



IBP1111_06

Metodologia de melhoria da Disponibilidade de Sistemas : Um estudo de caso de uma Unidade de Hidrodessulfuração. Eduardo Calixto¹,

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*

Resumo

O trabalho tem como objetivo otimizar a disponibilidade de uma Unidade de Refino para atender a disponibilidade de 96,5 % em 4 anos definida em projeto. Dessa forma, foram consideradas as restrições de processo, logística e saúde, segurança e meio ambiente, que mostram a inviabilidade de redundâncias da maioria dos componentes dos subsistemas pela possibilidade de liberação de produtos perigosos. Assim as soluções serão no sentido de aumentar a confiabilidade e a manutenibilidade dos componentes.

O sistema estudado apresenta oito subsistemas em série que são a Unidade de Hidrogenação Seletiva (SHU), 1º Estágio de HDS (Reação e Separação), 2º Estágio de HDS (Reação e Separação), Estabilização do Produto, Hidrogênio (Make-up do SHU e Reciclo do 1º e 2º Estágios de HDS), Corrosão, Amina, Regeneração de DEA.

Como resultado da otimização pela disponibilidade dos subsistemas serão apresentados os MTTF e MTTR que cada componente dos subsistemas devem ter para que o sistema atinja a disponibilidade requerida. Para melhoria da disponibilidade do sistema será utilizado o conceito de confiabilidade de blocos em série, onde a confiabilidade do sistema é menor que a menor confiabilidade dos subsistemas em série. Nesse caso a disponibilidade do sistema será menor que a menor disponibilidade dos subsistemas, pois esses estão em série. Dessa forma, serão calculados os sistemas críticos e os valores de disponibilidade que os subsistemas críticos devem atingir para que o sistema atinja a disponibilidade requerida de 96,5 em 4 anos.

Abstract

The objective of such paper is optimization of the availability of a Refinery Unit to comply with the availability of 96,5 % in 4 years defined in project based in market demand. Thus, there was consideration of process restrictions, logistic and health, safety and environmental, which demonstrate the non-viability of redundancies in most components of the sub-systems for the possibility of release of dangerous products. Thus the solutions will be in the sense of improving the reliability and maintainability of components.

The surveyed system presents eight sub-systems in series which are the Selective Hydrogenation Unit (SHU), 1st HDS Stage, 2nd HDS Stage, Product Stabilization, Hydrogen supply, Corrosion, and DEA Regeneration.

There will be presentation, as a result of optimization by availability of the sub-systems, of the MTTF and MTTR that each critical component of the sub-systems must have so that the system reaches the required availability, using Minimum Availability Target Metodology.

1. Introdução

¹ Mestre, Engenheiro de Produção – PETROBRAS SA

² Doutorando – Programa de Planejamento energético

A análise de disponibilidade de um sistema é fundamental para verificar as possíveis melhorias a serem realizadas nos subsistemas e equipamentos críticos para manter a meta de disponibilidade de uma Unidade. A disponibilidade é influenciada pela confiabilidade e pela manutenibilidade, sendo fundamental a avaliação dos tempos de reparo e falha para definir os equipamentos mais críticos, ou seja os que mais afetam a disponibilidade da Unidade.

A análise de confiabilidade dos sistemas críticos é fundamental para que se possa atuar de forma preventiva nas possíveis falhas dos equipamentos. A confiabilidade de um sistema é a probabilidade do sistema funcionar sem apresentar falhas segundo as características previstas, por um determinado período de tempo. Para análise de confiabilidade de sistemas é necessário fazer a configuração segundo a lógica do diagrama de blocos, que podem representar as falhas combinadas dos processos, componentes e equipamentos.

Para realizar esta análise é necessário delimitar as fronteiras do sistema. Nesse caso, serão avaliados subsistemas, equipamentos e componentes cujas falhas representem impactos ambientais, danos à saúde e a propriedade, perda de produção, parada do sistema, etc. A configuração do sistema terá como resultado um conjunto de blocos em série e em paralelo como mostra a Figura 1 abaixo.

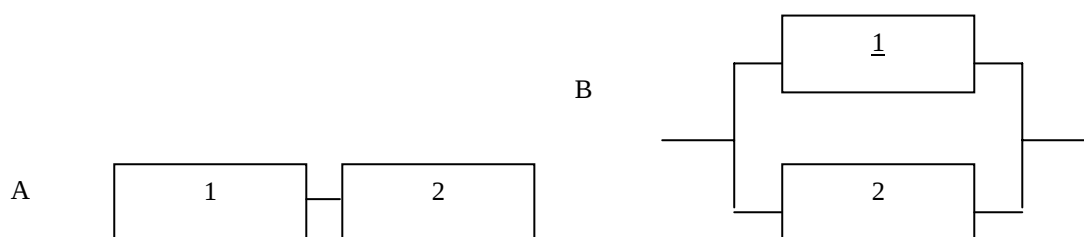


Figura 1 – Diagrama de blocos

No caso A, confiabilidade é representada como:

$$R(t) = R_1 \times R_2$$

No caso B, a confiabilidade será:

$$R(t) = 1 - ((1-R_1) \times (1-R_2))$$

Esse mesmo conceito pode ser aplicado para a disponibilidade, sendo por exemplo a disponibilidade de um sistema com dois subsistemas em série o produto das disponibilidades desses subsistemas, ou seja, $D(t) = D_1(t) \times D_2(t)$ e a disponibilidade de um sistema formado por dois subsistemas em paralelo a equação $D(t) = 1 - ((1-D_1(t)) \times (1-D_2(t)))$.

Outro conceito importante para o estudo da disponibilidade de um sistema é o de manutenibilidade que é a probabilidade de um dado equipamento ser reparado em um período de tempo previsto. Isso irá impactar na disponibilidade do equipamento, que pode ser entendida como a probabilidade do equipamento estar disponível em um determinado tempo. Na verdade a disponibilidade é impactada não só pela manutenibilidade, mas pela confiabilidade dos equipamentos. Dessa forma, quanto maior a confiabilidade e a manutenibilidade, maior será a disponibilidade. As relações da manutenibilidade e confiabilidade com a disponibilidade são resumidas na tabela 1 a seguir:

Confiabilidade	Manutenibilidade	Disponibilidade
Aumenta	Aumenta	Aumenta
Constante	Aumenta	Aumenta
Constante	Diminui	Diminui
Aumenta	Constante	Aumenta
Diminui	Constante	Diminui
Diminui	Diminui	Diminui

Tabela 1 – Disponibilidade, manutenibilidade e confiabilidade.

De maneira geral, a análise de um sistema deve levar em consideração a confiabilidade e a manutenibilidade, pois estas afetarão a disponibilidade do sistema. Por meio desta análise é possível identificar quais são os equipamentos críticos em termos de manutenção e falha, para que os gestores possam tomar a melhor decisão para gerar a maior disponibilidade a um menor custo.

Dessa forma, é necessário identificar qual a característica de cada equipamento e qual a sua curva característica podendo ter falha prematura, falha aleatória ou falha por desgaste para que sejam tomadas ações como: treinamento, correção de projeto, reposição do equipamento quando falhar, manutenção preventiva, preditiva e inspeção. Na Figura 2 podemos ver um exemplo da curva PDF – distribuição de *Weibull* – que representa essas situações.

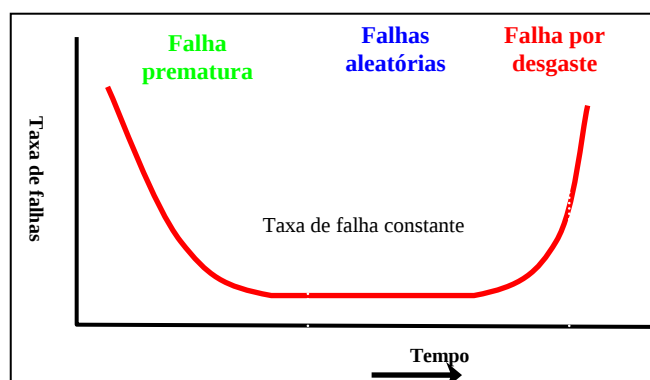


Figura 2 – Curva da banheira

Fonte: Lafraia, 2004

Este estudo tem por objetivo avaliar a disponibilidade de projeto de uma Unidade de refino. Foi analisado o projeto da Unidade, sendo eliminados todos os fatores externos à Unidade, como vapor, água de resfriamento etc. Para esta etapa, foram utilizados dados de reparos da Unidade e dados de falhas genéricos, assumindo-se ainda que todos os recursos externos estão 100% disponíveis. Para otimização do sistema será utilizado o conceito de confiabilidade de blocos em série, onde a confiabilidade do sistema é menor que a menor confiabilidade dos subsistemas em série. Nesse caso a disponibilidade do sistema será menor que a menor disponibilidade dos subsistemas, pois esses estão em série. Dessa forma, serão calculados os sistemas críticos e os valores de disponibilidade que os subsistemas críticos devem atingir para que o sistema atinja a disponibilidade requerida de 96,5 em 4 anos.

2. Metodologia da análise

O estudo de confiabilidade de sistemas geralmente é dividido em análise dos dados de falha e reparo e simulação. A fase de busca de dados para alimentar os modelos de confiabilidade pode ser feita em bancos de dados teóricos como o OREDA, dentre outros ou via dados coletados pelas áreas que gerenciam os sistemas. Nesses dois casos é importante verificar se os dados são confiáveis a ponto de representar o comportamento dos equipamentos e sistemas. Essa questão é fundamental em qualquer análise de confiabilidade, sendo uma grande barreira em muitos estudos realizados atualmente. No estudo em questão o levantamento dos dados foi feito de forma qualitativa baseada na percepção dos operadores do sistema em relação aos tempos de reparo e falhas.

Um ponto importante a ser lembrado é que os dados de falha estão associados a modos de falha dos equipamentos. Dessa forma, é essencial conhecer esses modos de falha para fazer um correto gerenciamento da confiabilidade. Para isso é recomendado que se faça uma análise de modos de falhas (FMEA) dos sistemas estudados. No estudo em questão não foi feito um FMEA para definição dos modos de falha mas o levantamento dos dados de reparo e falha consideraram apenas os modos de falhas críticos que causam indisponibilidade nos equipamentos.

A partir da coleta de dados o sistema é modelado e posteriormente é simulado para avaliar os resultados e propor as soluções de melhoria. Baseado nessas considerações, a metodologia utilizada para a análise de disponibilidade da unidade de HDS contemplou a definição do escopo da análise, busca de dados qualitativos; simulação e otimização no software BLOCKSIM, mostra a Figura 3 abaixo.

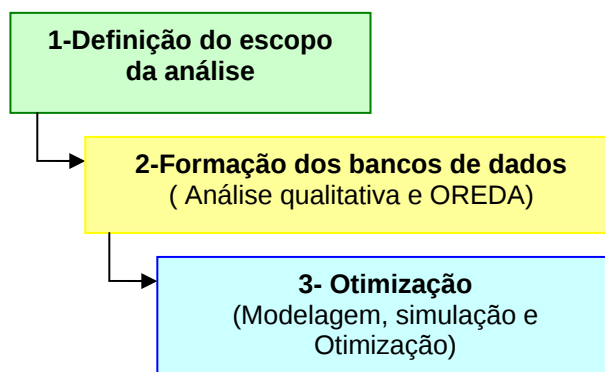


Figura 3 – Metodologia de Análise de confiabilidade

Fonte: Autor, 2005.

2.1 - Levantamento dos dados de falha e reparo

Atualmente, uma das grandes barreiras para os estudos de disponibilidade nas organizações é a inexistência de uma base de dados confiável, que possa representar a realidade das falhas e reparos dos equipamentos. Isso se deve a vários fatores, sejam eles estruturais, culturais, tecnológicos dentre outros. Podemos verificar no caso da empresa em questão, que a falta de cultura de coleta de dados nas áreas operacionais pode estar relacionado ao fato dos equipamentos terem uma vida útil relativamente alta, não apresentando falhas no dia a dia que impactam o sistema, causando paradas e perdas de produção significativas. Outro fato importante é que as unidades são projetadas com alto grau de redundância e a existência de um alto inventário de peças de reposição faz com que os impactos das falhas sejam suavizados. Essa última premissa não é adotada no caso da Unidade em questão pois a política de estoque é ter o mínimo de sobressalentes, impactando em alguns casos o rendimento de algumas Unidades.

Para garantir a representatividade dos dados coletados foram feitas entrevistas com os profissionais de manutenção que tem conhecimento dos sistemas estudados e foi feita uma análise qualitativa dos tempos de falhas e de reparo. Para definição dos equipamentos a serem qualificados, foi feita uma análise crítica dos equipamentos que causam indisponibilidade no sistema e seus respectivos modos de falha críticos, padronizando os principais modos de falha dos equipamentos que mais impactam os respectivos Subsistemas. Para qualificação dos dados de reparo foram considerados tempos de reparo e tempo logístico, ou seja, o tempo necessário para suprir um equipamento ou componente necessário no sistema, contando do pedido até a disponibilidade do item na área operacional.

O tempo total de reparo é a soma do tempo de reparo e do tempo logístico sendo considerado três cenários de tempo, pessimista, mais provável e otimista. No estudo em questão podemos observar que os tempos de reparo estão compatíveis com os bancos de dados teóricos, mas os tempos logísticos estão completamente fora, causando um grande desvio. Nesse caso, foi percebido que o tempo logístico para aquisição de um componente desde o pedido até a disponibilidade na área operacional varia de três a quatro meses. No caso de componentes importados o tempo logístico aumenta para uma variação de seis a nove meses. Dessa forma, consideramos que os componentes estarão disponíveis dentro de um tempo logístico adequado não adotando os tempos logísticos de entrega dos componentes.

O exemplo abaixo representa um compressor com seus modos de falha e respectivos tempos médio de falha e reparo. Os modos de falha são parada do motor, falha na instrumentação e quebra do rotor. Os tempos são definidos em pessimista (P), mais provável (MP) e otimista (O) e foram definidos nas entrevistas com os técnicos e engenheiros de manutenção.

Equipment Class	Modo de falha	Tag No	MTTF (anos)			MTTR (horas)		
			P	MP	O	P	MP	O
Gas Compressors - Recycle	Motor	C-003501	10		20	168		1.440
	Instrumentation			2		6		12
	rotor, selo		10		20	96		360

Tabela 2 – Dados de falhas e reparo qualitativos

Da mesma forma, foram definidos os tempos médios de falha e reparo de cada equipamento dos subsistemas analisados, sendo o tempo de reparo total o somatório do tempo logístico com o tempo de reparo dos equipamentos. O tempo logístico foi expurgado na análise do modelo devido ao fato de impactar significativamente não representando a realidade observada na prática. Dessa forma, consideramos que as políticas de estoque e distribuição de componentes serão otimizadas.

3 - O Processo de Hidrodessulfurização

O processo de Hidrodessulfurização é baseado na adição de hidrogênio às frações de petróleo, a pressões e temperaturas elevadas em leitos catalíticos. O objetivo principal desse processo é a remoção de compostos sulfurados. O catalisador mais indicado para esse tipo de processo é o de Cobalto Molibdênio mas, dependendo das características da carga, outros tipos de catalisadores também podem ser empregados, como o de Níquel Molibdênio.

A unidade que iremos analisar é composta de uma seção de Hidrogenação seletiva (SHU) e duas seções de Hidrodessulfurização (HDS). Também faz parte da unidade uma seção de amina cujo objetivo é remover o H₂S do gás de reciclo e uma de estabilização do produto. A seguir é feita uma breve descrição das diversas seções analisadas.

3.1 - Unidade de Hidrogenação Seletiva (SHU)

A capacidade do projeto da unidade é de 5.000 m³/d.

A carga da unidade é proveniente da Torre Debutanizadora da Área Fria da unidade de Craqueamento Catalítico Fluido (FCC) (U-39).

Ao entrar na unidade a carga passa por filtros, com o objetivo de remover particulados, passando ao vaso de carga. A carga é então bombeada para a seção SHU e, após receber adição de Hidrogênio de reposição, é pré-aquecida para a temperatura especificada da entrada do reator.

O objetivo desta seção é remover as diolefinas.

3.2 - 1º Estágio de HDS

Após passar pela seção SHU, a carga é separada numa fração leve (LCN) e uma fração pesada (HCN).

A corrente HCN é enviada para o primeiro estágio de HDS.

Após receber adição de hidrogênio de reciclo a carga é pré-aquecida na bateria de permutadores com o objetivo de atingir a temperatura especificada para a entrada do reator de HDS.

Nesta seção é feita uma grande parte da remoção dos compostos sulfurados, que são convertidos em H₂S. O efluente dessa seção, é composto da fração HCN livre de parte dos compostos sulfurados e do gás rico em H₂ e com um determinado teor de H₂S.

O efluente é separado, num vaso separador em líquido e vapor.

O líquido efluente, após ser retificado para remoção do H₂S dissolvido, é enviado para o segundo estágio de HDS.

3.3 - 2º Estágio de HDS

O produto líquido da primeira seção de HDS é enviado para o reator do segundo estágio para complementar a remoção de enxofre.

Como no primeiro estágio, o efluente do reator de HDS é resfriado e separado em líquido e gás.

O gás, rico em H₂ e contaminado com H₂S, é enviado, juntamente com o gás do primeiro estágio, para a seção de amina.

O líquido efluente do segundo estágio é enviado para a seção de estabilização.

3.4 – Amina

Na seção de amina, os gases provenientes do Primeiro e segundo estágios de reação, gás de reciclo, passa por uma torre absorvedora onde o H₂S é removido.

O gás efluente, rico em H₂ e sem H₂S, é enviado para o compressor de reciclo e reenviado para as seções de reação.

3.5 – Hidrogênio

O hidrogênio necessário para as reações de hidrodesulfurização do Primeiro e Segundo Estágio e da seção SHU é proveniente da Unidade de Geração de Hidrogênio (U-34).

3.6 - Estabilização

O líquido produto do segundo estágio de reação, especificado quanto ao teor de enxofre, mas com contaminantes leves, é enviado para uma coluna de estabilização onde os gases dissolvidos são removidos pelo topo da coluna e o produto especificado é bombeado para o limite de bateria da unidade.

4 - Metodologia de Melhoria da disponibilidade do Sistema

4.1 – Modelagem

A Análise RAM foi desenvolvida utilizando-se o software BlockSim da Reliasoft. A modelagem permite a criação de cenários típicos de ciclo de vida para os sistemas propostos, utilizando técnicas de simulação de Monte Carlos. Resumidamente, um cenário de ciclo de vida é uma seqüência cronológica de eventos que representam o comportamento do sistema em tempo real. O algoritmo, conhecido como simulação direta, opera na base do próximo evento, ou seja, a vida do sistema é simulada em passos, da ocorrência de um evento até a ocorrência do próximo. A natureza dinâmica da simulação vem da habilidade de alterar a configuração do sistema à medida que a simulação prossegue. Toda a Unidade foi modelada através de Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD), considerando-se as redundâncias e as possibilidades de by-pass de cada equipamento ou sistema. A seguir, o modelo desenvolvido foi alimentado com dados de falhas e tempos de reparo dos equipamentos.

Existem três maneiras básicas para se melhorar a disponibilidade operacional de uma instalação :

1. Através da instalação de redundâncias para os equipamentos mais críticos ;
2. Através da melhoria da confiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos utilizados, sem a instalação de novas redundâncias.
3. Através da política de manutenção que permita manter um nível de disponibilidade desejado.

No caso de uma instalação como a de HDS, onde se trabalha com hidrogênio a altas pressões e altas temperaturas, a questão de possibilidade de vazamentos é crítica, uma vez que qualquer vazamento pode levar a acidentes de grandes proporções. Desta forma, é usual para este tipo de instalação, evitar-se instalar equipamentos adicionais, a menos que sejam imprescindíveis.

Partindo-se deste princípio, neste item foram calculados novos valores de taxas de falhas para alguns equipamentos críticos, de tal forma que a unidade atinja a meta de eficiência produtiva média de 96,5 em quatro anos , ou seja uma campanha operacional baseada na vida útil dos reatores.

Para atingir a disponibilidade operacional meta é necessário que seja definido a disponibilidade de cada subsistema através da modelagem do diagrama de blocos e a avaliação dos subsistemas críticos em termos de disponibilidade, ou seja, os subsistemas que mais impactam no sistema (HDS) como um todo. Através das premissas adotadas os subsistemas estão em série como mostra a figura 4 abaixo. O aumento da disponibilidade do sistema será através do aumento de confiabilidade dos subsistemas, evitando redundâncias por questões de segurança.

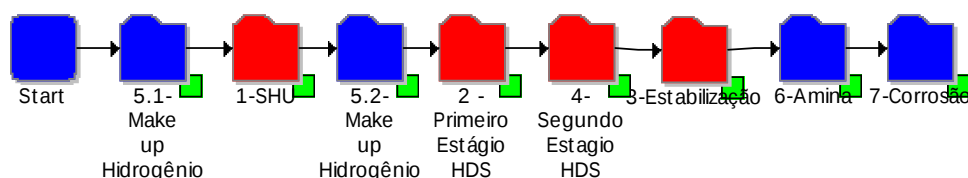


Fig 4 – Unidade de Hidrotratamento

A disponibilidade do sistema pode ser definida como :

$$D(\text{HDT})(t) = D(\text{Reciclo } 1^\circ \text{ e } 2^\circ \text{ estágio})(t) \times D(\text{SHU})(t) \times D(\text{MK H}_2)(t) \times D(1^\circ \text{ Estágio})(t) \times D(2^\circ \text{ Estágio})(t) \times D(\text{Estabilização})(t) \times D(\text{Amina})(t) \times D(\text{Corrosão})(t).$$

Para propor melhoria na disponibilidade do sistema é necessário primeiro definir os subsistemas mais críticos, ou seja, quanto à variação da confiabilidade de cada subsistema impacta na variação da confiabilidade do sistema, sendo por definição a derivada parcial da função confiabilidade do sistema em relação à função confiabilidade do subsistema. Dessa forma, podemos verificar os subsistemas que mais influenciam o sistema em termos de confiabilidade ao longo do tempo, sendo o 1º estágio, 2º estágio e SHU como mostra a figura 4 abaixo.

Como podemos verificar no resultado da simulação abaixo os subsistemas mais críticos em termos de confiabilidade são o Primeiro e Segundo Estágio, SHU e a Estabilização. Para acharmos a criticidade dos subsistemas em termos de disponibilidade podemos utilizar a mesma metodologia definindo as derivadas parciais da função disponibilidade do sistema em relação a cada ou subsistema ou uma segunda alternativa. Uma forma diferente de identificar os sistemas que mais impactam na disponibilidade do sistema é definir a disponibilidade mínima que cada subsistema deve apresentar para que o sistema atinja a disponibilidade requerida, sendo a disponibilidade do sistema a multiplicação da disponibilidade de seus subsistema, já que estão em série.

$$D(\text{HDT})(t) = D(\text{H}_2 \text{ } 1^\circ \text{ e } 2^\circ \text{ estágio})(t) \times D(\text{SHU})(t) \times D(\text{MK H}_2)(t) \times D(1^\circ \text{ Estágio HDS})(t) \times D(2^\circ \text{ Estágio HDS})(t) \times D(\text{Estabilização})(t) \times D(\text{Amina})(t) \times D(\text{Corrosão})(t).$$

$$\text{Se, } D(\text{Meta})(t) \geq D(\text{SHU})(t) \times D(1^\circ \text{ Stage})(t) \dots$$

$$\text{E, } D(\text{SHU})(t) = D(1^\circ \text{ Stage})(t) = D(2^\circ \text{ Stage})(t) = D(\text{Min})$$

$$D(\text{MIN})(t) \geq \sqrt[n]{D(\text{META})(t)}, \text{ LOGO:}$$

$$D(\text{MIN})(8760) \geq 99,61$$

Esse valor é o resultado de uma equação, sendo um ponto de mínimo aproximado. Considerando a disponibilidade em 1 ano dos subsistemas verifica-se que o resultado das simulações de cada subsistema apresenta as seguintes disponibilidades abaixo :

Sistema	Disponibilidade (8760 hs)
SHU	98,84
1º Estágio de HDS	97,69
2º Estágio de HDS	97,6
Estabilização	99,42
Amina	99,71
Corrosão de tubulação	99,98
Hidrogênio (Make-up do SHU)	99,95
Hidrogênio (Reciclo do 1º e 2º Estágios HDS)	99,80

Isso mostra que os subsistemas que mais impactam na disponibilidade são os que apresentam a disponibilidade abaixo de 99,61, sendo o Primeiro e segundo Estágio de HDS, SHU e a Estabilização como dito anteriormente. Assim, identificado os subsistemas mais críticos. O próximo passo é a definição da disponibilidade de cada subsistema crítico para alcançar a disponibilidade meta da Unidade. A disponibilidade do sistema em série será sempre menor que a menor disponibilidade dos seus subsistemas. Utilizando esse princípio, adotaremos os blocos em paralelo como grande

blocos em serie e dessa forma definiremos os subsistemas críticos e a disponibilidade mínima a ser atingida por esses subsistemas considerando a disponibilidade dos demais subsistemas. Dessa forma, utilizaremos a equação abaixo para fazer uma aproximação do valor estimado mínimo dos subsistemas críticos e definiremos o MTTF e MTTR para que essa disponibilidade seja atingida. Esses valores serão verificados pela simulação para checarmos se a disponibilidade mínima dos sistemas são atingidas otimizando a Unidade como um todo. Assim a equação abaixo representa um método de estimar os valores mínimos da disponibilidade dos subsistemas críticos.

$$D(\text{Shu}) (t) \times D(1\text{st stg}) (t) \times D(2\text{nd Stg}) (t) \times D(\text{Est}) (t) = \frac{D(\text{Meta})l(t)}{D1(\text{H2Mup}) (t) \times \dots \times D1(\text{C}) (t)}$$

$$D_{\min}(t) = D(\text{Shu}) (t) = D(1\text{st stg}) (t) = D(2\text{nd Stg}) (t) = D(\text{Est}) (t)$$

$$D_{\min}(t) = \sqrt[4]{\frac{D(\text{Meta})l(t)}{D1(\text{H2Mup}) (t) \times \dots \times D1(\text{C}) (t)}}$$

$$D_{\min}(8760) = 0,9925 \text{ " .}$$

Logo, a disponibilidade mínima dos subsistemas SHU, 1° e 2° estágio devem ter 0,9925 (1 ano). Apesar da disponibilidade do subsistema de estabilização ser 99,42 menor que o valor inicial mínimo, considerando que outros subsistemas tem disponibilidade maior que esse valor, o ponto de corte reduz de 99,61 para 99,25 não sendo necessário otimizar o Subsistema estabilização. Na simulação final, iremos verificar esses valores.

4.2 – Melhoria dos subsistemas críticos

Através do uso do software BlockSim da Reliasoft, foi feita uma melhoria da disponibilidade dos seguintes sistemas SHU, 1° Estágio de HDS, 2° Estágio de HDS. Os demais sistemas não serão otimizados por já apresentarem disponibilidades superiores ao valor necessário. Desta forma, a disponibilidade mínima para os três sistemas acima, para o período de 1 ano (8760 horas), é de 99,25 %.O próximo passo é definir os equipamentos críticos em cada subsistema utilizando a mesma metodologia para definir os MTTF e MTTR verificando os resultados através de simulação.

4.2.1 – Otimização do SHU

Utilizando a metodologia de identificação dos subsistemas críticos podemos verificar que os equipamentos críticos são os permutadores devido a disponibilidades serem menor que 99,98 baseado na equação abaixo

$$\text{Se, } D(\text{Meta}) (t) \geq D(\text{FT} - 3501 \text{ A/B})(t) \times D(\text{V} - 3501)(t) \times D(\text{B} - 3501 \text{ A/B}) (t) \times \dots \times D(\text{V} - 3513)(t)$$

$$\text{E, } D(\text{FT} - 3501 \text{ A/B})(t) = D(\text{V} - 3501)(t) =$$

$$D(\text{B} - 3501 \text{ A/B}) (t) = D(\text{MIN})$$

$$D(\text{MIN}) (t) \geq \sqrt[18]{D(\text{META}) (t)}, \text{ LOGO :}$$

$$D(\text{MIN}) (8760) \geq 99,98$$

A simulação do subsistema SHU mostra que alguns permutadores estão com disponibilidade inferior a 99,98 em 8760 horas. Assim, para que o SHU apresente uma disponibilidade mínima de 99,25%, os equipamentos P-003501, P-003502, P-003505, P-003506, P-003507 e P-003509 deverão ser otimizados:

Os demais equipamentos não serão otimizados por já apresentarem disponibilidades superiores ao valor necessário. Desta forma, a disponibilidade mínima para os equipamentos acima, considerando a disponibilidade dos demais equipamentos do subsistema será de 99,89 % para o período de 1 ano (8760 horas), devido ao fato de outros equipamentos apresentarem disponibilidade superior ao valor mínimo estimado como mostra a equação abaixo.

$$D(\text{P} - 01)(t) \times D(\text{P} - 02)(t) \times D(\text{P} - 05)(t) \times D(\text{P} - 06)(t) \times D(\text{P} - 07)(t) \times D(\text{P} - 09)(t) = \frac{D(\text{Meta})l(t)}{D(\text{Ft1})(t) \times D(\text{V1})(t) \times D(\text{B1})(t) \times \dots \times D(\text{V13})(t)}$$

$$D_{\min}(t) = D(\text{P} - 01)(t) = D(\text{P} - 02)(t) = D(\text{P} - 05)(t) = D(\text{P} - 06)(t) = D(\text{P} - 07)(t)$$

$$D_{\min}(t) = \sqrt[6]{\frac{D(\text{Meta})l(t)}{D(\text{Ft1})(t) \times D(\text{V1})(t) \times D(\text{B1})(t) \times \dots \times D(\text{V13})(t)}}$$

$$D_{\min}(8760) = 0,9989$$

O próximo passo é definir o MTTF e o MTTR dos equipamentos críticos, ou seja, com disponibilidade abaixo de 99,89 e simular o subsistema SHU para verificar se a disponibilidade atingida é de 99,25. Assim, utilizando um MTTF de 15 anos para os equipamentos críticos e mantendo o MTTR constante, devido a impossibilidade de aumentar o tempo de reparo, conseguimos atingir uma disponibilidade de 99,61 no subsistema SHU, tendo todos os equipamentos disponibilidade maior que 99,89. Podemos verificar na reequação abaixo o resultado encontrado de MTTF para os equipamentos críticos do subsistema SHU que são os permutadores.

$$D(P-01)(t) \cong \frac{MTTF(P-01)(t)}{MTTF(P-01)(t) + MTTR(P-01)(t)} + \frac{MTTR(P-01)(t)}{MTTR(P-01)(t) + 120} \times \exp(-(\lambda + \mu)t)$$

$$0,9989 \cong \frac{MTTF(P-01)(t)}{MTTF(P-01)(t) + 120} + \frac{MTTR(P-01)(t)}{MTTR(P-01)(t) + 120} \times \exp(-(\lambda + \mu)t)$$

Considerando, $t = 8760hs$

$$\frac{MTTR(P-01)(t)}{MTTR(P-01)(t) + 120} \times \exp(-(\lambda + \mu)t) \cong 0, \text{ Logo :}$$

$$0,9989 \cong \frac{MTTF(P-01)(t)}{MTTR(P-01)(t) + 120}$$

$$MTTF(P-01)(t) - 0,9989MTTF(P-01)(t) \cong 0,9989 \times 120$$

$$MTTF(P-01)(8760) \cong 131400$$

4.2.2 – Otimização do 1º Estágio de HDS

Utilizando a metodologia de identificação dos subsistemas críticos podemos verificar que os equipamentos críticos são os permutadores e o forno. Devido a disponibilidades serem menor que 99,95 baseado na equação abaixo

$$\text{Se, } D(\text{Meta})(t) \geq D(B-3503 A/B)(t) \times D(P-3511 A)(t) \times D(P-3511 B)(t) \times \dots \times D(B-3509 A/B)$$

$$\text{E, } D(B-3503 A/B)(t) = D(P-3511 A)(t) = D(P-3511 B)(t) = D(B-3509 A/B)(t) = D(\text{MIN})$$

$$D(\text{MIN})(t) \geq \sqrt[16]{D(\text{META})(t)}, \text{ LOGO :}$$

$$D(\text{MIN})(8760) \geq 99,95$$

A simulação do subsistema mostra que alguns equipamentos estão com disponibilidade inferior a 99,95 em 8760 horas. Sendo esses os equipamentos críticos do subsistema como mostra o resultado da simulação.

Para que o Primeiro Estágio apresente uma disponibilidade mínima de 99,25%, os equipamentos P-003511 A-E, F-003501 e P-003512 deverão ser otimizados.

Os demais equipamentos não serão otimizados por já apresentarem disponibilidades superiores ao valor necessário. Desta forma, a disponibilidade mínima para os equipamentos acima, considerando a disponibilidade dos demais equipamentos do subsistema será de 99,90 % para o período de 1 ano (8760 horas), devido ao fato de outros equipamentos apresentarem disponibilidade superior ao valor mínimo estimado como mostra a equação abaixo.

$$D(P-3511A-E)(t) \times D(F-3501)(t) \times D(P-3512)(t) = \frac{D(Meta)l(t)}{D(B-3504)(t) \times D(B-3504)(t) \times \dots \times D(V-3505)(t)}$$

$$D_{min}(t) = D(P-3511A-E)(t) = D(F-3501)(t) = D(P-3512)(t)$$

$$D_{min}(t) = \sqrt[7]{\frac{D(Meta)l(t)}{D(B-3504)(t) \times D(B-3504)(t) \times \dots \times D(V-3505)(t)}}$$

$$D_{min}(8760) = 0,9990$$

Podemos verificar a modelagem dos equipamentos em série e paralelo na figura 7 abaixo, considerando os equipamentos em paralelo como um componente em série.

O próximo passo é definir o MTTF e o MTTR dos equipamentos críticos, ou seja, com disponibilidade abaixo de 99,90 e simular o subsistema Primeiro Estagio para verificar se a disponibilidade atingida é de 99,25, ou seja, valor mínimo do subsistema. Assim utilizando um MTTF de 14 anos para os permutadores P-3511 A-F e MTTF de 10 anos para o F-3501 e um MTTF 13 anos para o permutador P-3512, mantendo o MTTR desses equipamentos constante, devido a impossibilidade de reduzir o tempo de reparo, conseguimos atingir uma disponibilidade de 99,73 no subsistema Primeiro Estagio, tendo todos os equipamentos disponibilidade maior que 99,90. Podemos verificar na equação abaixo o valor de MTTF para os equipamentos críticos.

$$D(P-11 A-F)(t) \cong \frac{MTTF(P-11 A-F)(t)}{MTTR(P-11 A-F)(t) + MTTF(P-11 A-F)(t)}$$

$$0,9990 \cong \frac{MTTF(P-11 A-F)(t)}{MTTR(P-11 A-F)(t) + 156}$$

$$MTTF(P-11 A-E)(t) - 0,9990 \times MTTF(P-11 A-E)(t) \cong 0,9990 \times 156$$

$$MTTF(P-11 A-E)(t) \cong 122640$$

4.2.3 – Otimização do 2º Estágio de HDS

Utilizando a metodologia de identificação dos subsistemas críticos podemos verificar que os equipamentos críticos são os permutadores e o forno devido a disponibilidades serem menor que 99,946 baseado na equação abaixo

$$Se, D(Meta)(t) \geq D(B-3503 A/B) \times D(P-3511 A) \times D(P-3511 B) \times \dots \times D(B-3509 A/B)$$

$$E, D(B-3503 A/B) = D(P-3511 A)$$

$$= D(P-3511 B) = \dots = D(B-3509 A/B) = D(MIN)$$

$$D(MIN)(t) \geq \sqrt[14]{D(META)(t)}, \text{ LOGO:}$$

$$D(MIN)(8760) \geq 99,95$$

A simulação do subsistema mostra que alguns equipamentos estão com disponibilidade inferior a 99,946 em 8760 horas. Sendo esses os equipamentos críticos do subsistema como mostra o resultado da simulação na tabela abaixo.

Para que o Segundo Estagio apresente uma disponibilidade mínima de 99,25%, os equipamentos P-003513 A-E, F-003502 e P-003514 devem sofrer aumento de disponibilidade.

Os demais equipamentos não serão melhorados por já apresentarem disponibilidades superiores ao valor necessário. Desta forma, a disponibilidade mínima para os equipamentos acima, considerando a disponibilidade dos demais equipamentos do subsistema será de 99,90 % para o período de 1 ano (8760 horas), devido ao fato de outros equipamentos apresentarem disponibilidade superior ao valor mínimo estimado como mostra a equação abaixo.

$$D(P-3513A-E)(t) \times D(F-3503)(t) \times D(P-3514)(t) = \frac{D(\text{Meta})(t)}{D(B-3503)(t) \times D(V-3508)(t) \times \dots \times D(V-3509)(t)}$$

$$D_{\min}(t) = D(P-3513A-E)(t) = D(F-3503)(t) = D(P-3514)(t)$$

$$D_{\min}(t) = \sqrt[7]{\frac{D(\text{Meta})(t)}{D(B-3503)(t) \times D(V-3508)(t) \times \dots \times D(V-3509)(t)}}$$

$$D_{\min}(8760) = 0,9990$$

O próximo passo é definir o MTTF e o MTTR dos equipamentos críticos, ou seja, com disponibilidade abaixo de 99,90 e simular o subsistema Segundo Estagio para verificar se a disponibilidade atingida é de 99,25. Assim, utilizando um MTTF de 14 anos para os permutadores P-3513 A-E, 15 anos para o F-3502 e um MTTF de 13 anos para o permutador P-3514, mantendo o MTTR desses equipamentos constante, devido a impossibilidade de reduzir o tempo de reparo, conseguimos atingir uma disponibilidade de 99,27 no subsistema Segundo Estagio, tendo todos os equipamentos disponibilidade maior que 99,90.

5 - Otimização da U-35

Após a melhoria dos subsistemas críticos, o próximo passo é verificar se o sistema foi otimizado com as melhorias de MTTF propostas. Na Tabela abaixo são mostrados os aumentos de MTTF para cada subsistema e seus componentes críticos, considerando a simulação no período de 1 ano com objetivo de verificar o nível de confiabilidade que deve ser mantido para atingir a meta em uma campanha, ou seja, em quatro anos. No quadro abaixo são mostradas as melhorias, os valores de disponibilidade, de confiabilidade, o MTTF e o MTTR utilizados no presente estudo, bem como os novos valores propostos (dados otimizados). Na situação proposta, foram mantidos os mesmos valores de tempos de reparo (MTTR) utilizados na análise, sendo otimizados apenas os valores de MTTF. Para variação dos valores de MTTR é necessário que seja feito um benchmarking de prática com os MTTR propostos para verificar a viabilidade dos tempos de reparos, considerando as restrições logísticas e econômicas, o que não foi feito por considerar os tempos de reparo utilizados representativos.

Otimização U -35									
Processo	Equip	Atual				Proposto			
		Disp	Confi	MTTF	MTTR	Disp	Confi	MTTF	MTTR
Shu	P-1,2,5,6,7,9	0,9979	0,889	7,5	156	0,999	0,945	15	156
1 STG reação	P-11	0,9984	0,889	7,5	156	0,999	0,932	14	156
	F-1	0,9914	0,61	2	156	0,9989	0,938	14	156
1 Stg separação	P-12	0,9984	0,889	7,5	120	0,999	0,932	13	120
2 Stg reação	F-2	0,9914	0,61	2	156	0,999	0,945	15	156
	P-13	0,9984	0,889	7,5	156	0,9991	0,938	14	156
2 Stg separação	P-14	0,9984	0,889	7,5	120	0,999	0,932	13	120

Tabela 10– Proposta de otimização de equipamentos

Os dados apresentados acima foram especificados para o tempo de 8760 horas, fazendo a simulação para o tempo de 4 anos a disponibilidade do sistema é de 96,51 conforme o solicitado pelo projeto. Os dados de reparo não foram otimizados considerando que expurgado o tempo logístico, os tempos de reparo já estão otimizados. Após a otimização, os subsistemas que mais impactam no sistema são os mesmos, mostrando a necessidade de acompanhamento desses equipamentos como mostra a tabela 11 abaixo.

Avaliando os resultados, considerando apenas a confiabilidade dos subsistemas verificamos que os mesmos subsistemas avaliados como críticos anteriormente continuam sendo os mais críticos em termos de impacto na confiabilidade do sistema, porém sem impactar na disponibilidade meta do sistema.

O disponibilidade ao longo da vida útil da Unidade de HDS é mostrada no quadro abaixo, atingindo a disponibilidade de 96,4, em vinte anos, considerando as paradas programadas a cada quatro anos e nesse caso os equipamentos ficaram

$$\begin{aligned} D(P-3513A-E)(t) \times D(F-3503)(t) \times D(P-3514)(t) &= \frac{D(\text{Meta})(t)}{D(B-3503)(t) \times D(V-3508)(t) \times \dots \times D(V-3509)(t)} \\ D_{\min}(t) = D(P-3513A-E)(t) = D(F-3503)(t) = D(P-3514)(t) \\ D_{\min}(t) &= \sqrt[7]{\frac{D(\text{Meta})(t)}{D(B-3503)(t) \times D(V-3508)(t) \times \dots \times D(V-3509)(t)}} \\ D_{\min}(8760) &= 0,9990 \end{aligned}$$

com 100% de restauração, ou seja, estado inicial de uso com se estivessem novos. Na verdade, muitos equipamentos são trocados, sendo viável essa premissa.

6 - Conclusões

As propostas de melhoria levaram em consideração a disponibilidade meta de projeto e as limitações em criar redundâncias devido a questões de segurança na planta, sendo utilizado uma metodologia que possibilitou identificar os subsistemas e componentes críticos e melhorar sua disponibilidade

As simulações foram feitas para um período de 1 ano (8760) devido às características dos componentes, possibilitando a definição da confiabilidade de cada componente para solicitação junto aos fornecedores. Esse cálculo considerou alterações apenas nos MTTF's, sendo necessário observar as possíveis reduções de MTTR considerando a viabilidade em função dos custos associados.

Não foi levado em consideração o custo das soluções propostas devido a falta de informação, porém essa informação possibilita a otimização do modelo via uma função objetiva de custo, com restrições de disponibilidade sendo necessário a criação de um modelo matemático. A solução apresentada considera que a disponibilidade do sistema será menor que a menor disponibilidade entre os subsistemas, dessa forma podem haver outras possíveis soluções para otimização. Nesse caso deve ser considerado a barreira tecnológica em relação a confiabilidade dos equipamentos.

Os objetivos do estudo foram alcançados, uma vez que os subsistemas e equipamentos críticos foram identificados e melhorados possibilitando a melhoria da disponibilidade como um todo segundo a metodologia proposta.

Referências

W. F. Schmitt, "Confiabilidade de Sistemas de Distribuição: Metodologias Cronológica e Analítica", Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Out./2002.

R. Billinton, e R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques", 1st Edition, Plenum Press, New York, 1983.

Glasstone, S., Laidler, K. J., and Eyring, H. E., *The Theory of Rate Processes*, McGraw Hill, NY, 1941.

Groebel, David, Mettas, Adamantios and Sun, Feng-Bin, Determination and Interpretation of Activation Energy Using Accelerated Test Data, 47th Reliability and Maintainability Symposium.

Kececioglu, Dimitri, and Sun, Feng-Bin, *Environmental Stress Screening - Its Quantification, Optimization and Management*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1995.

Kececioglu, Dimitri, and Sun, Feng-Bin, *Burn-In Testing - Its Quantification and Optimization*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1997.

Mettas, Adamantios, *Modeling & Analysis for Multiple Stress-Type Accelerated Life Data*, 46th Reliability and Maintainability Symposium.

ReliaSoft Corporation, *Life Data Analysis Reference*, ReliaSoft Publishing, Tucson, AZ, 2000. Also portions are published on-line at www.Weibull.com.

ReliaSoft Corporation, *Blocksim 6.0 Software Package*, Tucson, AZ, www.ReliaSoft.com.

ReliaSoft Corporation, *Weibull++ 6.0 Software Package*, Tucson, AZ, www.Weibull.com.