Unisanta Science and Technology, **2019, 3, December**
Published Online 2019 Vol.8 N°2 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Plano para Melhorar a Confiabilidade de uma Unidade de Ácido Nítrico

André Luís Claussen Estevez Gandarillas[1,2], Alexander Gonçalves da Silva[1,3], Matheus Ferreira Melo[1,4], Tiago Machado Salvador[1,5]

UNISANTA[1] - Universidade Santa Cecília - Pós-Graduação *latu sensu* em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

COPEBRAS[2] - Companhia Petroquímica Brasileira
Rod. Cônego Domênico Rangoni, 264,2. 11573-904, Cubatão, São Paulo, Brasil.

ASS[3] - Alex Soluções e Serviços
Rua Espírito Santo, 203 - Parque Estuário. 11470-240, Guarujá, São Paulo, Brasil.

ENGEBASA[4] - Mecânica e Usinagem LTDA
Rua União, 291 - Vila Parisi. 11570-120, Cubatão, São Paulo, Brasil.

VLI-TIPLAM[5] - Terminal Integrador Portuário Luiz Antônio Mesquita
Rod. SP 55, km 65,8 - Zona Rural. 11520-971, Santos, São Paulo, Brasil.

E-mail*:* alcgandarillas@hotmail.com
Received November, 2019

Resumo: A Análise Weibull de Produção permite analisar perdas por paradas corretivas em equipamentos e identificar perdas em eficiência operacional. De posse deste conhecimento, empregou-se conjuntamente a metodologia de árvore lógica para detectar perdas processuais e orientar a implementação de ações de melhoria em trocadores de calor, que operam em paralelo de uma empresa da baixada santista. Assim sendo, a utilização destes ativos passou a ser feita pelo conceito de função da manutenção centrada na confiabilidade (RCM), de modo a atender a sua função definida, ao invés da condição do equipamento propriamente dito. O controle da eficácia do efeito das ações implantadas foi feito através de dois tipos de indicadores de perda: por paradas corretivas e por eficiência. Como resultado, a troca do equipamento passou a ser feita no tempo ótimo, permitindo reduzir tanto as perdas de produção, como a redução do custo de manutenção. Com a implantação deste trabalho houve um incremento de produção de 15.000 t diretamente associadas às perdas evitadas, equivalendo a um aumento de produção anual de 25 dias.

Palavras chave: Análise Weibull de Produção, RCM, árvore lógica.

Plan to Improve the Realibility of an Unit of Nitric Acid

Abstract: Weibull Analysis of Production Data allows to determine losses from corrective equipment stoppages and identify losses in operating efficiency. With this knowledge, the logical tree methodology was jointly used to detect process losses and guide the implementation of improvement actions in parallel-operated heat exchangers at a company in *Baixada Santista*. Therefore, the use of these assets is now made by the concept of reliability-centered maintenance (RCM) function, in order to meet its defined function, rather than the condition of the equipment itself. The effectiveness of the effect of the actions implemented was controlled through two types of loss indicators: corrective stops and efficiency. As a result, the equipment was changed at the optimum time, reducing both production losses and reducing maintenance costs. With the implementation of this work there was a production increase of 15,000 t directly associated with the avoided losses, equivalent to an annual production increase of 25 days.

Keywords: Weibull Analysis of Production Data, RCM, logical tree.

Copyright © 2019 ISESC.

1. Introdução

Conforme Roberts e Barringer (2012), a análise Weibull de produção permite avaliar a confiabilidade do processo em que equipamentos e locais de instalação estejam envolvidos. Em vez de analisar os dados de falha, uma análise de produção analisa os dados de saída da produção para identificar padrões na saída e determinar a confiabilidade do processo como um todo. Ela permite também quantificar as perdas de produção que tanto podem ser por confiabilidade (paradas corretivas), como por eficiência/má utilização.

Os principais parâmetros envolvidos da Equação de Weibull (1) são (ABERNETHY, 2004):

$$P(x) = e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

- **β** – Fator de forma – avalia a variabilidade do processo, conforme exemplificado na Tabela 1, na qual são mostrados valores de beta e sua correspondência com a qualidade do processo de produção.
- **η** – Característica de saída do processo – valor que determina a capacidade máxima demonstrada da unidade.
- **γ** – Parâmetro de posição – valor do parâmetro produtivo x, associado ao início do processo de falha ou perda de rendimento.

A função de Weibull, P(x), pode ser empregada para determinar a confiabilidade de um processo, C(x), simplesmente subtraindo-se da unidade o seu valor:

$$C(x) = 1 - P(x) \quad (2)$$

De modo que, em um gráfico entre os valores de confiabilidade do processo, versus o parâmetro de acompanhamento, x, têm-se as seguintes características:

Linha de confiabilidade do processo - determinada a partir do ponto onde os pontos plotados se afastam da linha demonstrada. Paralela ao eixo horizontal. Quanto maior a confiabilidade do processo, melhor.

Linha de produção (Linha demonstrada) - a linha demonstrada representa a saída típica que uma unidade produz baseada em dados históricos.

Capacidade nominal (Linha anunciada) - tal linha representa a sua produção máxima de saída (maior capacidade de produção que a unidade pode atingir em condições ideais de funcionamento).

Adotar estratégias para solucionar problemas e aumentar a disponibilidade das unidades de produção é parte da rotina da manutenção. Na indústria, a utilização da análise de falhas, conduz a redução das quebras e defeitos nos equipamentos.

Para Latino et al. (2019), as causas raízes são classificadas em três categorias: causas físicas, causas humanas e causas latentes. De acordo com ele, as causas físicas são as tangíveis que podem ser vistas, e são muitas vezes o ponto de interrupção para muitas organizações que afirmam fazer análise de causa raiz. As causas humanas são aquelas que envolvem erros humanos de comissionamento ou omissão. Caso a análise de causa raiz (ACR) seja interrompida neste nível, resultará em uma avaliação considerada como caça às "bruxas", ou seja, achar um culpado para o problema detectado. A fim de evitar a repetição desses erros, é importante chegar nas causas latentes, as quais estão relacionadas com os sistemas organizacionais, procedimentos, políticas, etc. que levaram os funcionários a tomar uma decisão incorreta. O autor sustenta que as verdadeiras causas raízes de qualquer erro ou falha são as causas latentes.

Tabela 1. Avaliação da qualidade de um processo de produção pelos valores obtidos do fator de forma (β) da equação (1) devido à Weibull (BARRINGER, 2012).

Beta	Variação na Quantidade Produzida	Qualidade do Processo de Produção
5	Variação grande	Muito pobre
10	Variação moderada	Pobre
25	Alguma variação	Boa
50	Variação minima	Muito boa
100	Variação menor	Excelente
200	Quase nenhuma variação	excepcional

Existe uma variedade de ferramentas de análise de falhas e solução de problemas, algumas delas são: Cinco Porquês, Diagrama de Ishikawa e Árvore Lógica.

Segundo Latino et al. (2019) a Árvore Lógica, trata-se de um processo para identificar as causas físicas, humanas e latentes de um defeito. Primeiro declara-se o problema com a descrição do erro. Com o mapeamento dessas falhas, desenha-se uma árvore lógica de acordo com os acontecimentos correlatos às mesmas. Na Figura 1 é apresentado um exemplo de árvore lógica.

A verdade é que cada ferramenta tem seu funcionamento melhor em uma determinada condição. Portanto, o profissional responsável por essa análise deve

Copyright © 2019 ISESC

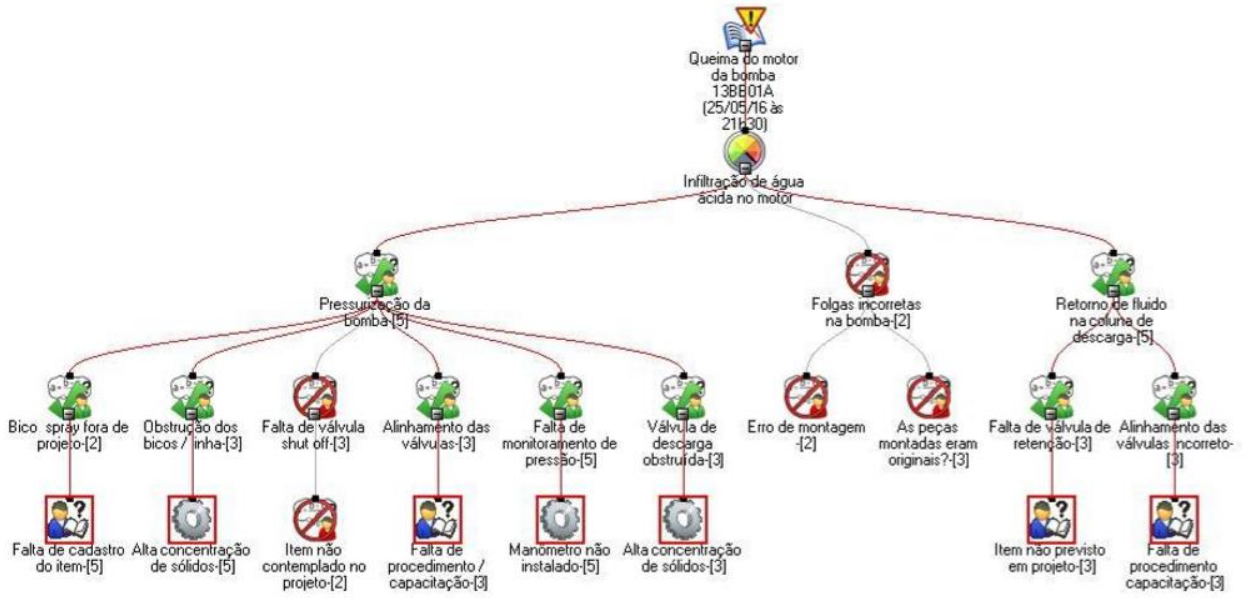


Figura 1. Exemplo de árvore lógica, retirado diretamente do sistema da empresa (MERIDIUM, 2017).

saber como selecionar essas ferramentas e como combiná-las para chegar a uma conclusão tecnicamente satisfatória e, assim, tomar uma decisão.

Para Lafraia (2009), o propósito da manutenção segundo a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é garantir que um sistema ou equipamento mantenha a sua função esperada. Com isso, o enfoque é sempre assegurar que um equipamento ou sistema, desempenhe a sua função desejada e não de tentar resolver e prevenir todas as falhas possíveis, pois isso é tecnicamente impossível e financeiramente inviável.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo determinar as causas raízes da produção abaixo do orçado da unidade de ácido nítrico e contribuir para solucionar este baixo desempenho de forma sustentada.

2. Materiais e Métodos

Este estudo foi realizado em uma planta industrial produtora de fertilizantes, localizada em Cubatão, SP. A unidade de ácido nítrico (HNO_3) é responsável pela produção desse ácido, empregado na produção de nitrato de amônio (NH_4NO_3) ou é comercializada diretamente ao mercado, conforme ilustrado pela Figura 2.

Tal unidade constitui, atualmente, o gargalo de sua planta industrial de modo que seu desempenho impacta sensivelmente os resultados operacionais da empresa. Desde final de 2012, observou-se que a produção anual da unidade vinha apresentando resultados insatisfatórios, por este motivo fez-se necessário realizar um estudo para aumentar a confiabilidade desta unidade.

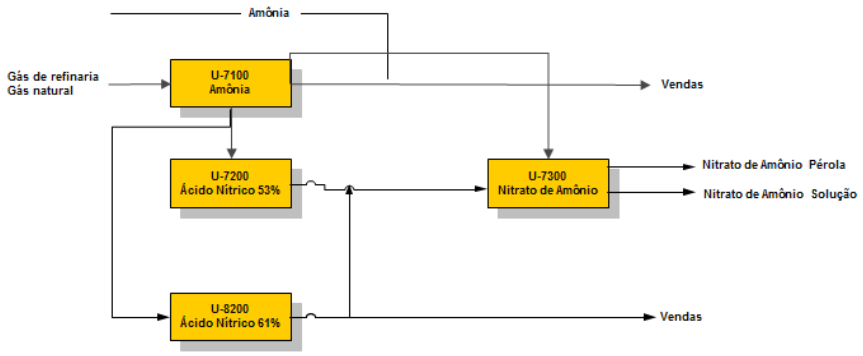


Figura 2. Fluxo macro de produção de fertilizantes nitrogenados.

Copyright © 2019 ISESC

2.1 Descrição do Problema

A unidade de ácido nítrico 53% (U-7200, Figura 1) é responsável por mais de 2/3 da produção de ácido nítrico do Complexo Industrial onde está localizada. Pelos dados de Produção planejados e executados apresentados na Tabela 2, esta unidade teve uma perda na produção prevista, em 2011 e 2012, de aproximadamente de 7%.

Tabela 2. Produção orçada × realizada (em toneladas).

Produção de HNO_3	2011	2012
Orçado	214.095	213.096
Real	199.592	199.821
Diferença	-14.503	-13.275
%Diferença	6,8%	6,2%

Para chegar às causas raiz do problema, empregou-se a árvore lógica de falhas (vide Figura 1). A quantificação da perda ocorrida foi verificada pela Análise Weibull de Produção, Equação (1).

Para a medição de espessura dos tubos do condensador (trocador de calor) foi utilizada a técnica de Ultrassom IRIS. Com a medição das espessuras dos tubos calcula-se a vida residual que tem o equipamento (espessura mínima permitida).

3. Resultados e Discussão

Os resultados serão apresentados segundo o procedimento da da Metodologia de Análise e Solução de Problemas (MASP). O problema básico é a perda de 7% no rendimento previsto na planta industrial (14 mil ton.).

3.1 Fase de Observação do Problema

Nesta fase foi utilizada a análise Weibull de produção, onde, por meio dela foi detectado que as perdas na unidade eram tanto por problemas nos equipamentos, como por baixa eficiência/má utilização. A Figura 3 mostra a análise de produção feita no período de dezembro de 2011 a novembro de 2012.

Na Figura 4 é mostrada a perda por baixa eficiência/má utilização da planta. Para isto foi ampliada a área delimitada entre as linhas 'demonstrada' e 'anunciada', vinculadas à capacidade nominal.

Da análise feita pode-se notar que as perdas por confiabilidade, geralmente relacionadas a falhas de equipamentos, e as perdas por eficiência/má utilização estavam em torno de 7.500 t/ano cada. Em função da perda por eficiência ser alta, foi dada atenção para este item. Como o valor de Beta (49) indicava uma qualidade muito boa do processo, nada foi feito para melhorar o processo.

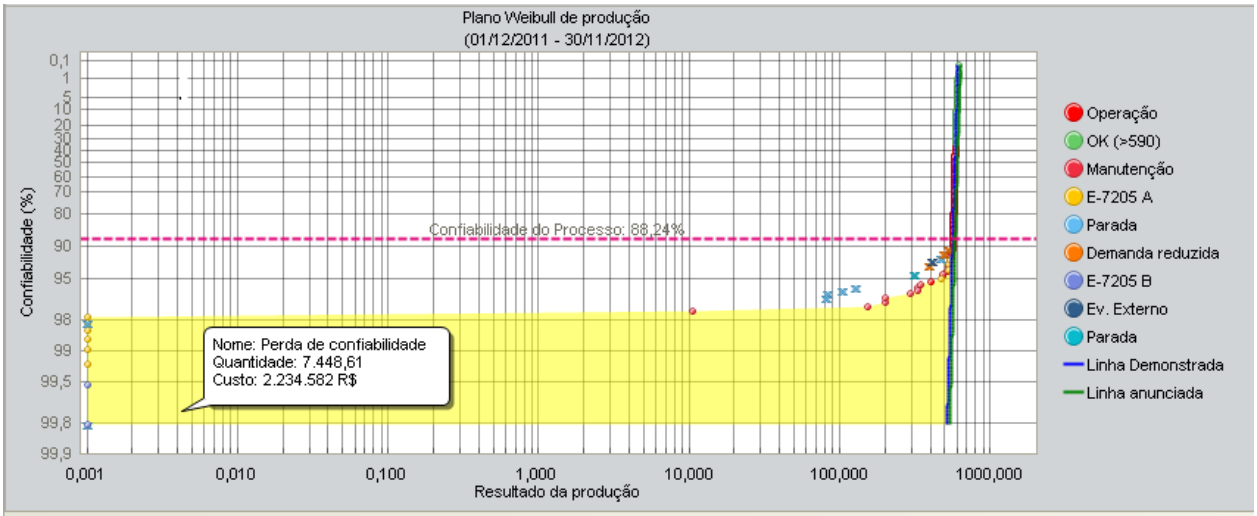


Figura 3. Gráfico resultante da análise Weibull de Produção da unidade de ácido nítrico, período 1º/12/11 a 30/11/12.

Copyright © 2019 ISESC

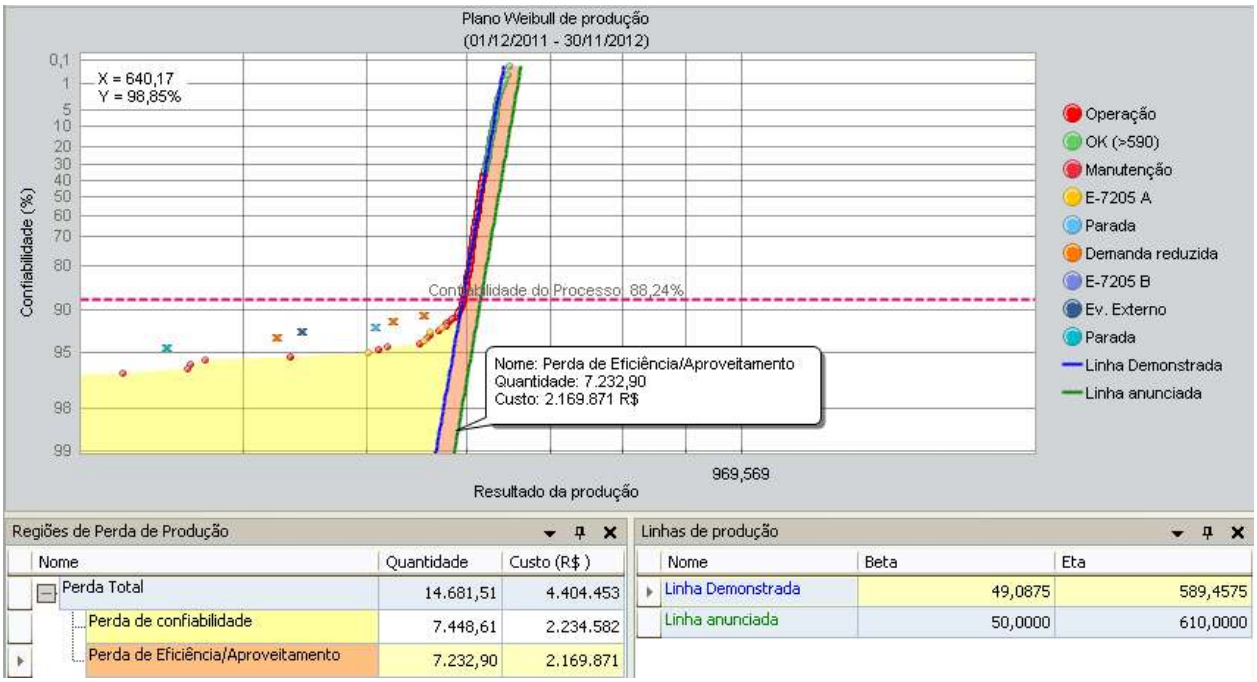


Figura 4. Gráfico detalhando as condições resultantes da análise Weibull de Produção da unidade de ácido nítrico.

Para identificar os principais maus atores (itens adversos do processo), foram levantadas as perdas dos equipamentos através de um gráfico de Pareto. Os dados resultantes estão indicados no gráfico da Figura 5.

Os equipamentos que mais impactaram nestas perdas foram 2 condensadores de ácido fraco (‘E-7205 A’ e E-7205 B’), que trabalham em paralelo e 2 resfriadores de ar de descarga do compressor (‘E-7220 A’ e ‘E-7220 B’).

O total de perdas, estimadas pelos colaboradores/operadores da planta, foi apontada como sendo:

a) Perdas por paradas corretivas: 4000 t;
b) Perdas por baixa eficiência (capacidade): 5000 t.

Nota-se, nas Figuras 3 e 4, que a análise Weibull de produção apresenta perdas maiores (cerca de 7.500 t).

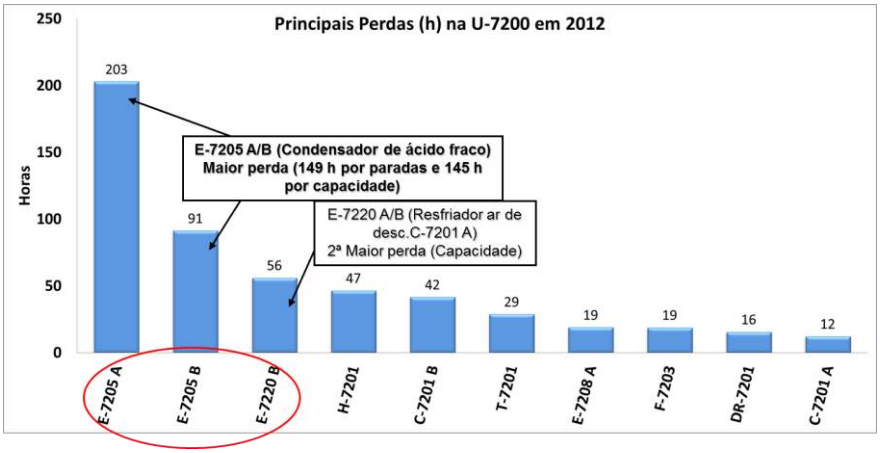


Figura 5. Estratificação das perdas por equipamentos (análise de Pareto).

Copyright © 2019 ISESC

Foi observado também que a vazão de ácido fraco tem relação direta com a produção da unidade. O gráfico da Figura 6 mostra a relação entre estes dois itens.

Na Figura 7.a é apresentado o resumo das principais perdas ocorridas/equipamentos e na Figura 7.b os principais problemas que ocorreram nos condensadores.

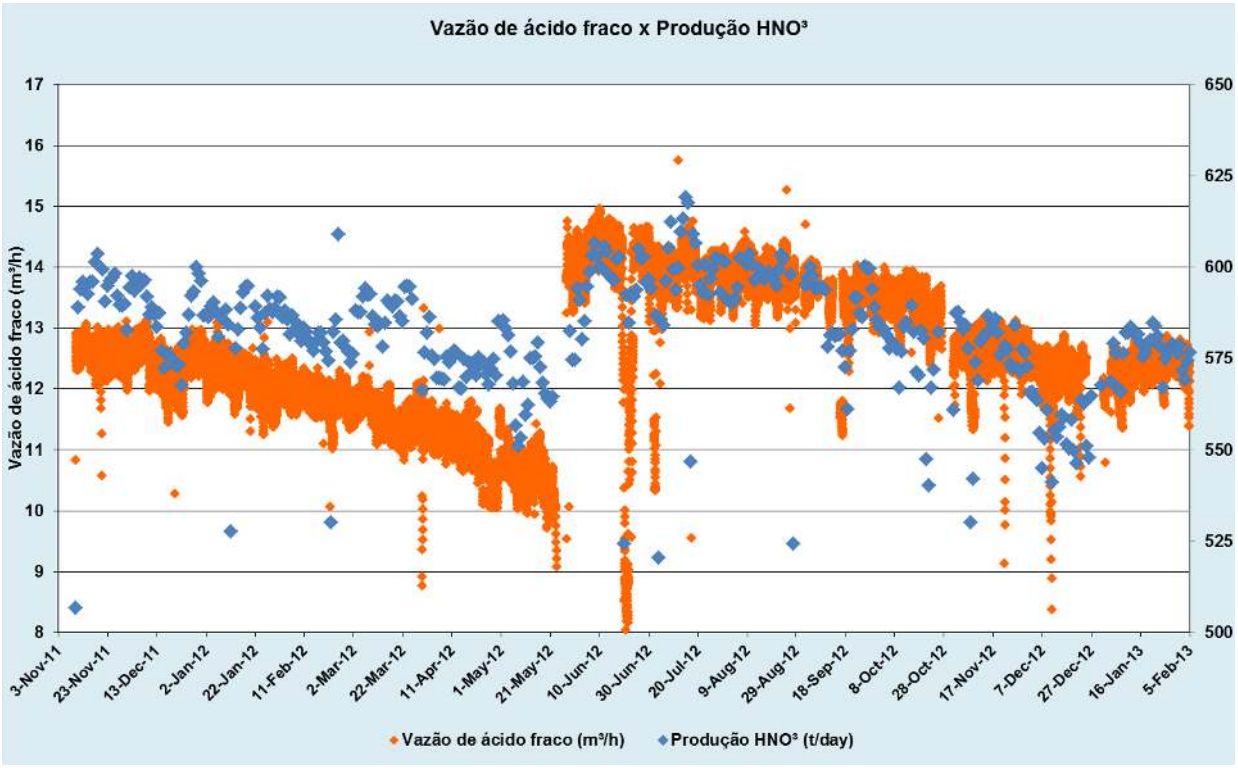


Figura 6. Gráfico ilustrando a correlação entre vazão de ácido fraco e a produção de ácido nítrico.

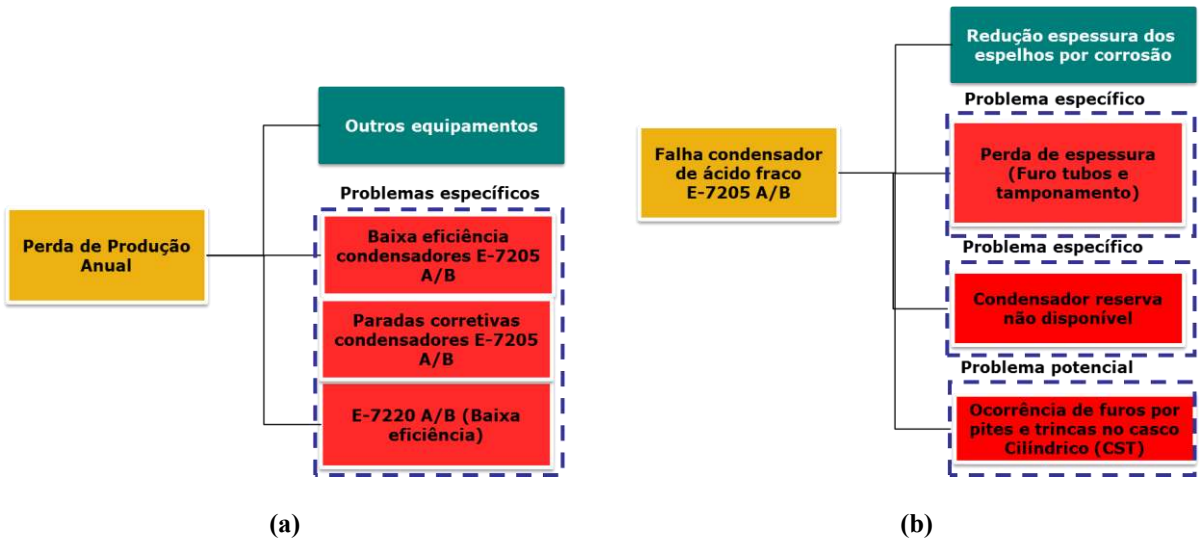


Figura 7. Esquema dos equipamentos e principais tipos de perdas ocorridas em: (a) geral e (b) nos condensadores.

Copyright © 2019 ISESC

Um dos itens de falha apontados para os condensadores foram trincas em seu casco, sendo que um exemplo destas está apresentada na Figura 8.

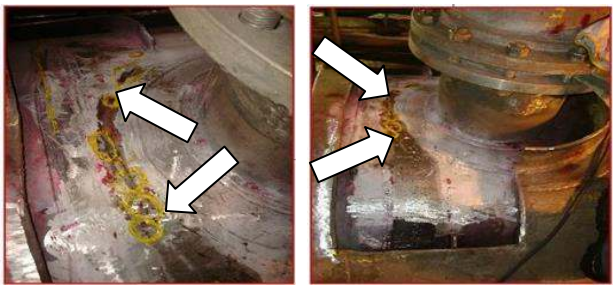


Figura 8. Exemplo de trincas presentes (indicadas pelas setas) no casco de um dos condensadores, neste caso, oriunda de corrosão sob tensão.

3.2 Definição de metas e indicadores do estudo

Os gráficos de Weibull de produção (Figuras 3 e 4) apontaram uma perda de produção de 14.503 e 14.681 t/ano para os anos de 2011 e 2012, respectivamente. Tais valores estão alinhados com as perdas apresentadas pela Tabela 2, baseadas em dados de produção.

Por outro lado, as perdas apontadas de 9.000 t para 2012 (devido a paradas e eficiência) pelos operadores/colaboradores foram mais conservadoras. Por isso, definiu-se como meta de redução, devido a paradas corretivas e perdas por eficiência, em 10 mil toneladas atuais.

Para dar suporte à meta estipulada e permitir acompanhamento foram criados dois indicadores de desempenho, são eles:

a) horas paradas corretivas dos condensadores - meta: reduzir em 90%;
b) vazão de ácido fraco (m³/h) - meta: maior do que 13 m³/h.
   Observação: como foi visto no gráfico da Figura 6, a vazão de ácido fraco tem relação direta com a produção de ácido nítrico.

3.3 Determinação das Causas Raízes

Em função dos problemas específicos definidos, foi utilizada a metodologia PROACT®, que utiliza a árvore lógica, para determinar as principais causas da baixa confiabilidade dos condensadores (paradas corretivas e baixa eficiência). A árvore lógica é representada na Figura 9.

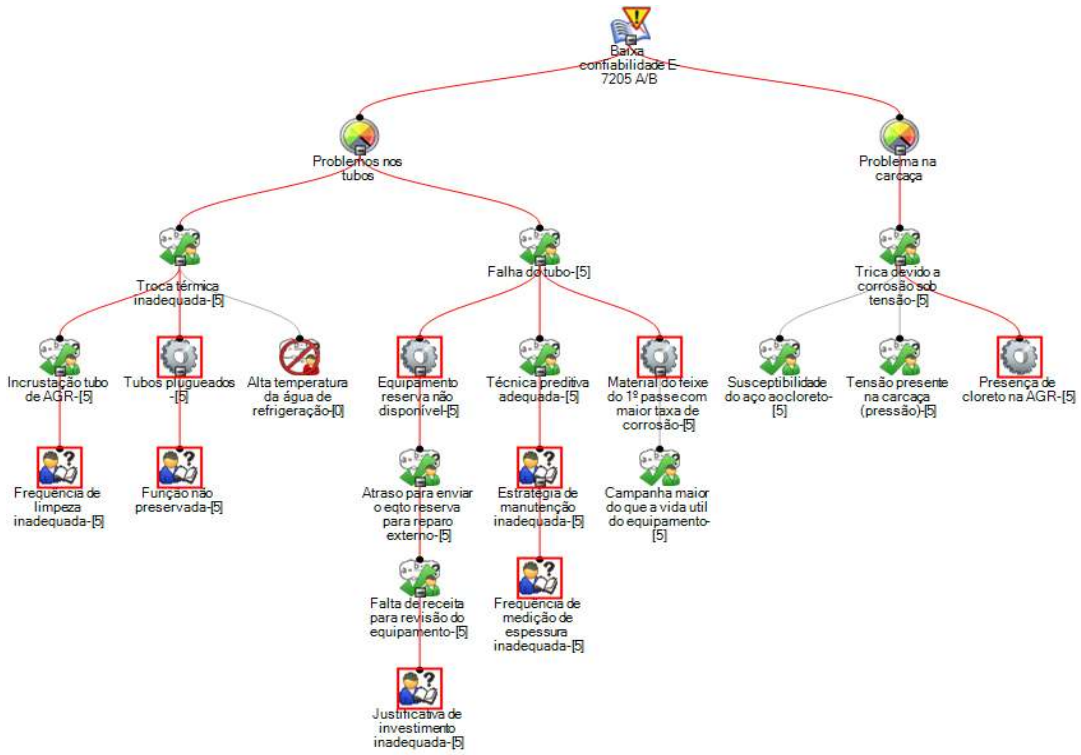


Figura 9. Árvore lógica analisando a baixa confiabilidade dos condensadores.

Copyright © 2019 ISESC

As principais causas apontadas no estudo através da árvore lógica foram:

a) Frequência inadequada da medição de espessura dos tubos. Motivo: a medição só era feita nas paradas anuais (a cada 3 anos), ou quando o equipamento apresentava vazamento nos tubos.
b) Justificativa de investimento para o condensador reserva inadequada. Em função da demora em liberar a verba, o condensador operou até apresentar perda total.
c) Função dos condensadores não preservada, valendo ressaltar os seguintes pontos:
    - Os condensadores E-7205 A/B trabalham em paralelo;
    - Não existia a definição da função dos condensadores. A manutenção só se preocupava com o equipamento;
    - Não existia limite mínimo de vazão de saída dos condensadores;
    - Presença de cloreto na água de refrigeração (trinca no casco).

As hipóteses levantadas foram todas verificadas para confirmá-las.

3.4 Plano de Ação e Execução

Na Tabela 3 são mostradas algumas das ações que foram planejadas.

Tabela 3. Descrição dos Planos de Ação.

Recomendação	Resp.	Prazo
Definir novo tipo de tubo a ser empregado (de maior vida útil)	RM	30/01/14
Definir periodicidade de medição da espessura dos tubos	RM	30/03/14
Substituir tubulações do condensador E-7205 B pelos tubos novos	WA	20/07/14
Instalar resfriadores de ar E-7220 A/B novos	MB	22/08/14
Definir o momento da troca ótima do condensador	RM	30/10/15
Preparar orientações para oferecer a justificativa do investimento	ALG	30/10/15
Definir quando deverão ser limpos os tubos dos trocadores E-7205 A/B	CBB	30/10/15
Treinar os engenheiros de manutenção/inspeção como preencher justificativa de investimento	ALG	27/11/15
Substituir tubulações do condensador E-7205 A pelos tubos novos	WA	29/01/16

Dentro do que foi considerando como plano de ação, as principais atividades realizadas foram:

a) Foi definida a função dos condensadores de ácido fraco E-7205 A/B, tendo como principal função a de disponibilizar mais do que 13 m³/h de ácido fraco para o processo. Em função disto toda a manutenção/substituição feita nestes equipamentos tem de atender esta premissa.
b) A medição da espessura dos tubos do condensador passou a ser feita em parada para troca de tela, que é realizada quadrimestralmente. Anteriormente só era feita na parada trianual ou em paradas corretivas. Para que isto ocorresse foi necessária uma mudança de cultura (parar por mais tempo preventivamente, porém reduzir o tempo total do equipamento parado);
c) Com o intuito de detectar antecipadamente o furo nos tubos, a 1ª medição de espessura (ultrassom IRIS) dos tubos, passou a ser feita de 16 a 20 meses após a instalação do feixe novo. Motivo: 1ª falha dos tubos do 1° passe ocorria em torno de 2 anos (retirado do histórico do equipamento);
d) A medição da espessura dos tubos só está sendo feita nas 4 primeiras fileiras dos tubos do 1° passe, já que a taxa de corrosão nestes tubos é maior (1º contato do gás nitroso quente com o feixe de tubos, havendo a condensação do ácido fraco). Em função disto, tem-se ganho na produtividade e mantém-se a assertividade da previsibilidade. A Figura 11 mostra a medição realizada nos tubos em 18/12/13. Com o resultado deste monitoramento é previsto que a espessura do tubo atinja a mínima espessura permissível em 7 meses. O trocador foi substituído em 30/08/14;
e) Todo o processo de justificativa de investimentos para revisão/substituição de equipamentos foi revisado;
f) Os equipamentos foram substituídos conforme datas apontadas no plano de ação;
g) O material dos tubos definidos para a utilização nos tubos do 1º passe dos condensadores foi o aço SAF 2304. Além de ter apresentado bom desempenho nas amostras testadas, havia disponibilidade dos tubos noutro complexo;
h) O momento de troca ótima do condensador foi definido quando o custo de revisão do mesmo apresenta o menor valor e a eficiência dos condensadores ainda está acima da vazão mínima de ácido fraco definida de 13 m³/h.

Copyright © 2019 ISESC

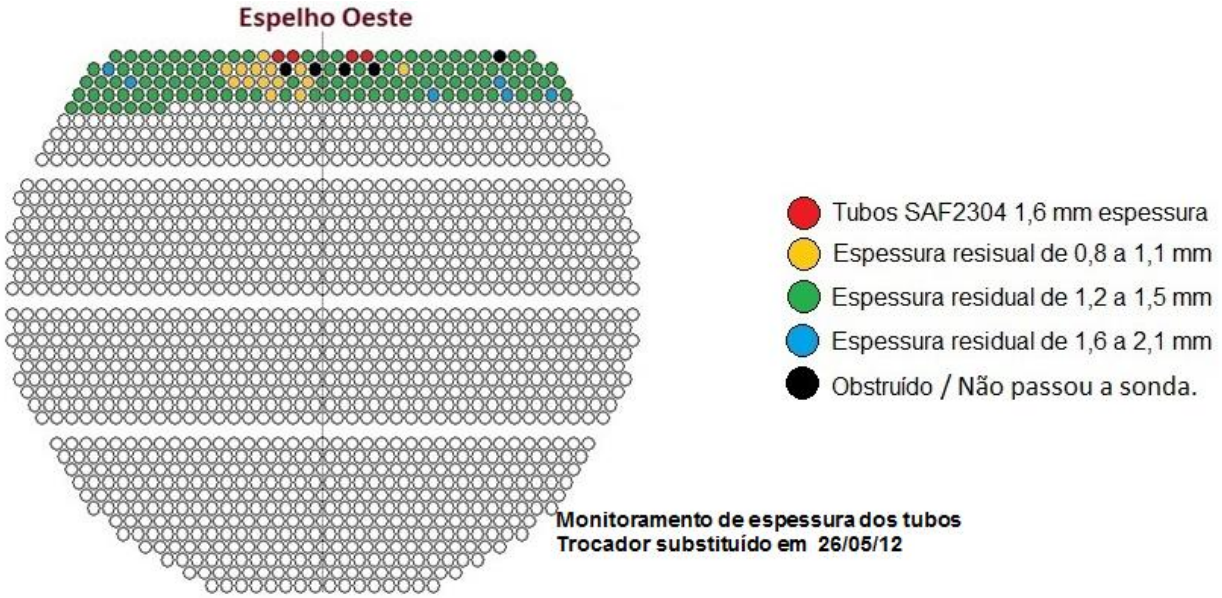


Figura 10. Descrição da medição de espessura dos tubos dos condensadores sendo melhorados.

O ideal é que o condensador seja substituído após a 1ª medição de espessura e respeitando o tempo calculado permitido para operar com segurança (espessura mínima recomendada). Caso não seja possível, quando o prazo expirar, na parada da unidade, o qual é feita a cada 4 meses, deverá ser aberto o condensador para nova medição de espessura e tamponamento dos tubos que tiverem a espessura menor do que 0,6 mm (a espessura inicial é de 2,1 mm).

Na parada subsequente da unidade, deverá ser substituído o condensador. Motivo para substituição do condensador: evitar o tamponamento de mais tubos devido à aceleração da corrosão nos tubos restantes e da vazão ficar poder ficar abaixo da vazão mínima recomendada. Caso o condensador seja trocado no tempo ideal, o custo da revisão fica em torno de R$ 50.000,00. Caso contrário, na próxima parada a troca pode chegar a R$150.000,00 ou posteriormente, pode chegar a R$ 500.000,00 e caso haja perda do condensador, poderá totalizar R$ 1.500.000,00.

3.5 Verificação

Verificou-se se os indicadores foram mantidos sobre controle e se a meta definida foi atingida após a implantação das ações. Os indicadores propostos foram os seguintes:

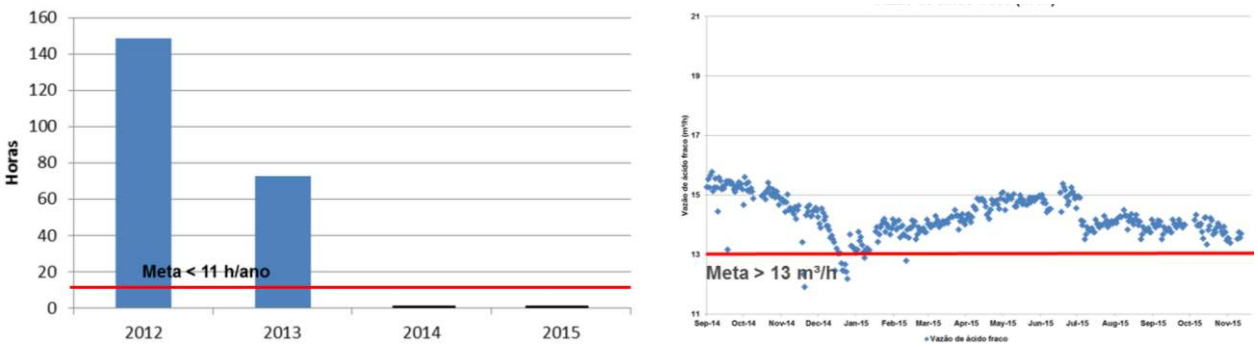
a) Indicador 1: Reduzir em 90 % as paradas corretivas dos condensadores E-7205 A/B. No gráfico da Figura 11.a pode ser verificado que as paradas corretivas foram reduzidas em mais de 90%.
b) Indicador 2: Manter a vazão de ácido fraco maior do que 13 m³/h. No gráfico da Figura 12.b é visto que a vazão de ácido foi mantida maior do que 13 m³/h.

Para demonstrar que a meta proposta de redução em 10.000 t/ano de perdas foi atingida, empregou-se duas formas:

- Na 1ª forma foi utilizada a análise Weibull de produção, aonde a perda ocorrida será a diferença entre dois períodos de um ano.
- Na 2ª forma será mostrada a produção real no ano anterior e a produção real no período da meta.

O gráfico da Figura 12 apresenta a análise de produção feita para o 2º período (01/09/14 a 31/08/15) de análise dos dados coletados. Neste caso, houve um total de 1.888 t de perdas, que representa uma forte redução, não apenas considerando os dados históricos (cerca de 14 mil t, conforme item 3.2), mas também considerando que a perdas no 1º período, após o início da análise apresentada neste trabalho (15/08/13 a 14/08/14), e não mostradas na Figura 12, apresentaram um total de 17.047 t.

Copyright © 2019 ISESC



(a) **(b)**

Figura 11. Indicadores de desempenho produtivo: (a) paradas corretivas dos condensadores E-7205 A/B e (b) variação da vazão de ácido fraco (m³/h).

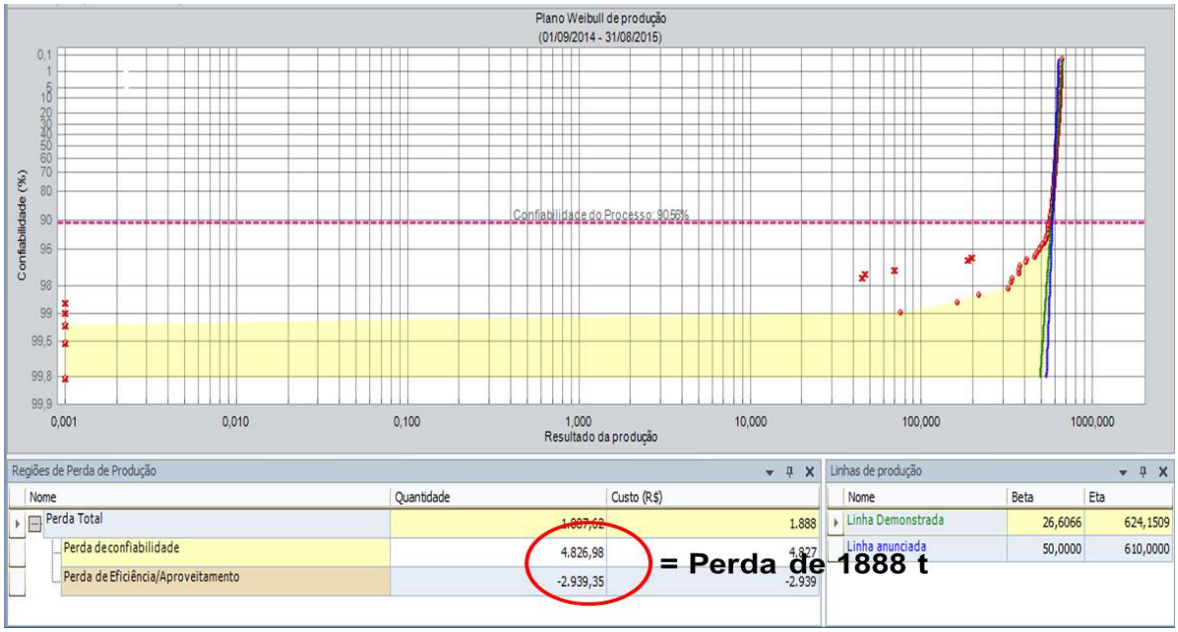


Figura 12. Desempenho da planta avaliado pela da análise Weibull de Produção, período de 01/09/14 a 31/08/15.

A Tabela 5 resume o ganho ocorrido e a redução nas perdas, tanto por confiabilidade como por eficiência.

Tabela 5. Descrição dos Planos de Ação.

Período	Produção Realizda (t)
15/08/13 a 14/08/14	197.653
1º/09/14 a 31/08/15	212.198
Ganho Produtivo	14.545
%Ganho Produtivo	7,36%

No período entre 15/08/15 a 30/08/15 ocorreu uma manutenção preventiva na unidade, por isso este intervalo de tempo não foi considerado para não contaminar a comparação entre os resultados.

4. Conclusões

A vantagem da análise de Weibull é que com ela pode-se saber o ganho que teve com a confiabilidade e com a eficiência, que são perdas ocultas. Além disso, pode-se ver a confiabilidade do processo também.

Copyright © 2019 ISESC

Com a utilização da análise Weibull de produção foram identificadas as oportunidades de ganhos para o negócio, onde foram identificadas tanto as perdas por paradas corretivas, como as perdas por eficiência (perdas ocultas), e com a análise de causa raiz, foram encontradas as causas raízes.

Através da utilização da metodologia MASP, do uso da análise de produção, da definição da função do sistema de condensação, do monitoramento de espessura e da análise de causa raiz foi possível melhorar as estratégias de manutenção, a confiabilidade da unidade e evitar as perdas de 25 dias de produção ao longo de um único ano, resultando numa economia de U$ 1.425.000.
Fatores chave para o sucesso do trabalho:

- Mudança para a cultura da confiabilidade;
- A implantação e adoção de um processo de trabalho de eliminação de falha;
- Definição de estratégia de manutenção baseada na função do sistema de condensação (MCC);
- Criação de meta e indicadores para monitorar o desempenho do trabalho;
- Utilização da análise de produção para encontrar perdas ocultas;
- Uso de materiais de alta confiabilidade.

Referências

ABERNETHY, R. B. The New Weibull Handbook, 5th edition, Dr. Robert B. Abernethy author and published, 536 Oyster Road, North Palm Beach, FL, USA, 2004.

MERIDIUM. Meridium APM PROACT 3.6.1.5.0. Apostila, 2017. Disponível em https://www.meridium.com/secure/documentation/v36150/PDF/Meridium_APM_PROACT.pdf. Acessado em 8 de dez. de 2019.

LAFRAIA, J. R. B. Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade, 1ª edição, Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

LATINO, R. J., LATINO K. C., LATINO M. A. Root Cause Analysis - Improving Performance Bottom-Line Results, 5th edition, CRC Press, 2019.

ROBERTS JR, W. T. and BARRINGER, P. New Reliability Tool for the Millennium: Weibull Analysis of Production Data, 2012. Disponível em: www.barringer1.com/pdf/Roberts-Barringer-Paper.pdf. Acessado em 13 de nov. de 2019.

Copyright © 2019 ISESC