramento do circuito primário de refrigeração do Reator IEA-RI, permitindo estimar com maior precisão o momento certo de realizar uma intervenção, com menos frequência de acesso ao conjunto motobomba, diminuindo o custo de manutenção corretiva, preventiva, segurança com a redução do número de acesso realizados durante as intervenções de manutenção e tempo de reparo.

MATERIAL E MÉTODOS

Reator IEA-RI

O IEA-RI é um reator de pesquisa tipo piscina, moderado e refrigerado a água leve e que utiliza elementos de berílio e de grafite como refletores, que se encontra no Centro de Pesquisas do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) na USP em São Paulo. Projetado para operar a uma potência máxima de 5 MW, atualmente, é utilizado para as diversas finalidades, como produção de radioisótopos para uso em medicina nuclear, de fontes radioativas para gamagrafia industrial e de radioisótopos, pesquisas em Física Nuclear, serviços de neutrongrafia e treinamento de pessoal licenciado para operação de reatores. Portanto, sua manutenção e operação dentro dos melhores parâmetros de rendimento e produtividade é de destacada importância para execução destas atividades (IPEN, 2022).

Monitoramento do circuito primário com análise de vibrações

Os conjuntos motobomba do Reator IEA-RI são monitorados através de seis sensores de vibrações fixados nos pontos vitais com as identificações de A1 a A6 (figura 2) (RUBIO, 2020).

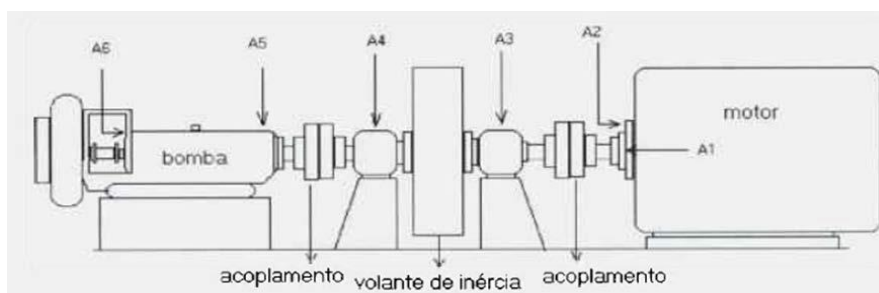


Figura 2. Identificação dos sensores.

Fonte: RUBIO, 2020.

Os sensores de vibração são interligados até a sala de controle. Através de um painel ficam disponíveis os conectores, onde um coletor de dados de ação externa pode ser conectado para capturar os sinais de vibração Figura 03. Na tela do próprio coletor de dados realiza-se uma análise conhecida com offline (figura 3) (RUBIO, 2020).



Figura 3. Painel com conectores para medição.

Fonte: RUBIO, 2020.

Para realizar uma análise mais criteriosa é utilizado o monitoramento online em software específico que são instalados em diversos computadores que ficam ligados gravando os eventos durante o regime de operação do Reator IEA-RI, porém esta ação depende do técnico fazer o acompanhamento. Atualmente, o controle de vibração é realizado através dos dados gerados pelo sistema COMPASS Monitoring System da Bruel&Kjaer Vibro, que pode ser acessado na sala de controle ou nas salas dos técnicos responsáveis pela manutenção (figura 4) (RUBIO, 2020).

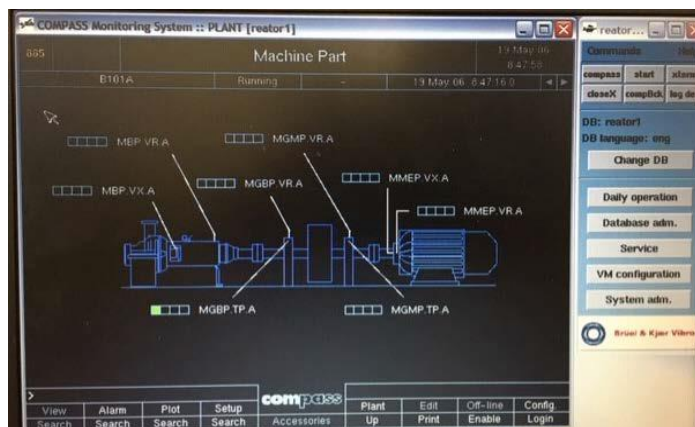


Figura 4. Sistema COMPASS.

Fonte: RUBIO, 2020.

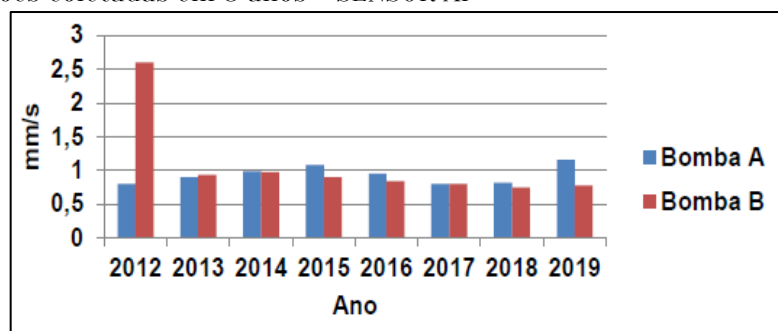
A coleta dos dados de vibrações do sistema é registrada no relatório de inspeção mensal (formulário FM-CRO-1003-21 V2), onde apresentam os valores de nível global. Esta é uma ação apenas preventiva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

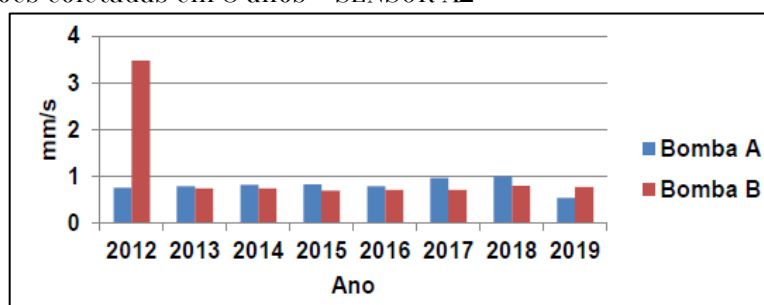
Indicadores de vibrações dos mancais do conjunto motobomba

Todos os dados de vibração dos seis sensores identificados de A1 a A6 coletados em 8 anos foram tabulados e plotados em gráficos representando a tendência do funcionamento de cada ponto monitorado. Com estes indicadores foi possível identificar os pontos mais críticos do sistema e as tendências de falhas para futuras tomadas de decisões de intervenções das bombas A e B.

Como exemplo, de acordo com os gráficos em 2012 foi identificado um comportamento irregular da bomba B conhecido como falha potencial nos sensores A1 e A2 com um aumento severo de mais de 50% dos níveis de vibração em relação a Bomba A no ano de 2012 (gráficos 1 e 2).

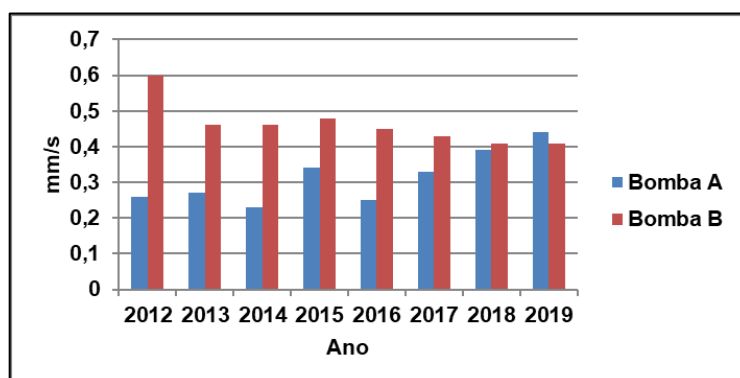
Gráfico 1. Vibrações coletadas em 8 anos – SENSOR A1

Fonte: RUBIO, 2020.

Gráfico 2. Vibrações coletadas em 8 anos – SENSOR A2

Fonte: RUBIO, 2020.

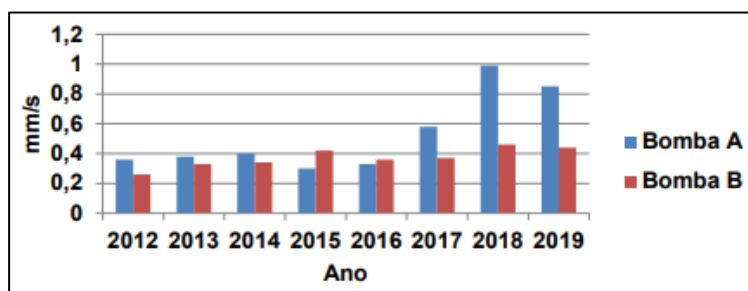
No sensor A3 da bomba B existe um problema característico de uma falha mecânica, falha potencial que ao longo dos anos foi diminuindo por causa da acomodação (gráfico 3).

Gráfico 3. Falha mecânica – SENSOR A3

Fonte: RUBIO, 2020.

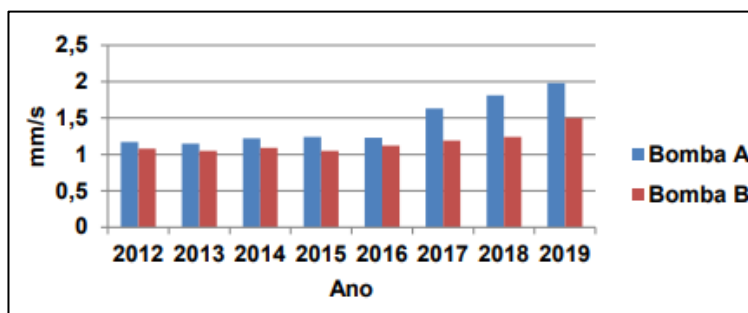
Nos sensores A4 e A5 da bomba A foi identificado um aumento de vibração que ao longo do tempo está indicando uma evolução da falha potencial (gráficos 4 e 5)

Gráfico 4. Evolução da falha potencial – SENSOR A4



Fonte: RUBIO, 2020.

Gráfico 5. Evolução da falha potencial – SENSOR A5



Fonte: RUBIO, 2020.

CONCLUSÃO

O conjunto motobomba do Reator IEA-RI possui apenas um tipo de monitoramento correspondente a curva P-F que é a análise de vibração. Não existe nenhum tipo de tratamento com os dados coletados, pois são apenas registrados em relatórios mensais. Os resultados obtidos nas coletas de dados apresentam irregularidades conhecidas como falhas potenciais e que podem ser utilizadas para programar o momento certo de manutenção ou realizar uma melhoria de projeto naquele ponto específico. Mesmo não realizando o tratamento destes dados, o uso desta técnica trouxe benefícios para realizar as manutenções preventivas e estudos realizados no Reator IEA-RI.

Para aumentarmos a confiabilidade do sistema reduzindo o número de intervenções de manutenções e garantir que o intervalo P-F tenha o melhor rendimento, recomenda-se o uso das técnicas de monitoramento de condições indicadas neste artigo.

Atualmente o conjunto motobomba possui apenas uma das técnicas indicadas e por ser uma área de acesso restrito merece outras técnicas de monitoramento para garantir a confiabilidade do sistema, aumentar a precisão na tomada de decisão das manutenções e atualizações das máquinas e equipamentos.

Estas técnicas também beneficiam estudos para análises do comportamento e vida útil dos elementos de máquinas, facilitando a aquisição de novos modelos de acordo com a aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APELGREN, Robert. Use P-F Intervals to Map, Avert Failures. RELIABLEPLANT, 2021. Disponível em: <https://www.reliableplant.com/Read/11875/p-f-intervals-map-failures>. Acesso em: 15 julho de 2021.

IPEN. REATOR IEA-RI – Utilização do Reator. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=729. Acesso em: 01 de fevereiro de 2022.

MARINELLI, Igor. Entenda o que é a curva PF. Revista Manutenção, 2022. Disponível em: <https://www.revistamanutencao.com.br/literatura/tecnica/manutencao/entenda-o-que-e-a-curva-pf.html>. Acesso em: 08 setembro de 2022.

MOUBRAY, John. RCM II Manutenção Centrada em Confiabilidade. 2Ed. Lutterworth, Inglaterra: Aladon Ltd, 2000.

OLIVEIRA, Alexandre Rubio De; PETROLI, Elton; HAYASHI, Richard Gomes; Tecnologia aplicada à manutenção mecânica industrial: Fundamentos e Técnicas. 1. ed. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2018. p. 129-131.

RUBIO DE OLIVEIRA, A. Análise dos dados de manutenção corretiva e preditiva do conjunto motobomba no circuito primário de refrigeração do Reator IEA-RI. 2020. 110 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

TELES, Jhonata. Curva PF: O que é e como usar. ENGETELES, 2018. Disponível em: <https://engeteles.com.br/curva-pf/>. Acesso em: 02 fevereiro de 2021.

TOSMANN, João Marcio. Entenda o que é Curva PF e como contribui para a manutenção industrial. CIMM, 2022. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/artigos/22389-entenda-curva-pf-contribui-manutencao-industrial>. Acesso em: 09 setembro de 2022.