



Análise de Confiabilidade de Diferentes Alternativas de Geração de Vapor Através da Simulação por Eventos Discretos

**Priscila Dias Inácio
Thais Dutra de Moraes Pereira**

Projeto de Final de Curso

Orientadores

**Prof. Márcio Nele, D.Sc.
Ricardo Porto Cabete, Eng.**

Março de 2009

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO DE VAPOR ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS

Priscila Dias Inácio
Thais Dutra de Moraes Pereira

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Prof. Carlos Augusto G. Perlingeiro, D.Sc.

Prof. Caetano Moraes, Ph. D.

Prof. Mario Sergio O. Castro, Eng.

Orientado por:

Prof. Marcio Nele, D.Sc.

Ricardo Porto Cabete, Eng.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2009

Inácio, Priscila Dias e Pereira, Thais Dutra de Moraes.

Análise de Confiabilidade de Diferentes Alternativas de Geração de Vapor Através da Simulação por Eventos Discretos / Priscila Dias Inácio e Thais Dutra de Moraes Pereira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

vii, 68 p.; il.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009. Orientadores: Márcio Nele e Ricardo Porto Cabete.

1. Confiabilidade 2. Geração de Vapor 3. Pólo Petroquímico 4. Projeto Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Márcio Nele e Ricardo Porto Cabete. 6. Análise de Confiabilidade de Diferentes Alternativas de Geração de Vapor Através da Simulação por Eventos Discretos

“Nosso verdadeiro lugar de nascimento é aquele em que lançamos pela primeira vez
um olhar inteligente sobre nós próprios.”

Marguerite Yourcenar

“Muitas das coisas mais importantes do mundo foram conseguidas por pessoas que continuaram tentando quando parecia não haver mais nenhuma esperança de sucesso.”

Dale Carnegie

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos pais e avós por todo esforço dedicado à nossa educação, a fim de proporcionar um estudo de qualidade. Foram muitas palavras de incentivo, muito carinho, amor e compreensão nos momentos difíceis. Tudo que conquistamos devemos a vocês.

Agradecemos aos amigos da faculdade pelas incansáveis horas de estudo em grupo, pelo apoio mútuo quando nos sentíamos cansados e pelo incentivo quando algo não dava certo. Agradecemos também aos namorados, irmãos e amigos de infância pelo companheirismo, compreensão e incentivo ao longo de todos esses anos. As demonstrações constantes de carinho e respeito, mesmo nas horas mais difíceis, foram de suma importância para que chegássemos aqui.

Agradecemos a atenção e a boa vontade do professor Márcio Nele, que nos orientou nos estudos para a realização deste projeto.

Agradecemos à professora Sílvia por todo seu carinho e dedicação conosco e para com o projeto. Muito obrigada pelos momentos em que nos guiou, sempre com paciência e boa vontade, afim de tornar real a apresentação do projeto.

E finalmente agradecemos ao nosso amigo Ricardo Porto Cabete pelo constante aprimoramento dos conhecimentos em confiabilidade, pelo carinho, boa vontade e dedicação para o sucesso deste projeto.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO DE VAPOR ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS

No presente estudo a engenharia de confiabilidade foi aplicada em um sistema de geração de vapor para responder a uma questão que hoje surge normalmente na fase de projetos industriais: como escolher uma entre diferentes configurações alternativas de sistemas para exercer a mesma função. Foram propostas quatro configurações, com diferentes disposições de caldeiras e turbo geradores.

Plantas deste tipo, como unidades de geração de vapor, operam diariamente de forma contínua por longos períodos de tempo. Além disso, outra característica importante é o fato das mesmas poderem operar com carga reduzida. Sendo assim, o indicador de confiabilidade adequado para sistemas deste tipo é a eficiência produtiva, a qual é definida como sendo a razão entre a produção efetivamente realizada e a capacidade máxima de produção da unidade. Este parâmetro é um conceito importante para avaliar sistemas de produção que podem operar com carga variável e não apenas em estados de produção de 0 ou 100%.

Existem várias técnicas utilizadas para avaliação de confiabilidade, neste estudo optou-se por utilizar a técnica de Diagramas de Blocos. Esta fornece como resultado a confiabilidade do sistema, ou seja, a probabilidade de que o mesmo cumpra uma dada função em um tempo de missão especificado sem, no entanto, avaliar a sua capacidade de recuperação ou de operar com carga reduzida. Desta forma, torna-se necessário a utilização simultânea de outra técnica capaz de prover o indicador desejado.

Para isso foi utilizada a técnica de simulação por eventos discretos, pois esta permite calcular a eficiência produtiva da unidade, além de contemplar todas as nuances do sistema, tais como: a influência de perdas parciais, dos tempos de reparo, entre outras. Desta forma, a escolha da melhor configuração foi baseada na alternativa que apresentou a maior eficiência na produção da quantidade de vapor.

Das quatro configurações analisadas para o sistema de geração de vapor, a configuração que apresentou a maior eficiência produtiva foi a Alternativa 1, com 99,626%. De uma forma geral, pôde-se concluir que apesar da introdução de redundâncias nas outras alternativas, houve perda de eficiência produtiva devido principalmente a grande folga na capacidade produtiva da Alternativa 1 frente as demais Alternativas e ao aumento na quantidade e duração das manutenções preventivas. Cabe ressaltar que a Alternativa 1 foi considerada a melhor das alternativas, pois, além de apresentar a maior eficiência produtiva, este sistema é composto por apenas 3 caldeiras (enquanto os demais sistemas possuem 4) representando assim um menor custo de investimento na implantação do projeto.

Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | <i>Introdução</i> | 1 |
| 1.1 | Organização do projeto | 2 |
| 2 | <i>Engenharia de Confiabilidade</i> | 4 |
| 2.1 | Definição de Confiabilidade | 4 |
| 2.2 | Confiabilidade de um equipamento | 5 |
| 2.2.1 | Taxa de Falha..... | 6 |
| 2.2.2 | Tempo Médio até Falhar (Mean Time To Failure – MTTF)..... | 8 |
| 2.2.3 | Tempo Médio de Reparo (Mean Time To Repair – MTTR) | 8 |
| 2.3 | Confiabilidade de Sistemas | 10 |
| 2.3.1 | Diagrama de Blocos | 11 |
| 2.4 | Indicadores de Confiabilidade | 16 |
| 2.4.1 | Disponibilidade e Indisponibilidade | 16 |
| 2.4.2 | Eficiência Produtiva | 21 |
| 2.5 | Simulação por Eventos Discretos | 22 |
| 3 | <i>Estudo de Caso</i> | 27 |
| 3.1 | Definição da Unidade de Geração de Vapor | 27 |
| 3.2 | Programa de Simulação | 27 |
| 3.3 | Dados de Entrada do Programa | 30 |
| 3.4 | Premissas da Análise | 40 |
| 3.5 | Modelagem das Unidades | 41 |
| 4 | <i>Resultados obtidos</i> | 47 |
| 4.1 | Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 1 | 47 |
| 4.2 | Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 2 | 50 |
| 4.3 | Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 3 | 55 |
| 4.4 | Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 4 | 60 |
| 5 | <i>Conclusão</i> | 65 |
| 6 | <i>Referências Bibliográficas</i> | 67 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1-1- Organização do Projeto | 3 |
| Tabela 3-1 – Configurações das alternativas da Unidade de Geração de Vapor | 30 |
| Tabela 3-2 – Dados de falha e tempo de reparo por tipo de componente da Unidade de Geração de Vapor | 39 |
| Tabela 4-1 – Performance da Simulação para a Alternativa 1 | 47 |
| Tabela 4-2– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 1 | 49 |
| Tabela 4-3– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 1 ... | 50 |
| Tabela 4-4 – Performance da Simulação para a Alternativa 2 | 51 |
| Tabela 4-5– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 2 | 53 |
| Tabela 4-6– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 2 ... | 54 |
| Tabela 4-7 – Performance da Simulação para a Alternativa 3 | 55 |
| Tabela 4-8– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 3 | 57 |
| Tabela 4-9– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 3 ... | 58 |
| Tabela 4-10 – Performance da Simulação para a Alternativa 4 | 60 |
| Tabela 4-11– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 4 | 62 |
| Tabela 4-12– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 4 . | 63 |
| Tabela 5-1 - Resumo da Performance da Simulação da Unidade de Geração de Vapor | 65 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 – Curva da Banheira | 6 |
| Figura 2-2– Representação do tempo de reparo..... | 9 |
| Figura 2-3– Representação de MTTF e MTTR | 10 |
| Figura 2-4 – Diagrama de Blocos para um sistema em série com dois componentes. 12 | |
| Figura 2-5 – Diagrama de Blocos para um sistema em paralelo com dois componentes | 13 |
| Figura 2-6 – Comparação entre a confiabilidade de um sistema em série e de um sistema em paralelo..... | 14 |
| Figura 2-7 – Exemplo de sistema em série-paralelo | 14 |
| Figura 2-8 – Modularização do sistema em série-paralelo | 15 |
| Figura 2-9– Evolução temporal do estado de um componente não reparável..... | 18 |
| Figura 2-10 – Indisponibilidade de um componente testado periodicamente – expressão exata | 19 |
| Figura 2-11 – Evolução temporal do estado de um componente monitorado reparável | 20 |
| Figura 2-12 - Sorteio do tempo de falha por geração de números randômicos | 23 |
| Figura 2-13 - Sorteio do tempo de falha por geração de números randômicos | 24 |
| Figura 2-14 – Exemplificação de uma Simulação por Evento Discreto | 25 |
| Figura 3-1 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 1..... | 32 |
| Figura 3-2 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 2..... | 34 |
| Figura 3-3 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 3..... | 36 |
| Figura 3-4 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 4..... | 38 |
| Figura 3-5 - Diagrama de Blocos da alternativa 1 | 42 |
| Figura 3-6 - Diagrama de Blocos da alternativa 2 | 43 |
| Figura 3-7 - Diagrama de Blocos da alternativa 3 | 44 |
| Figura 3-8 - Diagrama de Blocos da alternativa 4 | 45 |
| Figura 4-1 – Histograma da Produção da Alternativa 1 | 48 |
| Figura 4-2 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 1 | 49 |
| Figura 4-3 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 1 ... | 50 |
| Figura 4-4 – Histograma da Produção da Alternativa 2..... | 52 |
| Figura 4-5 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 2 | 53 |
| Figura 4-6 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 2 ... | 54 |
| Figura 4-7 – Histograma da Produção da Alternativa 3..... | 56 |
| Figura 4-8 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 3 | 57 |
| Figura 4-9 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 3 ... | 58 |
| Figura 4-10 – Histograma da Produção da Alternativa 4 | 61 |
| Figura 4-11 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 4 | 62 |
| Figura 4-12 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 4 . | 63 |
| Figura 5-1 - Valores Comparativos da Eficiência Produtiva da Unidade de Geração de Vapor..... | 65 |

1 *Introdução*

Não há dúvidas de que o desejo de construir produtos que não falhem com muita frequência ou que possam ser rapidamente reparados em caso de falha não é recente, mas a origem histórica da Engenharia de Confiabilidade data apenas do início século XX, quando se utilizava uma rústica filosofia de avaliação de confiabilidade. Na época, um produto novo passava por um teste de desempenho quando já estava em fase final de acabamento, o que significava o re-projeto do mesmo caso não atingisse às expectativas.

Este enfoque não acompanhou por muito tempo as inovações e se tornava cada vez mais impraticável. Na medida em que não existia mais tempo hábil para realização dos re-projetos até que se atingissem as metas, o capital necessário de investimento também se multiplicava, já que os processos de produção ficavam cada vez mais caros, assim como os produtos finais.

Com o passar dos anos, aprimoramentos aconteciam e o conceito de confiabilidade se tornava parte fundamental do projeto do produto desde sua concepção inicial e seu valor passava a ser estatisticamente definido e calculado. Esta nova filosofia permitia a construção de sistemas muito mais complexos com um número de insucessos muito menor na fase de testes.

No presente estudo a engenharia de confiabilidade foi aplicada em um sistema de geração de vapor para responder a uma questão que hoje surge normalmente na fase de projetos industriais: como escolher uma entre diferentes configurações alternativas de sistemas para exercer a mesma função. Foram propostas quatro configurações, com diferentes disposições de caldeiras e turbo geradores.

Plantas deste tipo, como unidades de geração de vapor, operam diariamente de forma contínua por longos períodos de tempo. Além disso, outra característica importante é o fato das mesmas poderem operar com carga reduzida, ou seja, um sistema composto por duas caldeiras, com capacidade de 600 t/h cada, por exemplo, deve fornecer 1200 t/h de vapor para seus consumidores. No entanto, em caso de falha de uma das caldeiras, o sistema ainda é capaz de prover 50% da necessidade dos seus consumidores.

Sendo assim, o indicador de confiabilidade adequado para sistemas deste tipo é a eficiência produtiva, a qual é definida como sendo a razão entre a produção efetivamente realizada e a capacidade máxima de produção da unidade. A eficiência

produtiva depende da confiabilidade dos componentes (frequência de falha dos vários componentes), da configuração dos sistemas (nível de redundância) e da manutenibilidade (tempo médio de reparo dos componentes e tempo médio de recuperação da função).

As técnicas mais comuns para avaliação de confiabilidade fornecem como resultado a confiabilidade do sistema, ou seja, a probabilidade de que o mesmo cumpra uma dada função em um tempo de missão especificado sem, no entanto, avaliar a sua capacidade de recuperação ou de operar com carga reduzida. Desta forma, torna-se necessário a utilização simultânea de outra técnica capaz de prover o indicador desejado.

Para isso foi utilizada a técnica de simulação por eventos discretos, pois esta permite calcular a eficiência produtiva da unidade, além de contemplar todas as nuances do sistema, tais como: a influência de perdas parciais, dos tempos de reparo, entre outras.

Em função do exposto acima, a escolha da melhor configuração foi baseada na alternativa que apresentou a maior eficiência na produção da quantidade de vapor e na que exigiu menor custo de instalação.

1.1 Organização do projeto

O presente projeto foi estruturado em seis capítulos, conforme apresentado na Tabela 1-1. Este Capítulo 1 é introdutório e descreve a evolução da Engenharia de Confiabilidade. No Capítulo 2 são definidos os conceitos de confiabilidade relevantes para o bom entendimento do estudo. O caso a ser estudado é apresentado no Capítulo 3. No Capítulo 4 encontram-se detalhados os resultados obtidos na análise das configurações e, finalmente, no Capítulo 5 estão as conclusões obtidas nesse projeto. O Capítulo 6 contempla as referências bibliográficas.

Tabela 1-1- Organização do Projeto

| ÍTEM | DESCRIÇÃO |
|-------------|------------------------------|
| CAPÍTULO 1 | Introdução |
| CAPÍTULO 2 | Engenharia de Confiabilidade |
| CAPÍTULO 3 | Estudo de Caso |
| CAPÍTULO 4 | Resultados Obtidos |
| CAPÍTULO 5 | Conclusões |
| CAPÍTULO 6 | Referências Bibliográficas |

2 Engenharia de Confiabilidade

A aplicação de técnicas de engenharia de confiabilidade constitui uma ferramenta poderosa de auxílio a processos de tomada de decisão no que se refere à escolha de configurações de sistemas, bem como no estabelecimento de metas para os sistemas individuais e para os equipamentos que os compõem. Quanto mais cedo essas técnicas forem aplicadas, mais significativos serão os benefícios. O presente estudo invoca uma questão que surge normalmente durante a fase de projetos industriais: A escolha dentre diferentes configurações alternativas para uma mesma função. A análise de confiabilidade é a ferramenta ideal para responder a tal questão. Apesar de certamente confiabilidade não ser o único fator a ser considerado, é uma solução bem fundamentada e racional, do ponto de vista da otimização da relação custo-eficiência, que dificilmente pode ser conseguida sem a realização de uma análise de confiabilidade.

2.1 Definição de Confiabilidade

A Confiabilidade representa a probabilidade de que um sistema, subsistema ou componente desempenhe com sucesso suas funções específicas, durante um período de tempo determinado, chamado tempo de missão, e sob condições também especificadas.

A confiabilidade de um componente pode ser expressa pela Equação 2.1^[6]:

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (2.1)$$

Adotando-se a premissa de que todos os componentes de um sistema de geração de vapor utilizam modelo de taxa de falhas constante, o valor da confiabilidade de um componente para uma missão de duração igual a t , como demonstrado anteriormente, é ^[6]:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

onde λ é a taxa de falhas do componente. Além da consideração de taxa de falha constante com o tempo, considera-se que o componente está funcionando perfeitamente no início da missão, ou seja ^[6]:

$$R(t = 0) = 1 \quad (2.3)$$

Considerando-se que cada missão somente pode apresentar dois resultados – sucesso ou falha – então, é possível definir uma “não confiabilidade” como a probabilidade de ocorrência de uma falha durante a missão, de forma que pode-se escrever ^[6]:

$$P(t) = 1 - R(t) \quad (2.4)$$

Substituindo-se na equação acima a $R(t)$ apresentada na Eq.(2.2), obtém-se:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

O tempo de duração da missão para a qual é avaliada a confiabilidade deve ser explicitamente indicado, pois um mesmo equipamento possui valores distintos de confiabilidade para missões com diferentes tempos de duração, sendo menor para durações mais longas.

Além do tempo de duração é de suma importância indicar claramente as condições de operação, uma vez que o mesmo equipamento pode ter valores de confiabilidade distintos dependendo das condições de operação a que está submetido. Condições operacionais como temperatura, umidade, pressão, choque, vibração, voltagem, torque, atmosfera corrosiva e outros, podem causar grandes impactos sobre o desempenho dos equipamentos.

2.2 Confiabilidade de um equipamento

As técnicas utilizadas para a avaliação da confiabilidade de um sistema com uma determinada missão de duração conhecida utilizam os valores das confiabilidades de seus equipamentos. Como o objetivo deste trabalho é analisar qual configuração alternativa do sistema de geração de vapor que fornece o maior valor do indicador de confiabilidade eficiência produtiva, necessitamos, antes de tudo, avaliar a confiabilidade de cada componente, ou seja, a sua probabilidade de cumprir a referida missão sem sofrer qualquer falha. Tais definições são descritas nos itens a seguir.

2.2.1 Taxa de Falha

A taxa de falha representa o número estatisticamente esperado de falhas do componente por unidade de tempo. Onde a falha pode ser definida como uma não conformidade de um critério de desempenho definido, como a interrupção da função de um item ou como a incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto.

O parâmetro λ pode ser obtido através de consulta aos fabricantes, a banco de dados especializados ou obtido a partir da coleta e análise de dados operacionais, e é característico de cada tipo de componente.

A taxa de falha de um componente varia de acordo com a idade do equipamento segundo a chamada Curva da Banheira (Figura 2-1). Ela representa o comportamento ao longo da sua vida sendo construída a partir de estudos estatísticos.

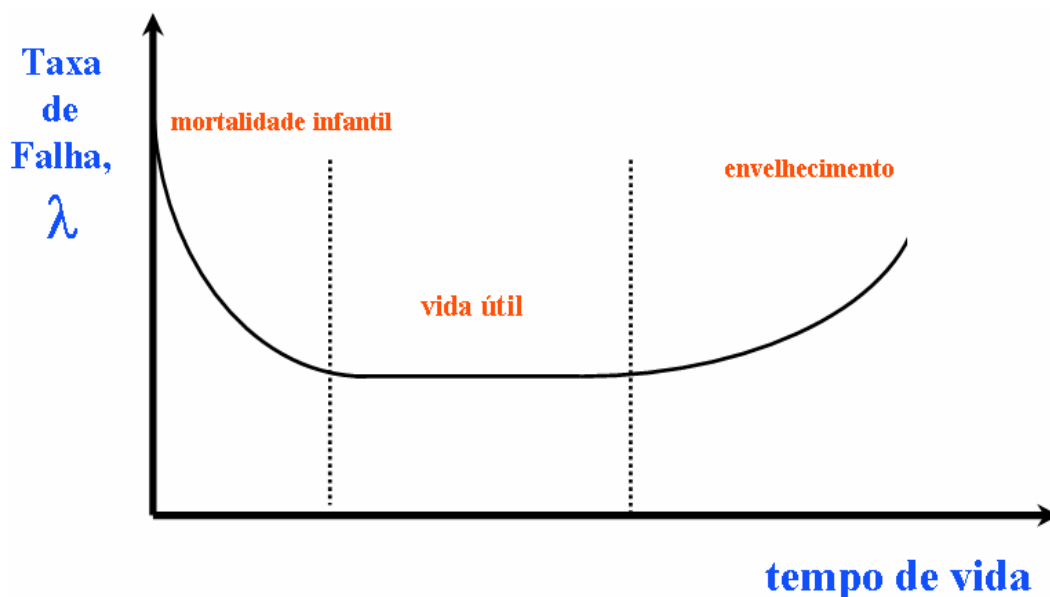


Figura 2-1 – Curva da Banheira

O modelo divide a vida operacional de um produto em três estágios:

- *Estágio A – amaciamento ou mortalidade infantil*

Neste estágio o componente apresenta uma taxa de falha alta, mas decrescente com o tempo. É o estágio onde ocorrem as falhas causadas por defeitos de projeto, fabricação, construção ou montagem. Esse estágio pode ser minimizado através da adoção de projetos robustos de produto, práticas de controle de qualidade na

manufatura, onde se testam as unidades em condições normais de uso por período de tempo suficiente para que defeitos precoces sejam detectados e corrigidos antes das falhas.

- *Estágio B - vida útil*

Neste estágio, a taxa de falhas tem um comportamento relativamente estável no tempo. As falhas ocorrem devido a uma combinação de inúmeros fatores aleatórios e, portanto, menos controláveis, como aumentos na temperatura e umidade e fadiga por sobrecarga durante a operação normal das unidades. Esse estágio se caracteriza pela dificuldade de predição.

- *Estágio C – desgaste ou envelhecimento*

O terceiro estágio da curva da banheira é caracterizado por uma taxa de falhas que aumenta rapidamente com o tempo de vida do componente. As falhas passam a ocorrer com maior frequência decorrente do desgaste natural (atrito, corrosão), que será tanto maior quanto mais o tempo passa. Neste período, o componente se deteriora rapidamente. Uma das alternativas utilizadas para amenizar a intensidade do envelhecimento é a realização de projetos de produtos com componentes e materiais mais duráveis.

Na grande parte das análises quantitativas, a adoção de uma taxa de falhas constante com o tempo fornece uma aproximação satisfatória da confiabilidade dos componentes avaliados. Isso ocorre porque, na maioria dos casos, os sistemas de controle de qualidade da indústria moderna contribuem eficazmente para a eliminação das falhas típicas do estágio de amaciamento. Além disso, as funções básicas de manutenção dos equipamentos praticadas nas indústrias atuais englobam as práticas de parada programada e corretiva com o objetivo de manter o componente sempre operando dentro das condições de vida útil, ou seja, procurando retardar a fase de crescimento acelerado da taxa de falhas do componente, caracterizada pelo estágio de desgaste.

A utilização do modelo de taxa de falhas constante com o tempo representa uma considerável simplificação das equações de cálculo e uma redução significativa do volume de dados necessários para a solução dos problemas.

2.2.2 Tempo Médio até Falhar (Mean Time To Failure – MTTF)

O caráter probabilístico da confiabilidade de um componente está diretamente relacionado ao comportamento aleatório de uma variável: o tempo de funcionamento sem falhas do componente, ou seja, o tempo decorrido desde o início de seu funcionamento até o instante de ocorrência da sua falha. Em termos probabilísticos pode-se dizer que a variável aleatória segue uma distribuição de probabilidade exponencial. Assim, pode-se dizer que o tempo médio até falhar, MTTF (do inglês Mean Time To Failure), é o tempo médio esperado de operação do sistema antes da ocorrência da primeira falha.

Considerando N sistemas idênticos colocados em operação a partir do tempo $t=0$, o tempo de operação t_i de cada um é medido até apresentar o primeiro defeito. O MTTF é o tempo médio de operação^[7].

$$MTTF = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N} \quad (2.6)$$

Para o caso em que se considera o modelo de taxa de falhas constante com o tempo, encontra-se a seguinte relação^[7]:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.7)$$

Assim, com o valor do MTTF pode-se calcular a taxa de falhas do componente a partir da Equação 2.7.

2.2.3 Tempo Médio de Reparo (Mean Time To Repair – MTTR)

O tempo médio de reparo, MTTR (do inglês, Mean Time To Repair), corresponde ao valor médio da variável aleatória “tempo de reparo”. No caso de um componente que possua somente dois estados de interesse, funcionando e falho, chamamos de “falha” a transição do estado funcionando para o estado falho e de “reparo” à transição no sentido inverso. Podemos representar essas duas transições através do diagrama mostrado na Figura 2-2.

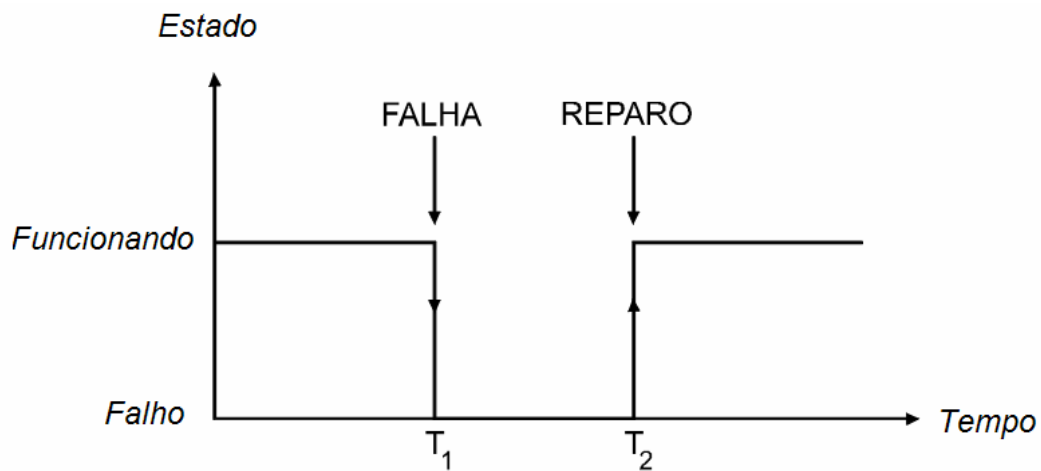


Figura 2-2– Representação do tempo de reparo

Para o componente representado na Figura 2-2, podemos dizer que o mesmo falhou em T₁ e foi reparado em T₂. O intervalo entre T₁ e T₂ é chamado tempo de reparo (Time to Repair). Define-se uma taxa de reparos, μ , que representa o número de transições de reparo por unidade de tempo.

Desta forma, é possível definir a probabilidade ($G(t)$) de um componente que falhou em $t=0$, permanecer no estado falho até o tempo t . Esta definição é o análogo da confiabilidade para a transição de reparo, podendo ser chamada de probabilidade de não ocorrência de reparo até o tempo t , tal qual a confiabilidade é a probabilidade de não ocorrência de uma falha até o instante t .

Assim, para todas as expressões envolvendo taxa de falha, existe uma análoga com a taxa de reparo. Por exemplo^[7]:

$$G(t) = e^{-\mu t} \quad (2.8)$$

$$\tau = \frac{1}{\mu} \quad (2.9)$$

onde τ é o tempo médio de reparo. O tempo de reparo segue uma distribuição exponencial. O MTTR representa a duração do tempo em que o sistema não foi capaz de prestar serviços. A redução do MTTR para um sistema é um passo importante na melhoria da atividade e nos níveis de serviço.

O MTTR constitui o parâmetro mais fundamental para a expressão quantitativa da manutenibilidade de um equipamento. A manutenibilidade é caracterizada pela facilidade com que reparos ou outros trabalhos de manutenção podem ser realizados

em um equipamento, ou seja, um componente rapidamente reparável ou de fácil manutenção certamente terá um MTTR baixo.

Na ilustração apresentada na Figura 2-3, podemos encontrar uma relação entre MTTF e MTTR.

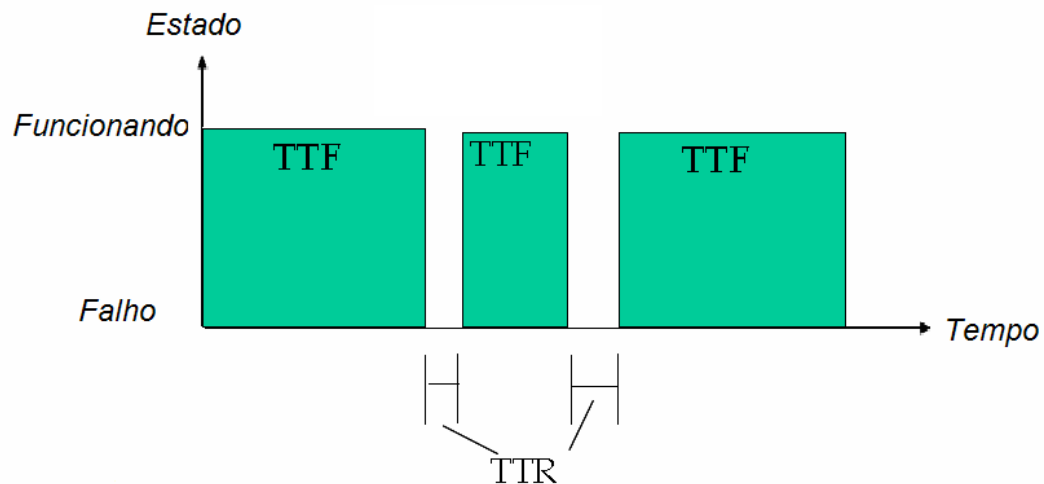


Figura 2-3– Representação de MTTF e MTTR

TTF = Tempo até Falhar

MTTF = Valor Médio dos TTF

TTR = Tempo de Reparo

MTTR = Valor Médio dos TTR

2.3 Confiabilidade de Sistemas

Um sistema compreende um conjunto de componentes que se relacionam logicamente, sendo assim a avaliação quantitativa da confiabilidade é tipicamente um processo de síntese das confiabilidades dos seus componentes.

Como cada sistema possui suas particularidades, torna-se muito complicado a obtenção de taxas de falha comuns para sistemas específicos, isto é, não é possível obter uma única taxa de falha para qualquer sistema de geração de vapor, por exemplo. Logo, é necessário realizar a análise de confiabilidade de cada componente em cada sistema. Para isso, é fundamental que se consiga modelar corretamente o relacionamento lógico entre os componentes, de forma a sintetizar os atributos de confiabilidade do sistema.

Existem várias técnicas utilizadas para a modelagem do relacionamento lógico dos componentes de um sistema, neste estudo foi utilizada a técnica de Diagrama de Blocos, na qual a modelagem é voltada para o sucesso (confiabilidade do sistema).

2.3.1 Diagrama de Blocos

O diagrama de blocos é uma representação do arranjo lógico existente entre o funcionamento dos vários componentes, a fim de fornecer uma indicação dos vários modos de funcionamento do sistema. Esta técnica identifica os principais elementos de cada sistema e os relacionamentos entre estes através de configurações em série ou paralelo.

Na técnica de diagrama de blocos, um sistema é constituído por blocos funcionais que são interligados de forma a realizar um conjunto de funções com desempenho e medidas de confiabilidade aceitáveis. Os blocos funcionais podem representar componentes individuais ou sistema, dependendo das condições estabelecidas para a realização do estudo. Os tipos de componentes utilizados, sua qualidade e a forma em que estão arranjados têm efeito direto no desempenho do sistema e na sua confiabilidade.

Durante a determinação do arranjo estrutural, é de suma importância estabelecer os componentes do sistema que devem ser incluídos na análise e o nível de detalhe em que esses componentes serão representados. Este último item depende das informações disponíveis sobre a confiabilidade de suas partes componentes e dos objetivos do estudo.

Entretanto, neste tipo de modelagem é comum a utilização de recursos lógicos que por sua vez podem não corresponder à visualização física do sistema, ou seja, nem sempre a representação lógica coincide com a representação física do sistema. Tais recursos, entretanto, são extremamente importantes, pois permitem simular corretamente a função do sistema.

2.3.1.1 Confiabilidade de Sistemas em Série

Um sistema está em série quando o funcionamento de todos os seus componentes é vital para o funcionamento do sistema. Neste caso, a falha de um único componente, já é suficiente para causar a falha do sistema. Portanto, o sucesso do sistema durante a missão de duração t requer o funcionamento de todos os componentes durante o mesmo período.

Um sistema constituído de dois componentes em série, cujas taxas de falha são λ_1 e λ_2 , é representado pelo diagrama de blocos indicado na Figura 2-4.

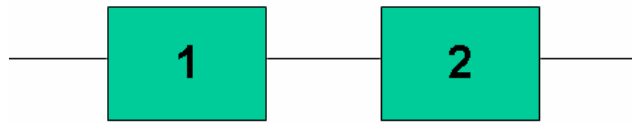


Figura 2-4 – Diagrama de Blocos para um sistema em série com dois componentes

Tendo em vista que para que ocorra o sucesso do sistema durante o tempo de missão é necessário que ocorra o sucesso do Componente 1 e o sucesso do Componente 2, então podemos escrever a Equação 2.10^[9].

$$R_{SS}(t) = R_1(t) \times R_2(t) \quad (2.10)$$

onde ^[9]:

$$R_1(t) = e^{-\lambda_1 t} \quad (2.11)$$

$$R_2(t) = e^{-\lambda_2 t} \quad (2.12)$$

Portanto, a confiabilidade de um sistema em série com dois componentes pode ser escrita da seguinte maneira ^[9]:

$$R_{SS}(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (2.13)$$

Generalizando para um sistema de n componentes em série, obtemos ^[9]:

$$R_{SS}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) dt = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t} \quad (2.14)$$

O MTTF para esse sistema é dado por ^[9]:

$$MTTF_{SS} = \int_0^{\infty} R_{SS}(t) dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2.15)$$

Pela equação 2.15 percebe-se que aumentando o número de componentes num sistema em série, o MTTF diminui, ou seja, o sistema tende a falhar mais cedo.

2.3.1.2 Confiabilidade de Sistemas em Paralelo

Um sistema está em paralelo quando todos os componentes em paralelo devem falhar para que o sistema falhe. O diagrama de blocos de um sistema constituído de dois componentes em paralelo, cujas taxas de falha são λ_1 e λ_2 , está indicado na Figura 2-5.

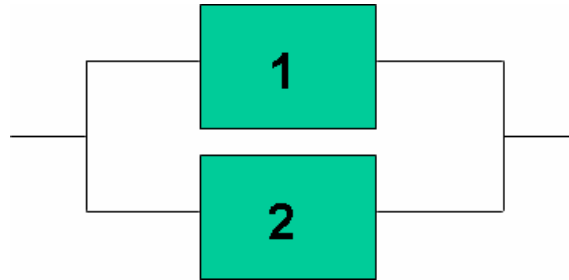


Figura 2-5 – Diagrama de Blocos para um sistema em paralelo com dois componentes

A confiabilidade do sistema até o instante t é dada por ^[9]:

$$R_{SP}(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t) \quad (2.16)$$

Ou ainda ^[9]

$$R_{SP}(t) = 1 - [1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)] \quad (2.17)$$

Substituindo as Equações 2.11 e 2.12 na Equação 2.17, obtemos a Equação 2.18 ^[9].

$$R_{SP}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.18)$$

Generalizando, para um sistema de n componentes em paralelo, obtemos a Equação 2.19 ^[9].

$$R_{SP}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (2.19)$$

O MTTF para este sistema pode ser obtido integrando-se por partes a Equação 2.19. Para um sistema com dois componentes em paralelo, o MTTF é dado por ^[9]:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (2.20)$$

A Figura 2-6 mostra uma comparação entre a confiabilidade de um sistema em série e a confiabilidade de um sistema em paralelo, ambos constituídos por dois componentes idênticos e independentes com taxas de falha constantes e iguais a λ .

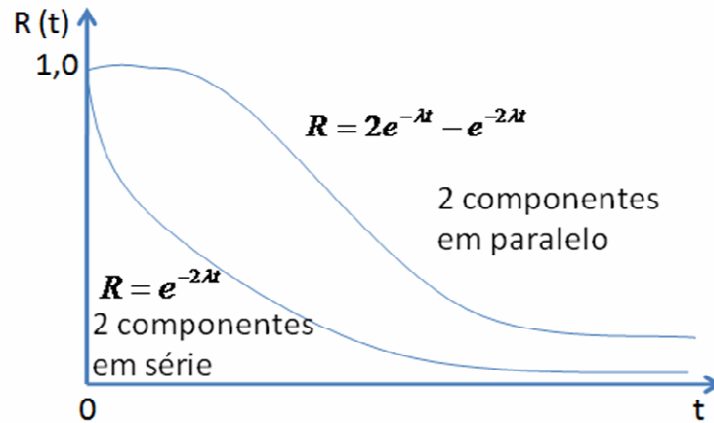


Figura 2-6 – Comparação entre a confiabilidade de um sistema em série e de um sistema em paralelo

Como era de se esperar, a confiabilidade do sistema em paralelo é muito superior a do sistema em série, notadamente para tempos de missão não muito longos.

2.3.1.3 Confiabilidade de Sistemas Série-Paralelo

As regras de avaliação da confiabilidade de sistemas em série e de sistemas em paralelo podem ser utilizadas para avaliar a confiabilidade de um sistema que contém misturas de arranjos em série e em paralelo. O diagrama de blocos que representa este sistema está indicado na Figura 2-7.

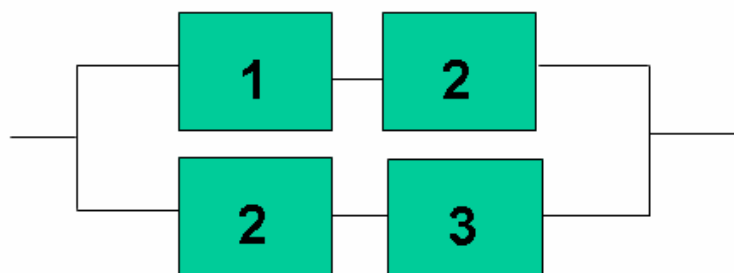


Figura 2-7 – Exemplo de sistema em série-paralelo

Existem vários métodos que podem ser utilizados pra se avaliar a confiabilidade de um sistema desse tipo, onde o mais utilizado é o chamado “Método da Modularização”. Tal método consiste em se dividir o sistema em módulos em série ou em paralelo e se

utilizar as regras de cada sistema. No caso do sistema da Figura 2-7, o mesmo poderia ser representado por um arranjo em paralelo de dois módulos M1 e M2, formados por dois elementos em série cada, conforme mostrado na Figura 2-8.

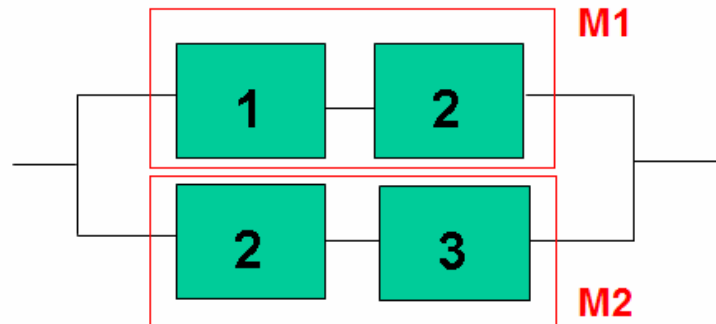


Figura 2-8 – Modularização do sistema em série-paralelo

A confiabilidade de cada módulo pode ser avaliada utilizando-se a expressão da confiabilidade de um sistema em série (Eq. 2.20), ou seja ^[10]:

$$R_{M1}(t) = R_1(t) \times R_2(t) \tag{2.21}$$

e ^[10]

$$R_{M2}(t) = R_3(t) \times R_4(t) \tag{2.22}$$

Como os dois módulos estão arranjados em paralelo entre si, então, a confiabilidade do sistema pode ser avaliada utilizando-se a Eq.2.16, ou seja ^[10]:

$$R_S(t) = R_{M1}(t) + R_{M2}(t) - R_{M1}(t) \cdot R_{M2}(t) \tag{2.23}$$

Substituindo-se as expressões de R_{M1} e R_{M2} na equação acima, chega-se a ^[10]:

$$R_S(t) = R_1(t) \times R_2(t) + R_3(t) \times R_4(t) - R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times R_4(t) \tag{2.24}$$

Substituindo-se as expressões da confiabilidade de cada componente na equação acima, chega-se a ^[10]:

$$R_S(t) = e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} \times e^{-\lambda_4 t} - e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 t} \times e^{-\lambda_3 t} \times e^{-\lambda_4 t} \tag{2.25}$$

O Método da Modularização é genérico, podendo ser usado em qualquer sistema que possa ser representado por módulos em série e em paralelo. No entanto, a sua aplicação, como explicada acima, somente é correta se os módulos forem todos independentes entre si.

2.4 Indicadores de Confiabilidade

Existem outras formas de expressar a noção de confiabilidade de um item além das definições apresentadas anteriormente, que dependem exclusivamente do objetivo da análise que estiver sendo realizada. Em consequência, os resultados de um estudo de confiabilidade podem ser expressos de formas distintas, que são apresentadas a seguir.

2.4.1 Disponibilidade e Indisponibilidade

A capacidade de um item estar em condições de executar uma função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados é chamado de Disponibilidade ($A(t)$, do inglês Availability).

A Disponibilidade instantânea de um equipamento pode ser definida como a probabilidade de que o mesmo funcione com sucesso no instante em que for requerido (ou demandado). Como ocorre, por exemplo, no caso de um sistema de proteção ou intertravamento.

A Disponibilidade média de um equipamento em um determinado período de tempo é a fração do período durante o qual o componente funciona com sucesso. Por exemplo, em sistemas que operam continuamente.

Portanto, quando o objetivo da análise é saber a probabilidade de que um dado equipamento funcione no instante em que for necessário o indicador de interesse é a disponibilidade instantânea. No caso em que se queira determinar qual fração de um dado período de tempo no qual o equipamento estará operacional, o indicador de interesse é a disponibilidade média no período.

Muito usados, na solução de problemas práticos, têm sido os conceitos de disponibilidade média no intervalo de tempo T e disponibilidade estacionária ou assintótica, definidos, respectivamente, por ^[12]:

$$A_{med}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.26)$$

$$A_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (2.27)$$

Para um componente ou sistema que tenha somente dois estados possíveis, *funcionando* ou *falho*, pode-se definir sua indisponibilidade, $Q(t)$, como ^[12]:

$$Q(t) = 1 - A(t) \quad (2.28)$$

ou seja, a indisponibilidade é o complemento da sua disponibilidade.

Indisponibilidade instantânea é a probabilidade de um item não ser capaz de desempenhar uma função requerida sob dadas condições, em um dado instante, supondo-se que os recursos externos tenham sido providos.

Indisponibilidade média é a média da indisponibilidade instantânea durante um dado intervalo de tempo.

Existem três tipos de componentes de interesse em análise de indisponibilidade de sistemas:

- *Componentes Não-reparáveis*

Os componentes não-reparáveis também são denominados componentes sujeitos a mudanças de estado irreversíveis. São componentes que começam no estado Funcionando e em determinado instante sofrem uma transição do estado Falho e permanecem neste último estado durante todo o restante do tempo de interesse da análise. O gráfico da não confiabilidade (probabilidade de falha) de um componente deste tipo é mostrado na Figura 2-9:

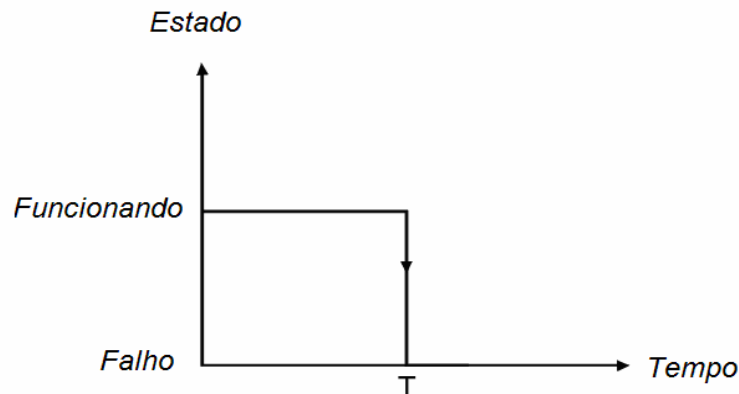


Figura 2-9– Evolução temporal do estado de um componente não reparável

Se o componente sofrer uma falha antes de chegar a t , então, pode-se garantir que estará no estado falho em t (portanto, indisponível), pois não pode ser reparado após a falha. Assim, pode-se escrever^[12]:

$$Q(t) = P(t) \quad (2.29)$$

Portanto, da equação 2.5 define-se, para componentes não reparáveis^[12]:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.30)$$

Cabe ressaltar que a condição de “não reparabilidade” é uma condição imposta pelo tipo de análise que está sendo realizada e não uma característica intrínseca do componente. É importante observar que quando se fala em reparo do componente, tal expressão não se limita simplesmente à possibilidade de recuperação da condição operacional do mesmo o qual sofreu a falha, mas principalmente, à capacidade de restauração da função que estava sendo exercida antes da falha, mesmo que isto implique na substituição física do componente por outro semelhante de mesma confiabilidade.

- *Componentes Testados Periodicamente*

Este é o caso típico de componentes de sistemas de segurança, os quais não operam durante a maior parte do tempo, sendo demandados em caso de uma contingência. Estes tipos de componentes também são denominados componentes sujeitos a mudanças de estado parcialmente reversíveis. Eles estão sujeitos a falhas ocultas e devem ser testados periodicamente para se garantir a sua confiabilidade. Durante o período em que o sistema está inativo os seus componentes estão em uma condição

semelhante à de componentes não reparáveis, isto é, se sofreram uma falha esta não será reparada, pois não é possível reparar o sistema sem saber que o mesmo está falho.

Assim, se nada for feito, a avaliação da indisponibilidade do sistema segue a mesma evolução temporal dos componentes não reparáveis. Em pouco tempo, o sistema estaria completamente indisponível devido a falhas não reveladas dos seus componentes. Para evitar este crescimento contínuo da indisponibilidade, tais sistemas são submetidos a testes periódicos, para que se possa conhecer seu estado real e reparar os componentes cujas falhas tenham ocorrido. A prática de realização de testes periódicos em sistemas de proteção é, portanto, fundamental para a garantia da disponibilidade deste tipo de sistema, contribuindo para manter a frequência de acidentes na instalação dentro de padrões aceitáveis.

Seja um componente de um sistema de proteção submetido a testes periódicos nos instantes de tempo θ , 2θ , 3θ , etc. Considerando que uma falha do componente somente pode ser detectada no instante de cada teste, então pode-se dizer que durante os intervalos entre testes, tudo se passa como se o componente fosse não reparável e, portanto, a sua indisponibilidade seria igual a sua não confiabilidade em cada instante do tempo. A Figura 2-10 ilustra um gráfico da indisponibilidade, $Q(t)$, em função do tempo, onde se encontra a representação gráfica da expressão exata da indisponibilidade.

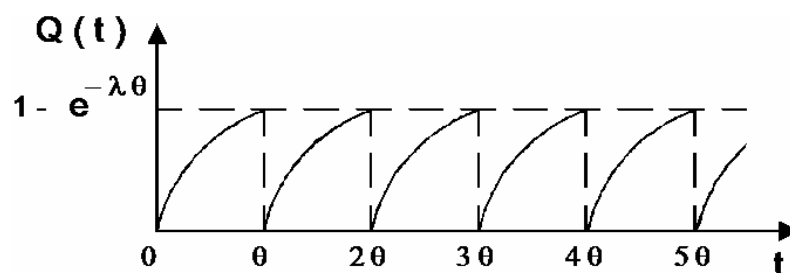


Figura 2-10 – Indisponibilidade de um componente testado periodicamente – expressão exata

Desta forma, para um determinado intervalo entre testes, pode-se escrever ^[12]:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.31)$$

$$Q_{med}(\theta) = 1 - \frac{1}{\lambda\theta} (1 - e^{-\lambda\theta}) \quad (2.32)$$

Tendo em vista que os intervalos entre testes são iguais, então a indisponibilidade média do componente em um período de tempo qualquer que englobe um número exato de intervalos entre testes será igual à calculada para um único intervalo.

- *Componentes Reparáveis*

Os componentes reparáveis são os componentes para os quais toda falha é detectada no instante de sua ocorrência e imediatamente após é iniciado um processo de restauração (reparo ou substituição) do componente afetado. Estes componentes também são conhecidos como componentes sujeitos a mudanças de estado reversíveis. Na prática, esta situação é usada para modelar componentes que operem continuamente e possuam um alto grau de monitoração, como os equipamentos que compõe as alternativas deste projeto. A evolução temporal do estado de um componente deste tipo é mostrada na Figura 2-11.

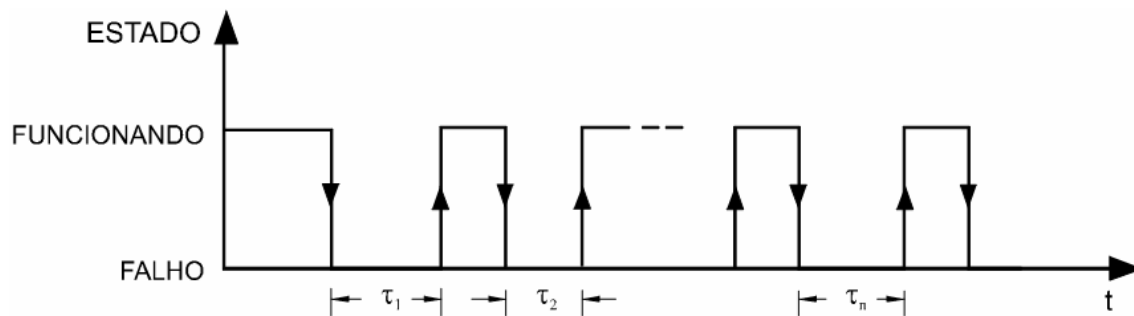


Figura 2-11 – Evolução temporal do estado de um componente monitorado reparável

Considerando um componente reparável, com taxa de falhas λ e taxa de reparos μ , ambas consideradas constantes, pode-se mostrar que a sua indisponibilidade instantânea é dada por ^[12]:

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}] \quad (2.33)$$

Aplicando-se as Equações 2.26 e 2.27 para a indisponibilidade, obtém-se ^[12]:

$$Q_{med}(T) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 T} [1 - e^{-(\lambda + \mu)T}] \quad (2.34)$$

$$Q_{\infty} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.35)$$

Da Equação 2.9 percebe-se que a taxa de reparo é o inverso do tempo médio de reparo, portanto, a Equação 2.35 pode ser reescrita como ^[12]:

$$Q_{\infty} = \frac{\lambda\tau}{1 + \lambda\tau} \cong \lambda\tau \text{ se } \lambda\tau \ll 1 \quad (2.36)$$

onde $\lambda\tau$ é a taxa de falha vezes o tempo de reparo.

Sabendo-se que:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (2.37)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (2.38)$$

Substituindo as Equações 2.37 e 2.38 na equação 2.36, é possível obter uma expressão alternativa para Q_{∞} muito citada na literatura ^[12]:

$$Q_{\infty} = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} \quad (2.39)$$

Embora conceitualmente as equações acima se refiram à indisponibilidade assintótica, a indisponibilidade média de um componente reparável converge rapidamente para o valor assintótico à medida que aumenta o intervalo t usado para se obter a média. Assim, para fins práticos, as equações acima podem ser utilizadas como aproximações da indisponibilidade média.

2.4.2 Eficiência Produtiva

A Eficiência Produtiva é um dos principais indicadores de desempenho para comparação entre diferentes configurações alternativas de um sistema para realizar uma mesma função. Ela depende da confiabilidade dos componentes (frequência de falha dos vários componentes), da configuração dos sistemas (nível de redundância) e da manutenibilidade (tempo médio de reparo dos componentes e tempo médio de recuperação da função).

Atualmente a eficiência produtiva é conceito é o mais utilizado para sistemas de produção que podem operar com carga variável e não apenas em estados de produção de 0 ou 100%.

Particularmente para sistemas que operam continuamente durante 24 horas por dia por longos períodos, como é o caso de um sistema de geração de vapor, tal indicador é de suma importância. Este tipo de sistema tem alta disponibilidade e grande eficiência produtiva, que são fatores fundamentais para a competitividade de uma unidade, pois uma parada forçada representa perdas elevadas devido a interrupção do processo, altos custos de manutenção e atraso na entrega dos produtos, o que gera uma redução no lucro e insatisfação dos clientes.

A eficiência produtiva média ao longo da vida útil do sistema (ou em qualquer intervalo de interesse) é avaliada pela relação entre a produção efetivamente conseguida no período e a produção requerida ou demandada prevista, ou seja ^[11]:

$$\text{Eficiência Produtiva} = \frac{\text{Produção Realizada}}{\text{Produção Potencial}} \times 100\% \quad (2.40)$$

A perda de produção é igual à produção requerida menos à produção realizada ao longo do ano ou da vida útil de cada unidade.

2.5 Simulação por Eventos Discretos

Um evento pode ser definido como uma ocorrência fundamental na vida de um sistema e determina sua habilidade de obter com sucesso um produto desejado. Os eventos, contemplados neste estudo como distribuições de falha e de reparo, são obtidos usando técnicas de amostragem aleatória.

Uma simulação por eventos discretos é uma modelagem do comportamento dinâmico de todo o sistema através da descrição dos seus estados e das alterações destes em função da ocorrência de eventos em um período de tempo pré-determinado. Sendo assim, esta simulação gera cenários típicos do ciclo de vida de cada unidade através de um modelo computacional que busca criar um cenário realista da vida dos componentes de um sistema. Esta é uma técnica quantitativa de análise de confiabilidade com grande desenvolvimento e aplicação nos anos recentes.

Neste método, o sistema move-se de um estado para outro governado pela ocorrência de uma seqüência de eventos. O progresso da simulação é feito a partir da ocorrência de um evento até a ocorrência do próximo sucessivamente e termina quando o seu tempo excede o tempo de vida útil especificado para a instalação em análise.

Um cenário do ciclo de vida é uma seqüência cronológica de eventos discretos, os quais simulam o comportamento real da unidade ao longo da sua vida útil. Cabe ressaltar que para criar um cenário do ciclo de vida da unidade, deve-se utilizar um modelo lógico da instalação, que neste caso é representado através de diagrama de blocos.

Através da utilização desta ferramenta, foi possível avaliar o impacto de diversas variáveis sobre a operação, identificando opções e alternativas capazes de otimizar atributos de confiabilidade e eficiência produtiva da unidade em questão.

Em cada simulação sorteiam-se valores de dados de falha e tempos de reparo dos equipamentos do sistema. Na Figura 2-12 observa-se como é realizado o sorteio do tempo de falha, através da geração de números randômicos.

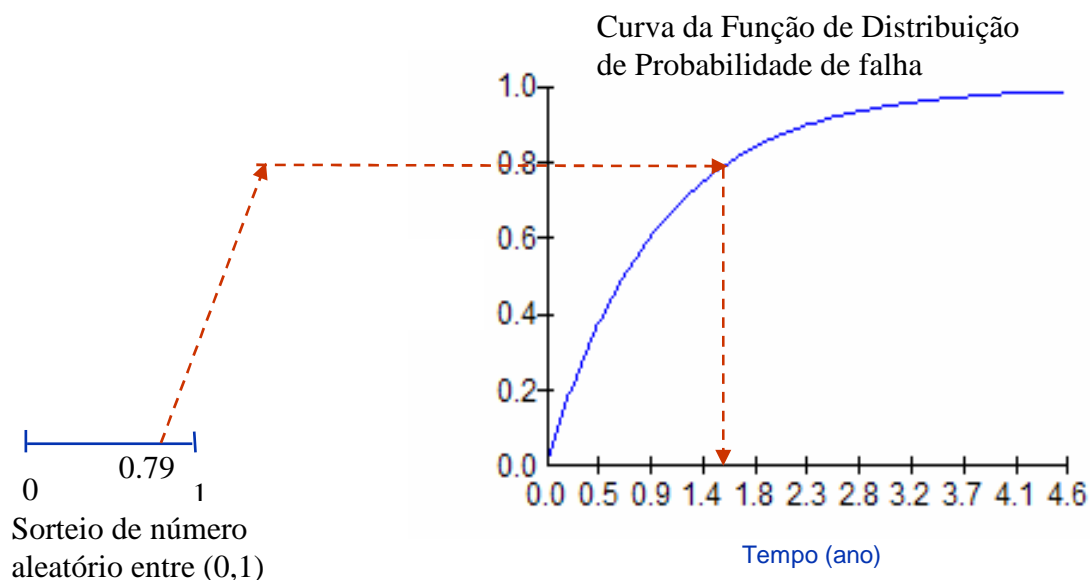


Figura 2-12 - Sorteio do tempo de falha por geração de números randômicos

Pode-se observar na Figura 2-12 que o eixo y corresponde aos números randômicos. O número randômico sorteado é relacionado com a curva de probabilidade de falha do equipamento que é descrita pela Equação 2.5:

$$P = 1 - e^{-\lambda t}$$

Sendo assim, no ponto em que o número randômico encontra a curva, existe um valor x correspondente, que indica o tempo de falha do equipamento sorteado. A equação que relaciona o tempo de falha (TF) com o valor sorteado (Rnd) é ^[13]:

$$TF = \frac{-\ln(1 - Rnd)}{\lambda} \quad (2.41)$$

Após cada falha, um tempo de reparo é igualmente gerado. Este tempo de reparo é exatamente o tempo em que o equipamento se manteve falho, contribuindo para a perda de eficiência da unidade.

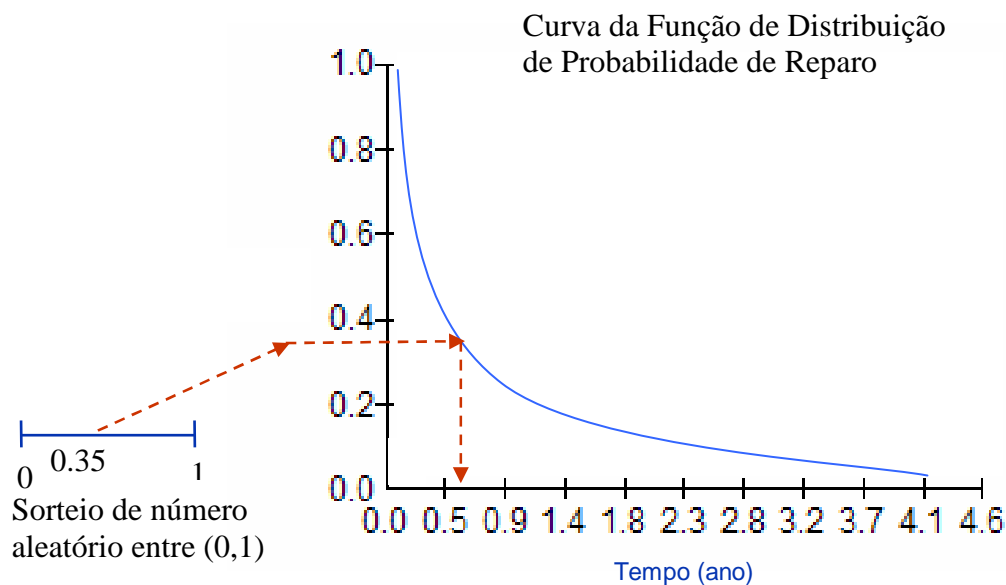


Figura 2-13 - Sorteio do tempo de falha por geração de números randômicos

A curva apresentada no gráfico da Figura 2-13 é descrita pela Equação 2.42 ^[13]:

$$G(t) = e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (2.42)$$

O princípio do sorteio de tempos de reparo é o mesmo que o utilizado para a determinação da taxa de falha do componente, excetuando-se o fato de que o tempo de reparo (TR) está relacionado com o número sorteado (Rnd) através da equação ^[13]:

$$TR = -\ln(Rnd) \cdot MTTR \quad (2.43)$$

No método de simulação por eventos discretos, o número de simulações de tempos de vida da unidade está diretamente relacionado com a convergência do valor calculado para o parâmetro requerido. Um número total de trezentas simulações foi realizado para que o valor da Eficiência Produtiva da planta convergisse para um valor com precisão de três casas decimais. Neste trabalho não foram calculados os erros.

Sendo assim, uma história é construída para cada componente, que combinados entre si, de acordo com as arquiteturas (em série ou em paralelo), criam a história do sistema, como ilustrado na Figura 2-14.

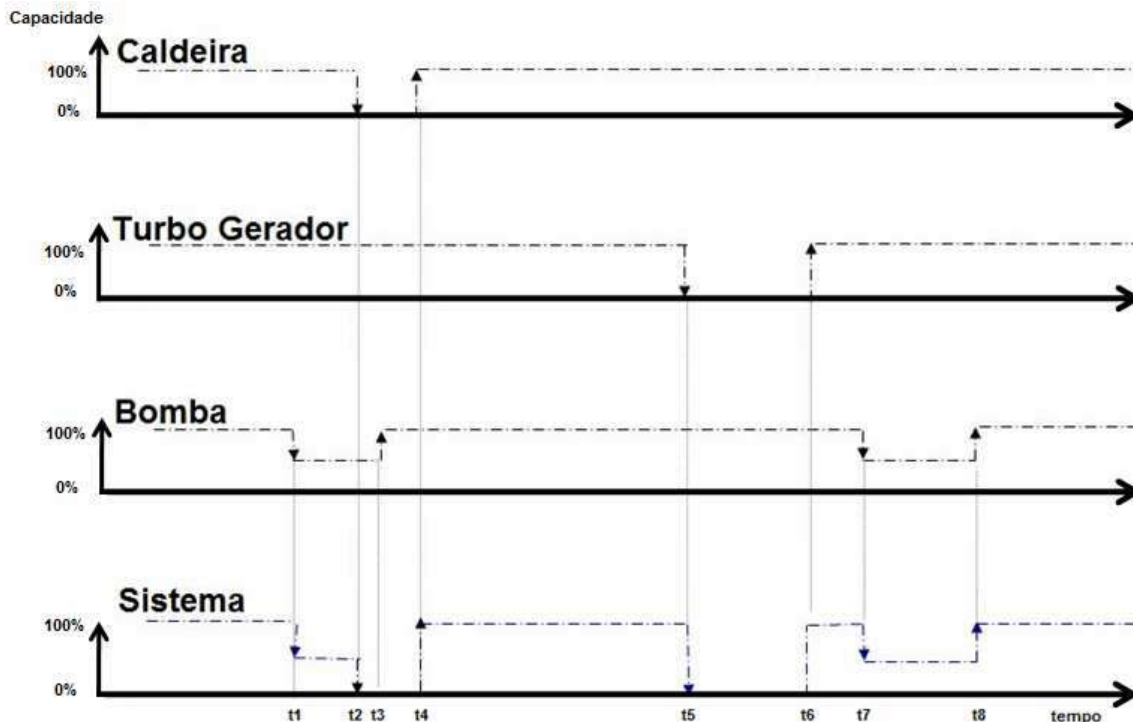


Figura 2-14 – Exemplicação de uma Simulação por Evento Discreto

Nesta figura, pode-se verificar o exemplo de um sistema composto por uma caldeira, um turbo gerador e uma bomba em série. O tempo de falha e o tempo de reparo de cada componente são sorteados, conforme descrito anteriormente.

No início da simulação o sistema encontra-se no estado funcionando. Após um dado período de tempo (t_1) ocorre a primeira falha, neste caso, uma falha parcial da bomba. Esta falha leva o sistema a operar com 50% de sua capacidade sem, no entanto, derrubá-lo completamente. Decorrido outro período de tempo (t_2), ocorre a segunda falha, neste caso da caldeira. Esta falha leva o sistema a uma parada total, ou seja, 0% de capacidade. Vale a pena reparar que em t_3 atingiu-se o tempo de reparo da bomba e que esta se encontra novamente disponível para operar com toda sua capacidade. No entanto o sistema continua falho (com 0% da sua capacidade) devido à falha da caldeira, e por se tratar de um sistema em série, é necessário que todos os equipamentos estejam funcionando para que o sistema também esteja. A caldeira é então reparada (t_4) e o sistema volta a operar com 100% de sua capacidade. Decorrido mais um período de tempo (t_5), ocorre a terceira falha, agora do turbo gerador, o qual, assim como a caldeira, leva o sistema a uma parada total. O turbo gerador é então reparado (t_6) e o sistema volta novamente a operar com 100% de sua

capacidade. Este processo se dá até que o tempo de simulação exceda o tempo de vida útil da unidade.

Conforme descrito anteriormente, os tempos de falha e de reparo de cada componente baseiam-se na geração de um número randômico entre 0 e 1, que é convertido na variável tempo propriamente dita a partir das equações de confiabilidade, portanto, dependem do número sorteado e das taxas de falha e reparo do equipamento.

3 *Estudo de Caso*

Neste capítulo são descritas as bases para a Análise da Eficiência Produtiva das diferentes configurações propostas para Unidade de Geração de Vapor.

3.1 Definição da Unidade de Geração de Vapor

A função da Unidade de Geração de Vapor é produzir o vapor que será usado em diversos processos de uma unidade industrial. O vapor de alta pressão é obtido nas caldeiras com a água proveniente dos processos da unidade e do condensado produzido nos turbo geradores.

Para garantir o funcionamento das caldeiras, estas são alimentadas por uma unidade de fornecimento de gás natural e ar, no entanto, se houver algum problema no sistema de gás natural, a caldeira poderá ser alimentada através de um sistema de óleo combustível que opera em *stand-by* no processo.

Uma vez gerado o vapor, este é encaminhado para as turbinas que tem a função de gerar energia para unidade e transformar o vapor de alta pressão, produzido nas caldeiras, em vapor de média e baixa pressão. Esta transformação gera um condensado que posteriormente é encaminhado para as caldeiras juntamente com a água proveniente dos processos da unidade.

3.2 Programa de Simulação

Esta análise de confiabilidade foi inicialmente feita ao nível dos grandes sistemas da unidade. Todos os sistemas foram subseqüentemente decompostos em seus componentes principais e estes, por sua vez, tratados ao nível dos seus modos de falha. A simulação foi realizada utilizando-se o programa MAROS, que utiliza a técnica de diagrama de blocos para representar a lógica de funcionamento do sistema e a técnica de simulação por eventos discretos para calcular a eficiência produtiva do sistema.

O programa MAROS (Maintainability Availability Reliability Operability Simulator) é um programa desenvolvido especialmente para a avaliação de confiabilidade de sistemas complexos utilizando a técnica de simulação por eventos discretos.

O programa prevê a eficiência do sistema em termos de confiabilidade, disponibilidade e produtividade. O mesmo pode ser usado para quantificar o custo da eficiência do

ciclo de vida de um sistema, e condutas de otimização para melhorar a rentabilidade da unidade. É utilizado em todo um ciclo de vida de um ativo, e faz o acompanhamento da operação da planta desde a matéria prima até o ponto de venda considerando ^[14]:

- Arranjo do projeto
- Desempenho dos Equipamentos
- Estratégias de Operação
- Estratégias de Manutenção
- Sobressalentes
- Logística
- Custos

O programa simula cenários típicos do ciclo de vida de cada unidade de acordo com o perfil de produção através da técnica de simulação por eventos discretos, que como mencionada anteriormente, busca criar um cenário realista de vida dos componentes de um sistema. Esse tipo de simulação possui a vantagem de poder considerar detalhes de operação, tais como: vários níveis de capacidade de um componente e detalhes de logística, a utilização de várias distribuições de probabilidade (taxa de falhas variável) e por ser uma técnica flexível, permite a expansão do modelo e a realização de análises de sensibilidade.

O programa utiliza um modelo lógico da instalação, o qual é representado através de diagrama de blocos, que identifica os principais elementos de cada sistema e os relacionamentos entre estes elementos através de configurações série, paralelo, etc.

Outro recurso disponível no programa, derivado da metodologia de simulação por eventos discretos, é a capacidade dos eventos se sobreporem e também possuir inter-relações condicionais uns com os outros, isto faz com que o programa gere desde situações esperadas como manutenção e reparo dos equipamentos a situações inesperadas, tal como uma falha catastrófica.

Além da eficiência produtiva, outros indicadores podem ser obtidos a partir dos resultados do MAROS, tais como ^[15]:

- Perda esperada de produção decorrente de falhas dos sistemas;
- Perda esperada de produção por ano e durante a vida útil das unidades, medida em termos monetários da produção não processada pela unidade;
- Frequência esperada de paradas forçadas por ano e durante a vida da instalação;
- Indisponibilidade média anual;
- Estatísticas de produção;
- Criticidade dos equipamentos;
- Análise da utilização dos recursos de manutenção;
- Gastos com recursos de manutenção;

Utilizou-se este programa devido, principalmente, ao fato de que:

- Fornece diretamente o indicador de interesse escolhido para a análise de confiabilidade do presente trabalho, ou seja, a eficiência produtiva;
- A incorporação da curva de produção variável ao longo do tempo da unidade;
- A interface do programa possui uma linguagem clara e simples de operar.

3.3 Dados de Entrada do Programa

Para a simulação das alternativas utilizando-se o programa em questão, os seguintes dados de entrada foram necessários:

1. Capacidade produtiva da unidade – Para todas as Alternativas, o consumo de vapor é de 1200ton/h, ou seja, a configuração dos equipamentos em qualquer alternativa tem que ser capaz de produzir 1200 toneladas de vapor por hora.
2. Configuração dos equipamentos (número de stand-by e contribuição de cada equipamento na produção total do sistema) – A Tabela 3-1 ilustra as configurações básicas analisadas para a Unidade de Geração de Vapor.

Tabela 3-1 – Configurações básicas das alternativas da Unidade de Geração de Vapor

| Alternativa | Configuração | Consumo (t/h) |
|-------------|---|---------------|
| 1 | 3 caldeiras ciclo rankine: GV-1A, GV-1B e GV-1C 2 turbo geradores: TG-1A e TG-1B | 1200 |
| 2 | 4 caldeiras ciclo rankine: GV-1A, GV-1B, GV-1C e GV-1D 3 turbo geradores: TG-1A, TG-1B e TG-1C | 1200 |
| 3 | 3 caldeiras ciclo rankine: GV-1A, GV-1B, GV-1C 1 caldeira recuperadora 112MW turbina a gás: GVC-1 3 turbo geradores: TG-1A, TG-1B e TG-1C | 1200 |
| 4 | 2 caldeiras ciclo Rankine: GV-1A e GV-1B, 2 caldeiras recuperadoras 112MW turbina a gás: GVC-1A e GVC-1B 2 turbo geradores: TG-1A e TG-1B | 1200 |

A Figura 3-1 apresenta o fluxograma de processo simplificado da Alternativa 1 que contempla os seguintes sistemas:

Sistema de Caldeiras:

- três caldeiras ciclo Rankine (GV-1A, GV-1B e GV-1C), com capacidade de 600t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 3x50%, ou seja, cada uma com capacidade de processar 50% do vapor necessário;
- duas bombas de óleo combustível (B-1A e B-1B), sendo uma reserva, operando em paralelo com uma lógica de 2x100%, ou seja, cada uma com capacidade de suprir 100% da demanda;

- um tanque de óleo combustível (TQ-1);
- três turbinas para ar (T-1A, T-1B e T-1C); e
- três ventiladores para ar (VE-1A, VE-1B e VE-1C).

Sistema de Geração de Energia:

- dois turbo geradores (TG-1A e TG-1B), com capacidade de 600t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 2x50%, ou seja, cada um com capacidade de processar 50% do vapor necessário.

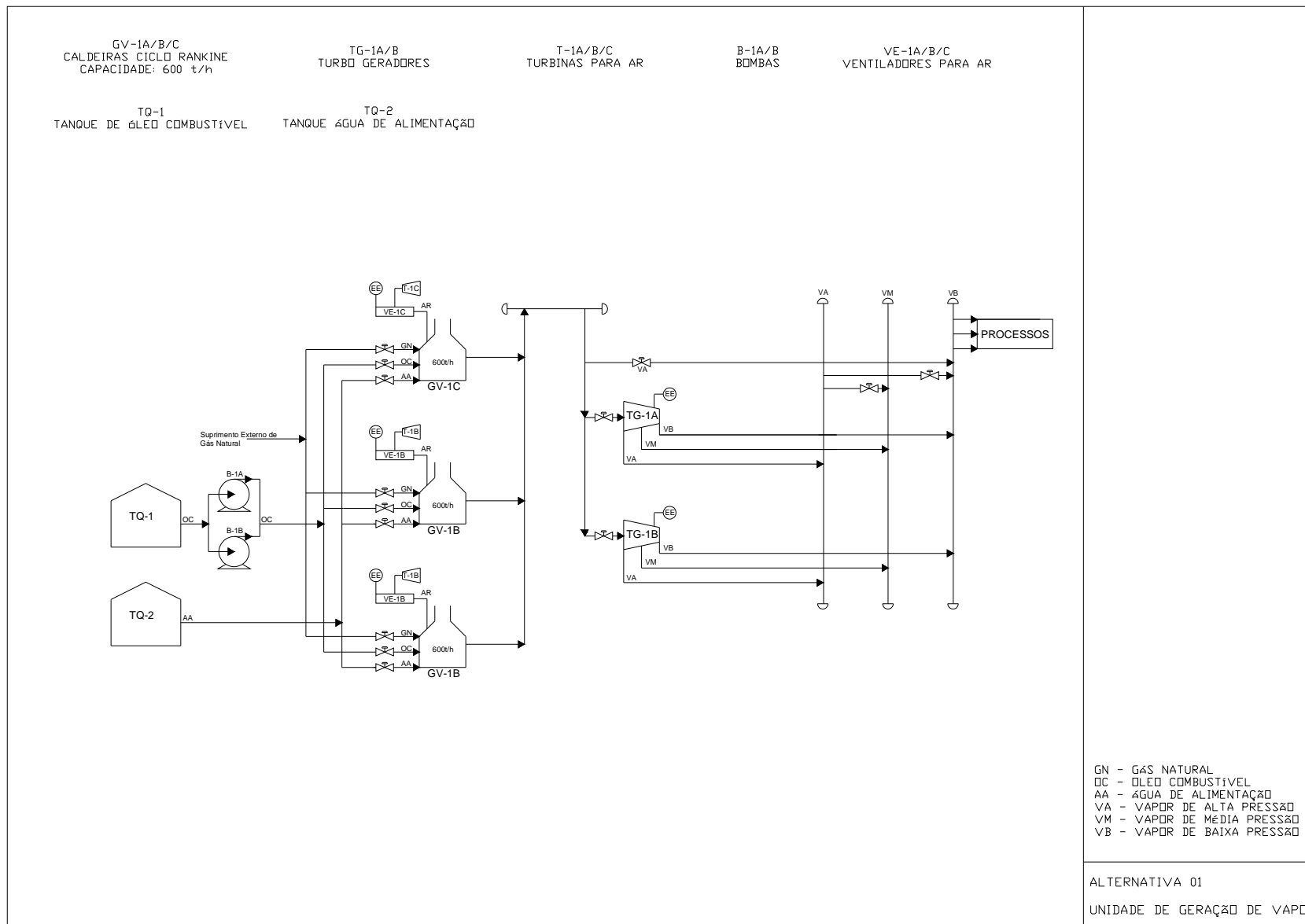


Figura 3-1 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 1

A Figura 3-2 apresenta o fluxograma de processo simplificado da alternativa 2 que contempla os seguintes sistemas:

Sistema de Caldeiras:

- quatro caldeiras ciclo Rankine (GV-1A, GV-1B, GV-1C e GV-1D), com capacidade de 400t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 4x33,33%, ou seja, cada uma com capacidade de processar 33,33% do vapor necessário;
- duas bombas de óleo combustível (B-1A e B-1B), sendo uma reserva, operando em paralelo com uma lógica de 2x100%, ou seja, cada uma com capacidade de suprir 100% da demanda;
- um tanque de óleo combustível (TQ-1);
- quatro turbinas para ar (T-1A, T-1B, T-1C e T-1D); e
- quatro ventiladores para ar (VE-1A, VE-1B, VE-1C e VE-1D).

Sistema de Geração de Energia:

- três turbo geradores (TG-1A, TG-1B e TG-1C), em paralelo, com capacidade de 400t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 3x33,33%, ou seja, cada um com capacidade de processar 33,33% do vapor necessário.

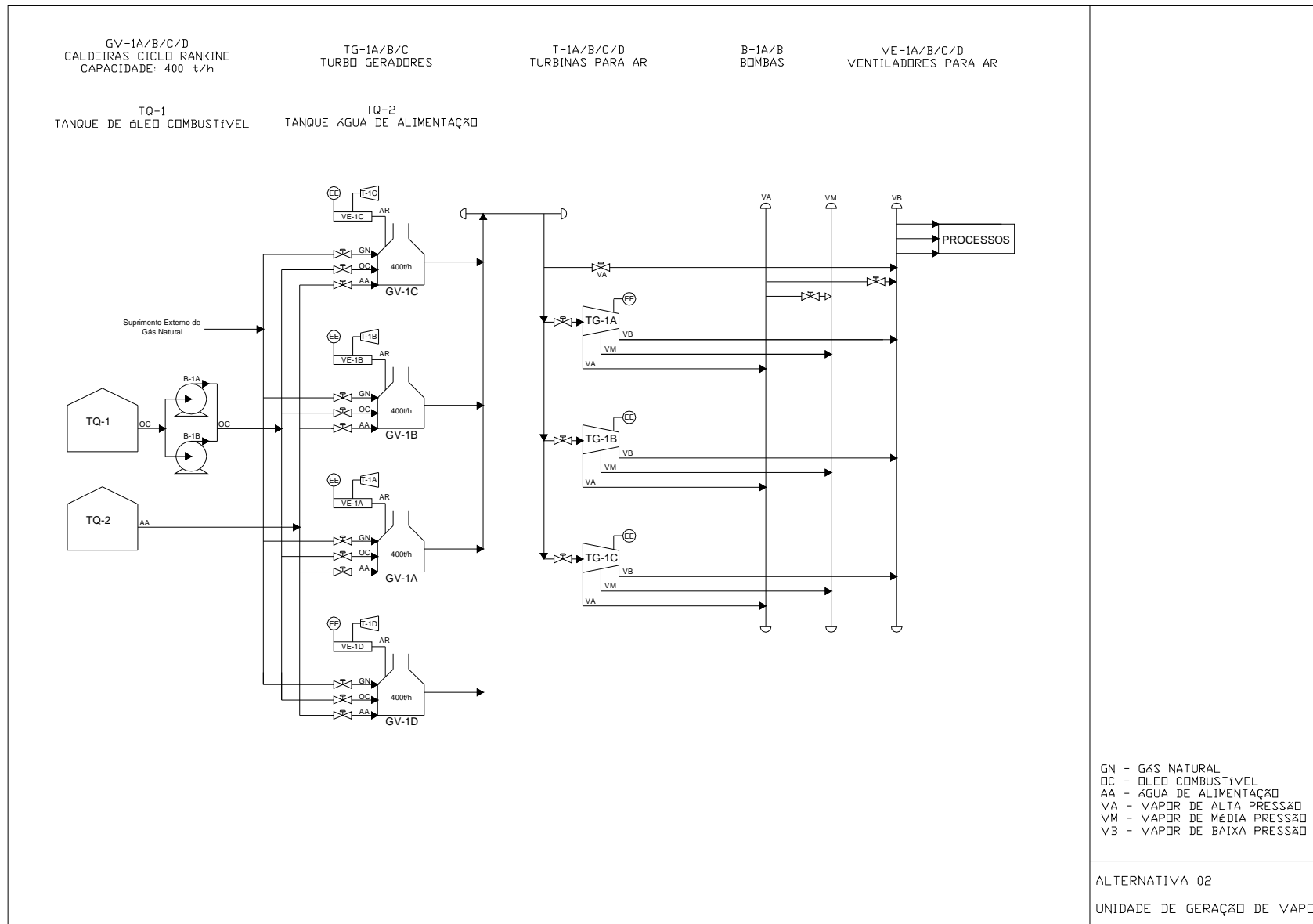


Figura 3-2 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 2

A Figura 3-3 apresenta o fluxograma de processo simplificado da Alternativa 3 que contempla os seguintes sistemas:

Sistema de Caldeiras

- três caldeiras ciclo Rankine em paralelo (GV-1A, GV-1B e GV-1C), com capacidade de 475t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 3x39,58%, ou seja, cada uma com capacidade de processar 39,58% do vapor necessário;
- uma caldeira recuperadora 112 MW turbina a gás (GVC-1A), com capacidade de 250t/h. Esta caldeira opera em paralelo com as três caldeiras ciclo Rankine. A caldeira recuperadora 112 MW turbina a gás tem a capacidade de processar 20,83% do vapor necessário;
- duas bombas de óleo combustível (B-1A e B-1B), sendo uma reserva, operando em paralelo com uma lógica de 2x100%, ou seja, cada uma com capacidade de suprir 100% da demanda;
- um tanque de óleo combustível (TQ-1);
- três turbinas para ar (T-1A, T-1B e T-1C); e
- três ventilador para ar (VE-1A, VE-1B e VE-1C).

Sistema de Geração de Energia:

- três turbo geradores em paralelo (TG-1A, TG-1B e TG-1C), com capacidade de 400t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 3x33,33%, ou seja, cada um com capacidade de processar 33,33% do vapor necessário.

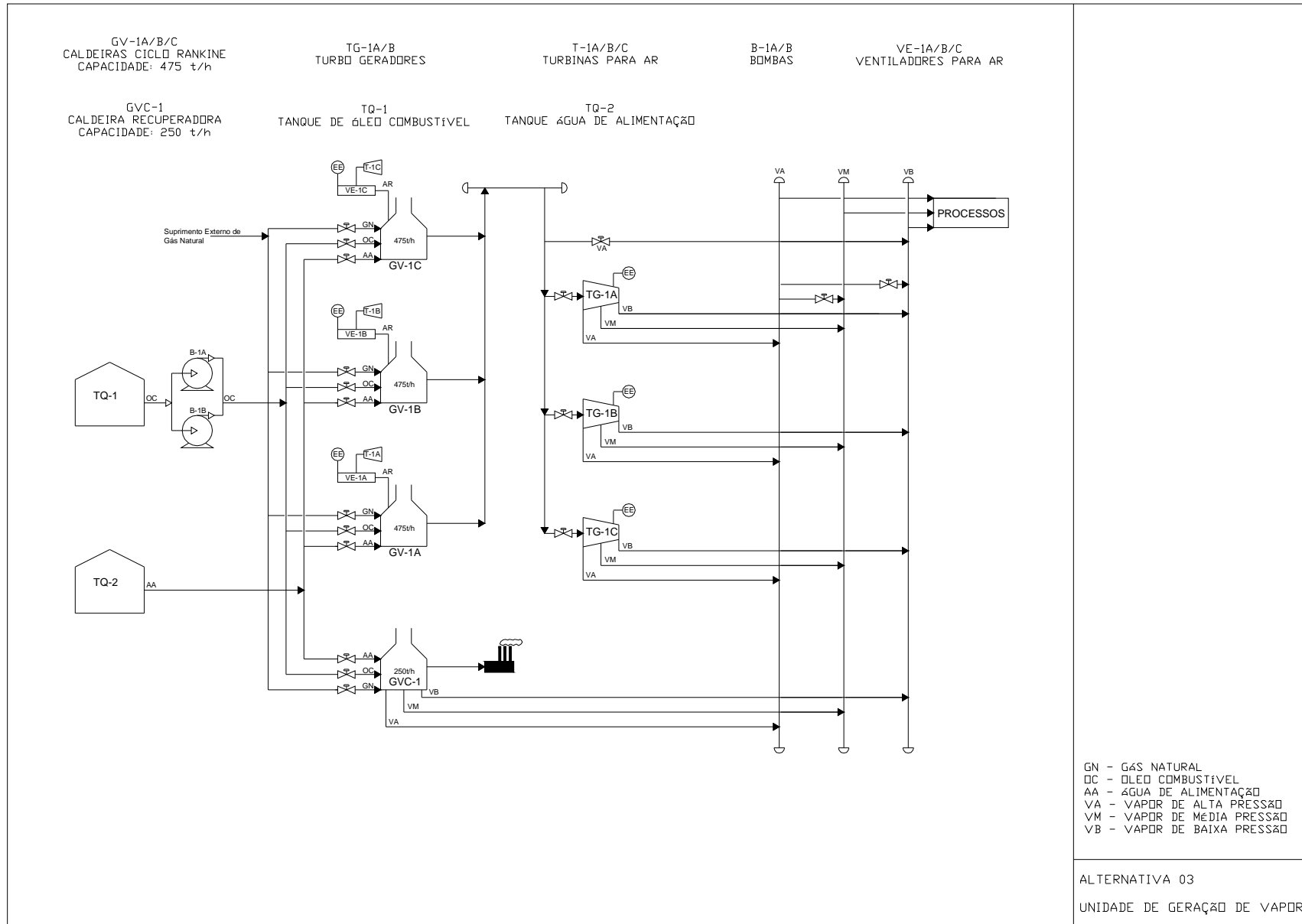


Figura 3-3 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 3

A Figura 3-4 ilustra o fluxograma de processo simplificado da Alternativa 4 que contempla os seguintes sistemas:

Sistema Caldeiras

- duas caldeiras ciclo Rankine (GV-1A e GV-1B), com capacidade de 475t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 2x39,58%, ou seja, cada uma com capacidade de processar 39,58% do vapor necessário;
- duas caldeiras recuperadoras 112 MW turbina a gás (GVC-1A e GVC-1B), com capacidade de 250t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 2x20,83%, ou seja, cada uma com capacidade de processar 20,83% do vapor necessário. As mesmas operam em paralelo com as duas caldeiras ciclo Rankine
- duas bombas de óleo combustível (B-1A e B-1B), sendo uma reserva, operando em paralelo com uma lógica de 2x100%, ou seja, cada uma com capacidade de suprir 100% da demanda;
- um tanque de óleo combustível (TQ-1);
- duas turbinas para ar (T-1A e T-1B); e
- dois ventiladores para ar (VE-1A e VE-1B) .

Sistema Geração de Energia:

- dois turbo geradores em paralelo (TG-1A e TG-1B), com capacidade de 400t/h cada, operando em paralelo com uma lógica 2x50%, ou seja, cada um com capacidade de processar 50% do vapor necessário.

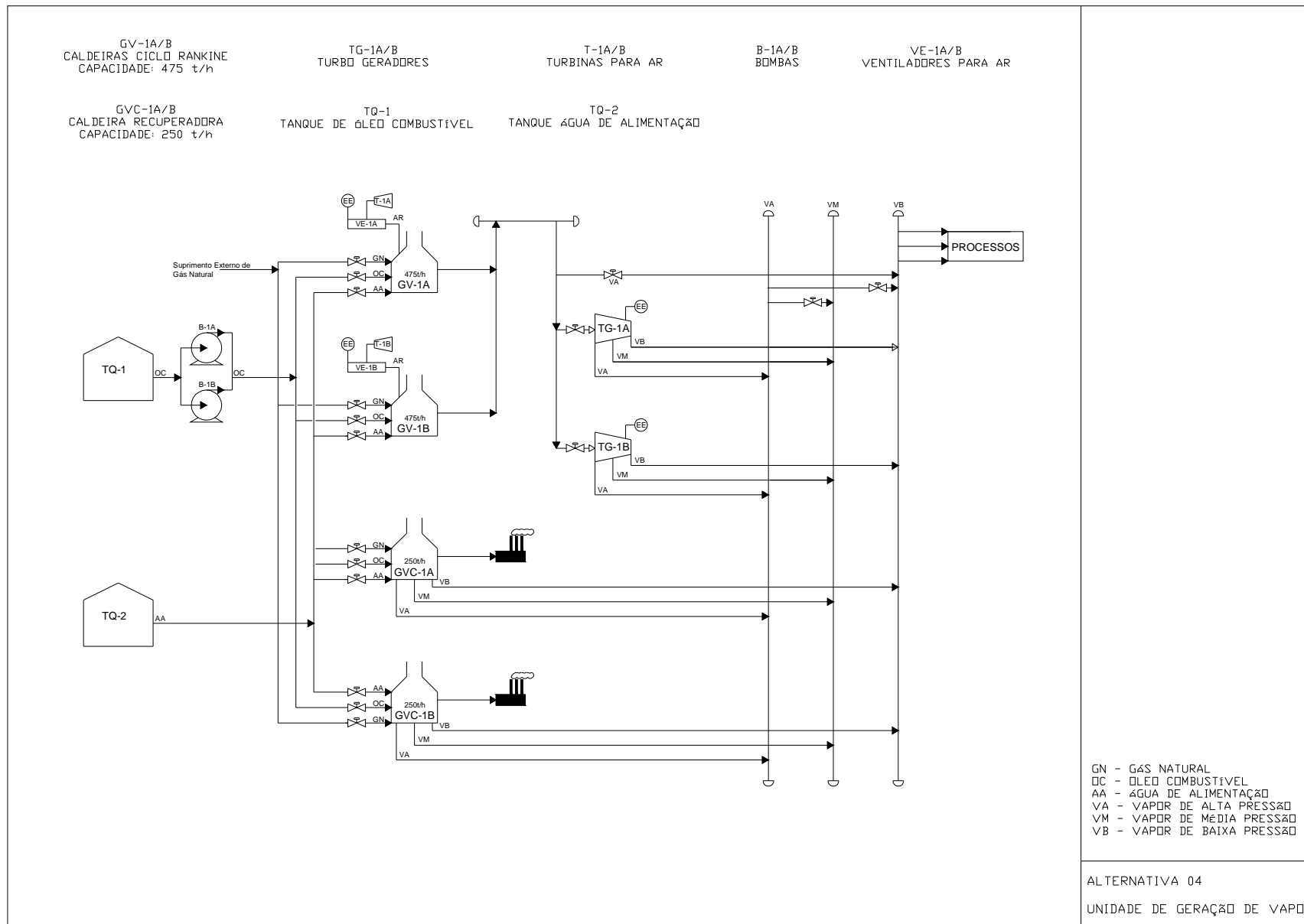


Figura 3-4 - Fluxograma de processo simplificado da alternativa 4

3. Dados de falha e tempo de reparo dos componentes – Os dados de falha e reparo para a Unidade de Geração de Vapor foram retirados dos Bancos de Dados OREDA 2002 e NERC. A Tabela 3-2 apresenta, para cada componente, os tempos médios até falhar e os tempos médios de reparo para a Unidade de Geração de Vapor.

Tabela 3-2 – Dados de falha e tempo de reparo por tipo de componente da Unidade de Geração de Vapor

| Componente | MTTF (anos) | MTTR (horas) | Banco de Dados |
|-----------------------------------|-------------|--------------|----------------------|
| Bomba | 5,28 | 39,70 | OREDA 2002 - pag 181 |
| Caldeira Rankine | 0,24 | 52,70 | NERC- 02-06 |
| Caldeira Recuperadora | 5,24 | 31,60 | NERC- 02-06 |
| Suprimento Externo de Gás Natural | 1,00 | 720,00 | Estimado |
| Tanque de Óleo Combustível | 4,00 | 8,00 | OREDA 2002 - pg 416 |
| Turbina para ar | 1,59 | 106,30 | NERC- 02-06 |
| Turbina a gás | 0,240 | 19,40 | NERC- 02-06 |
| Válvula | 16,80 | 9,10 | OREDA 2002 - pag 468 |
| Ventilador para Ar | 4,40 | 16,00 | OREDA 2002 - pag 509 |

4. Intervalo e duração de paradas para manutenção do sistema – a manutenção preventiva da caldeira recuperadora de turbina a gás, da caldeira ciclo Rankine, bem como dos turbo-geradores ocorrem a cada dois anos e têm duração de 30 dias (720 horas). Cabe ressaltar que as manutenções preventivas das caldeiras são seqüenciais, ou seja, ao fim da manutenção de uma, se inicia a manutenção de outra.
5. Vida útil da unidade - Para fins de simulação, considerou-se um tempo de operação de vinte anos. Para tempos menores que este, a influência das paradas gerais para manutenção a cada dois anos têm um impacto muito forte nos resultados, distorcendo-os quanto à proporção da contribuição (criticidade) de cada causa de falha;
6. Número de simulações – Um número total de trezentas simulações foi realizado para que o valor da Eficiência Produtiva da planta convergisse para um valor com precisão de três casas decimais.

3.4 Premissas da Análise

Visando proporcionar maior clareza, foram determinadas premissas relativas à modelagem e ao tratamento dos dados de falha a serem utilizados nas análises das alternativas. A seguir encontram-se as principais premissas utilizadas na modelagem da Unidade de Geração de Vapor.

- Foram utilizados nas modelagens das alternativas o constante nos fluxogramas de processo simplificados apresentados no item anterior;
- Seguindo a orientação da Norma ISO/DIS 20815, eventos com efeitos catastróficos não foram considerados nesta análise. Estes eventos tendem a distorcer demasiadamente os resultados da análise, pois a sua ocorrência em uma única história de simulação da planta já é suficiente para causar um grande efeito sobre a disponibilidade média calculada para a instalação. Na realidade, para que este tipo de evento (baixa probabilidade e altas conseqüências) tivesse o tratamento adequado na análise de confiabilidade, seria necessário que fossem geradas um número muito maior de “histórias de vida” da planta. Adicionalmente seria importante que essas histórias fossem avaliadas por um tempo de vida bem maior do que os vinte anos tipicamente considerados para as instalações analisadas;
- Para todos os casos foi considerado que os tempos de partida e parada estão contidos dentro dos tempos de reparo de cada equipamento ou sistema. As incertezas presentes na distribuição dos valores dos MTTRs levaram em conta as variações dos tempos de mobilização, reparo efetivo e desmobilização. De uma maneira geral, as equipes de manutenção e os sobressalentes foram considerados como existentes em números suficientes para execução do reparo dentro das faixas de tempo reportadas;
- Considerou-se que a água de alimentação das caldeiras proveniente do condensado das turbinas e dos processos para gerar o vapor é capaz de suprir 100% da demanda de água e está sempre disponível. Observação válida para todas as alternativas;
- Considerou-se que falhas de válvulas manuais, vazamentos de linhas ou rupturas das mesmas, e transientes devidos à perda de uma caldeira que potencialmente resultem em perda das demais (em função da maior ou menor eficácia da atuação da malha de controle), não fazem parte do escopo desta análise;

3.5 Modelagem das Unidades

Uma vez definido o sistema, bem como as premissas necessárias para a fundamentação de uma determinada análise de confiabilidade, criou-se uma diagramação de blocos no MAROS que representa o comportamento dinâmico de todo o sistema, através de arranjos funcionais lógicos do sistema analisado.

Os Diagramas de Blocos de cada uma das alternativas propostas para as Unidades de Geração de Vapor estão representados nas figuras a seguir:

Alternativa 1 - Suprimento de Vapor

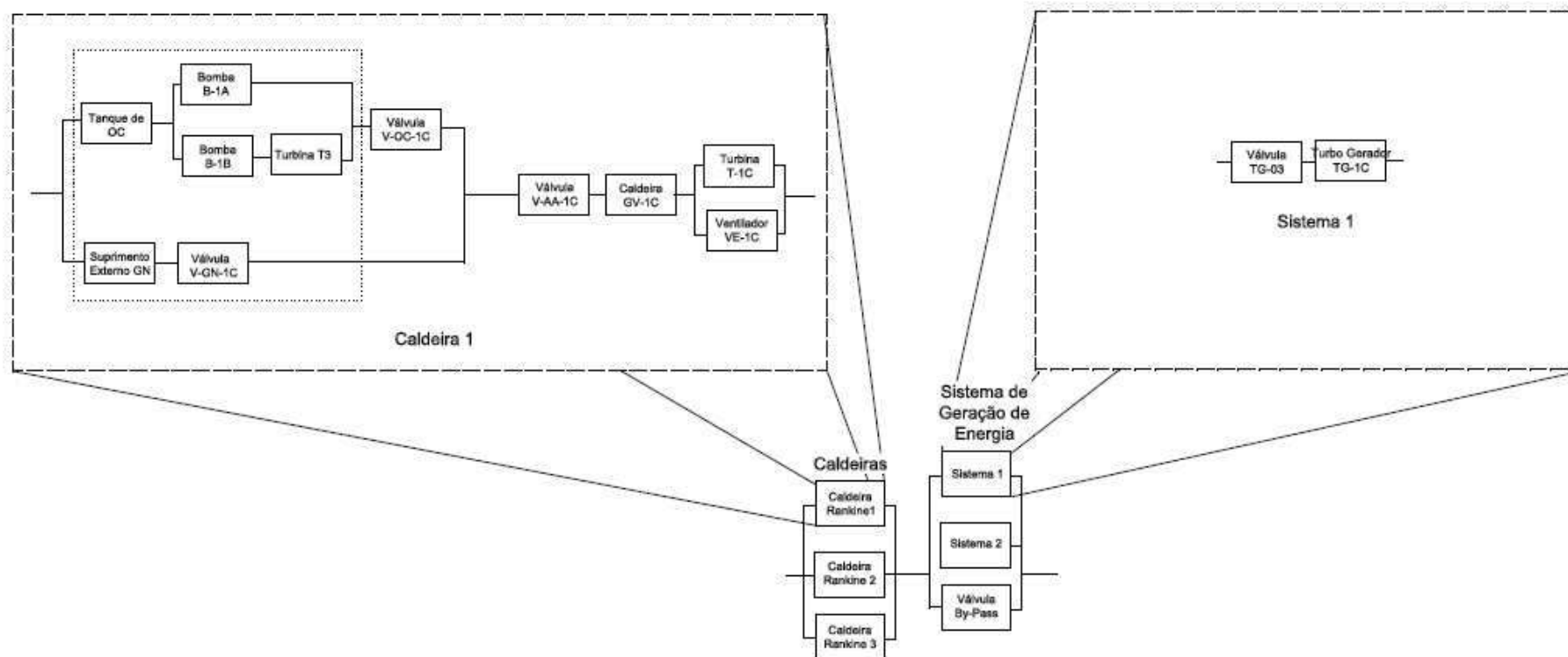


Figura 3-5 - Diagrama de Blocos da alternativa 1

Alternativa 2 - Suprimento de Vapor

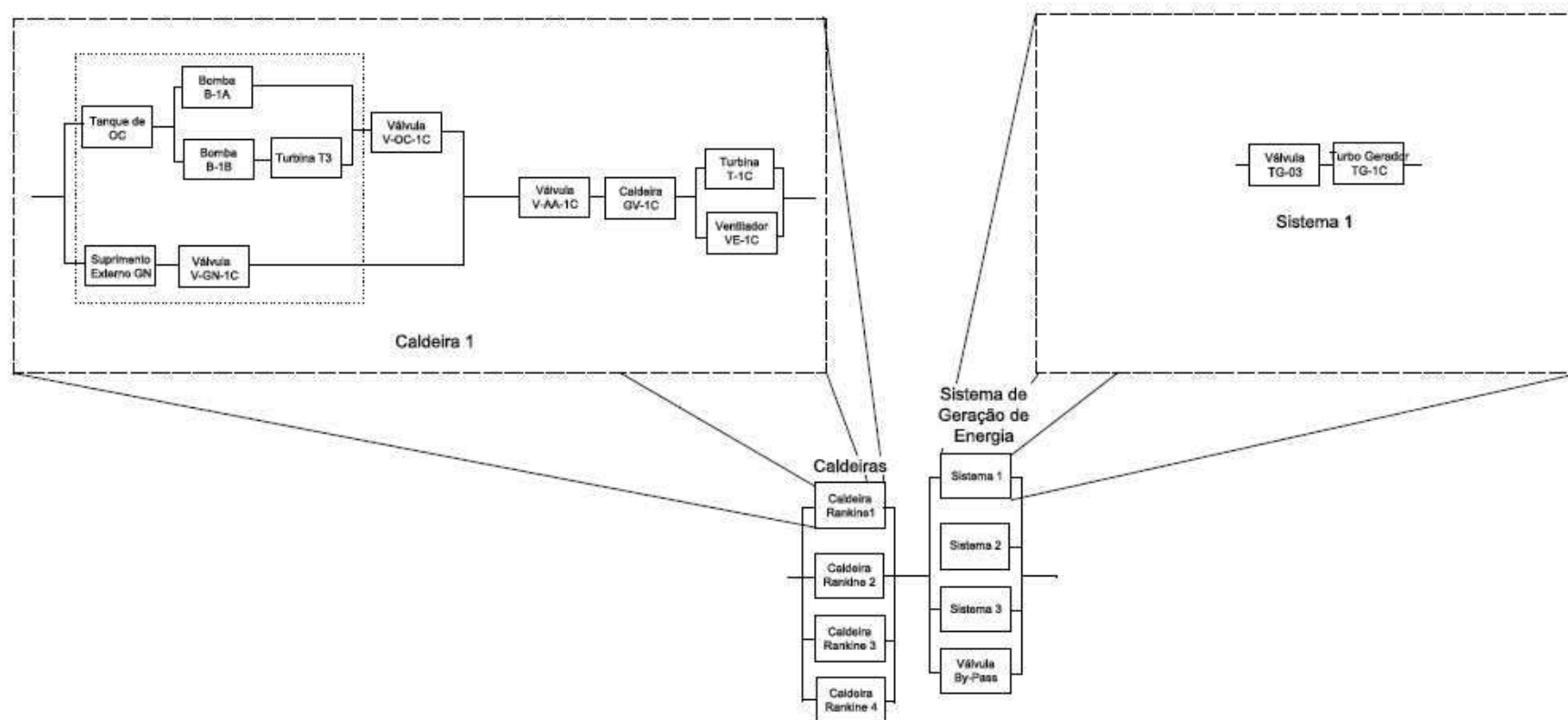


Figura 3-6 - Diagrama de Blocos da alternativa 2

Alternativa 3 - Suprimento de Vapor

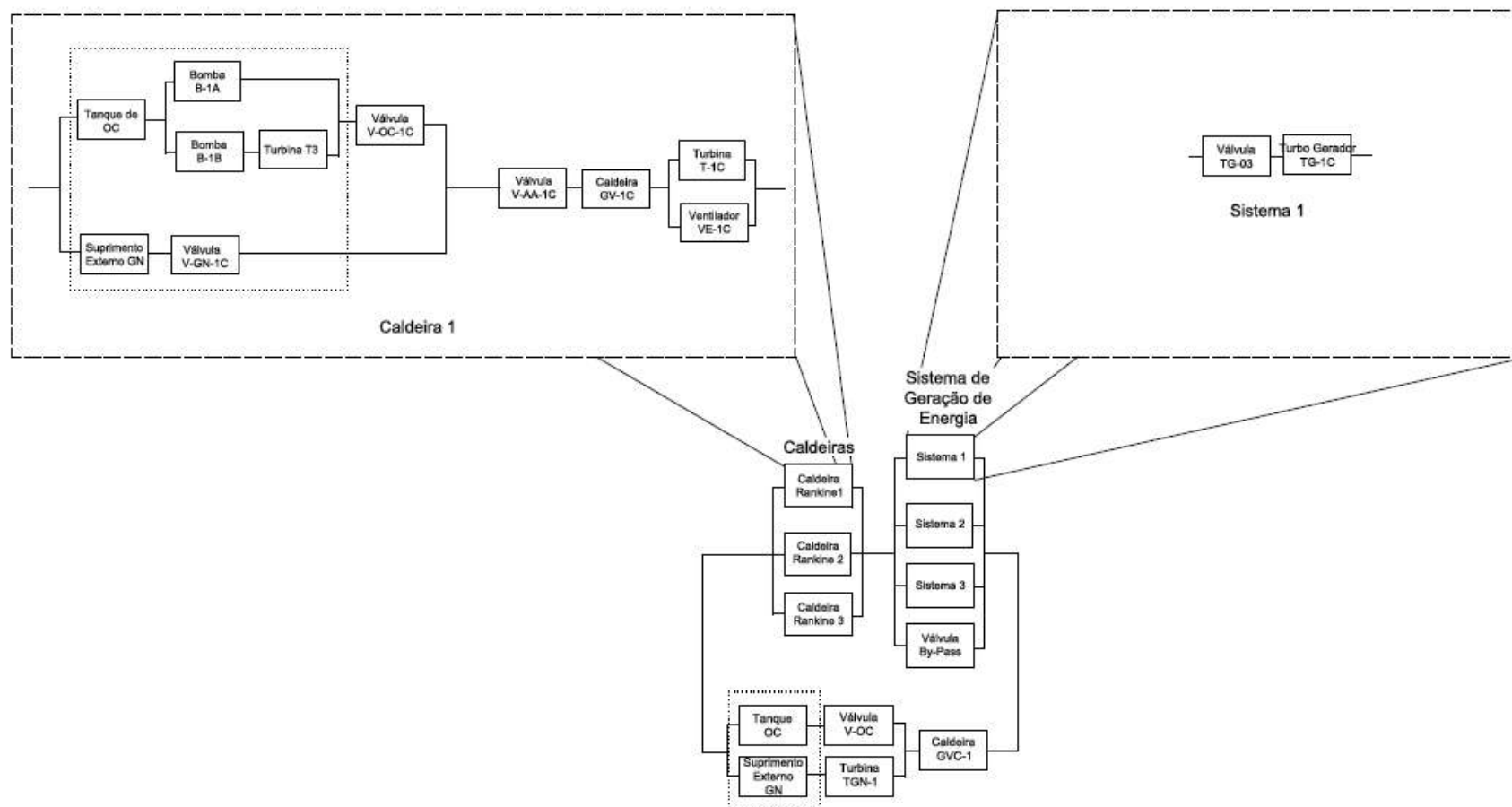


Figura 3-7 - Diagrama de Blocos da alternativa 3

Alternativa 4 - Suprimento de Vapor

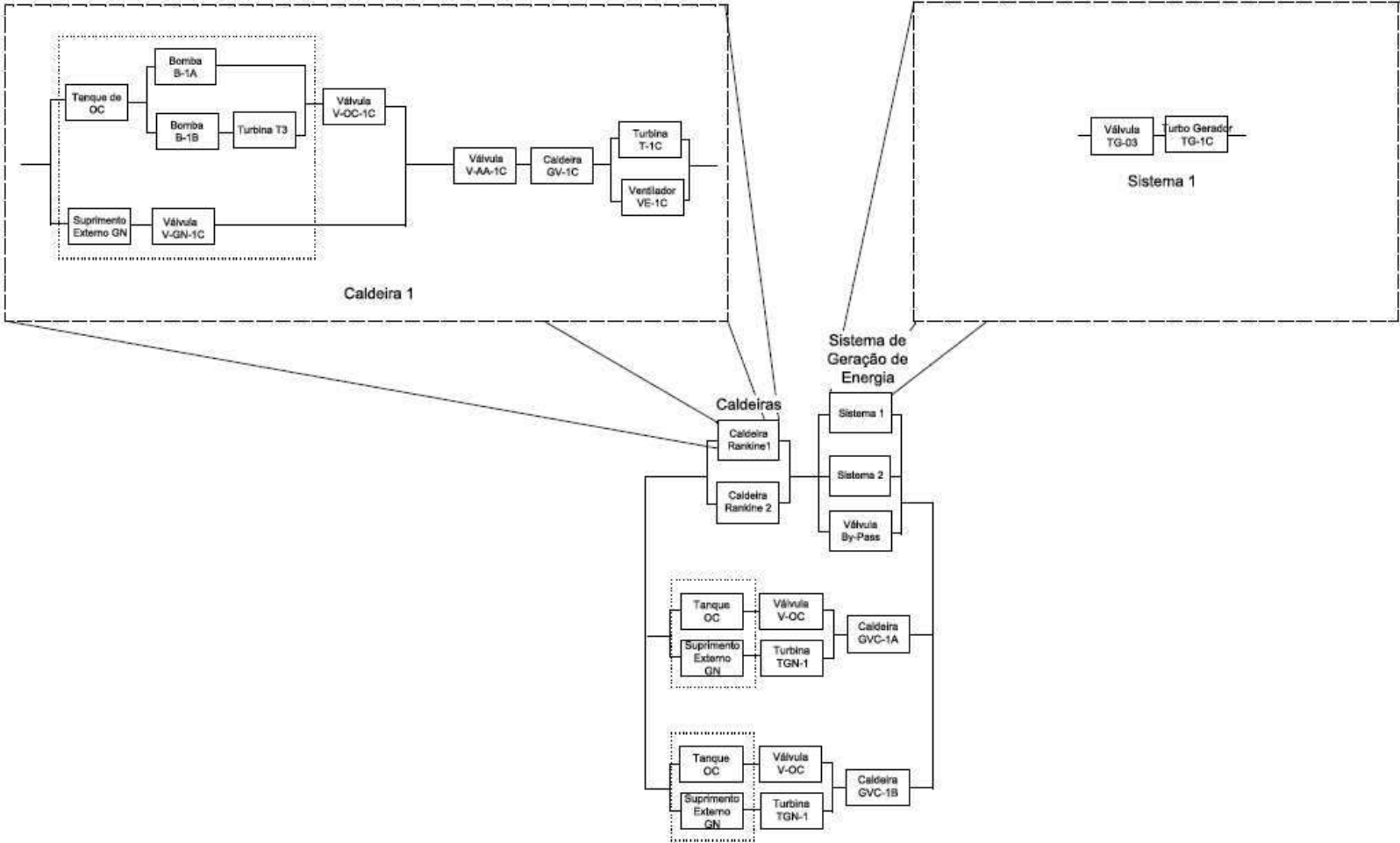


Figura 3-8 - Diagrama de Blocos da alternativa 4

Conforme dito anteriormente, cabe lembrar que neste tipo de modelagem é comum a utilização de recursos lógicos que podem não corresponder à visualização física do sistema. Tais recursos, entretanto, são extremamente importantes, pois permitem simular corretamente a função do sistema.

A simulação das alternativas deste trabalho compreendeu a execução das seguintes etapas:

- Construção do diagrama de blocos das unidades;
- Coleta de dados de falhas e tempos de reparo genéricos obtidos em bancos internacionais;
- Verificação dos modelos e dos dados de falhas e tempos de reparo;
- Quantificação da eficiência produtiva dos sistemas e comparação entre as configurações propostas;
- Avaliação dos resultados.

4 Resultados obtidos

4.1 Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 1

Na Tabela 4-1 estão apresentados os valores resumidos da performance obtida para a Simulação da Alternativa 1. Desta tabela pode-se verificar a eficiência produtiva obtida, a disponibilidade para capacidade máxima, a produção de vapor por ano, a perda média de vapor por ano, a duração total das paradas, a frequência e a duração média das paradas e a duração máxima e mínima das paradas.

Tabela 4-1 – Performance da Simulação para a Alternativa 1

| Indicador | Alternativa 1 |
|--|---------------|
| Valores de Eficiência Produtiva (%) | 99,626 |
| Disponibilidade para Máxima Capacidade (%) | 99,263 |
| Produção de vapor (ton) por ano | 10.472.500 |
| Perda Média de Vapor (ton) por ano | 39.322 |
| Duração Total das Paradas (%) | 0,011 |
| Número Médio de Paradas por ano | 0,055 |
| Duração Média das Paradas (hrs) | 17,516 |
| Maior Duração de uma Parada (hrs) | 52,625 |
| Menor Duração de uma Parada (hrs) | 1,111 |

Como mostrado acima, a eficiência produtiva média obtida para a Simulação da Alternativa 1 foi da ordem de 99,626%, o que representa uma perda anual de produção de vapor de 0,374% da capacidade de processamento da unidade.

Considerando que a produção de vapor por ano é de 10.472.500 toneladas, durante toda sua vida útil (20 anos) esta Alternativa chega a produzir 209.450.000 toneladas de vapor. Neste contexto, avaliando-se as perdas, 0,374% representa 786.440 toneladas de vapor que deixam de ser produzidos no decorrer dos 20 anos.

Na Figura 4-1 pode-se observar o Histograma da produção da Alternativa 1 da Unidade de Geração de Vapor.

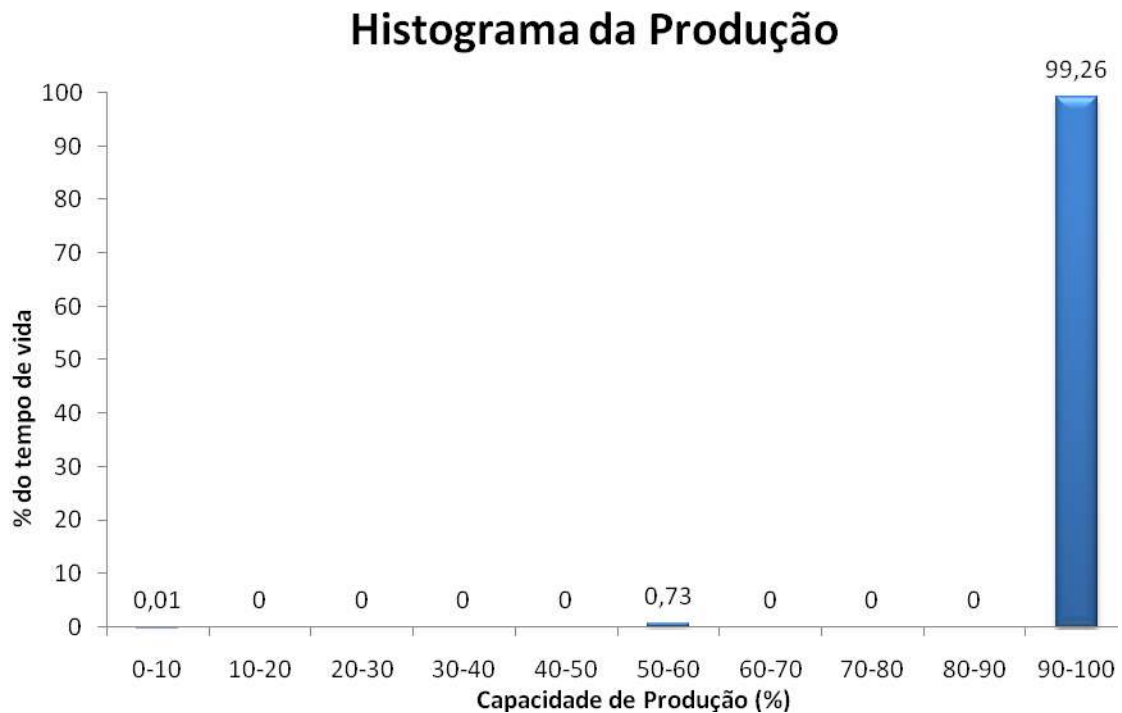


Figura 4-1 – Histograma da Produção da Alternativa 1

Analisando-se a Figura 4-1, verifica-se que, com a configuração da Alternativa 1, a Unidade de Geração de Vapor opera entre 90 e 100% da sua capacidade durante 99,26% do tempo. Já durante 0,73% do tempo, a mesma opera com a sua capacidade reduzida a 50%, e durante 0,01% reduzida a zero.

Na Figura 4-2 pode-se observar a distribuição da ocorrência de paradas da Alternativa 1 da Unidade de Geração de Vapor.



Figura 4-2 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 1

A Figura 4-2 ilustra a distribuição percentual da ocorrência das paradas. Essas paradas podem ter durações diferentes, desta forma, o gráfico mostra os intervalos de tempo em que o sistema permanece fora de operação e a respectiva percentagem do número de paradas totais que correspondente a cada um deles. Da mesma pode-se verificar que grande parte das paradas, 45,732%, tem a duração de 0,3 a 0,6 dias. Verifica-se também que nenhuma parada tem duração maior que 2,4 dias.

Na Tabela 4-2 estão apresentadas as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Alternativa 1. Desta tabela pode-se verificar a perda relativa global e a perda absoluta de cada um dos sistemas contemplados.

Tabela 4-2– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 1

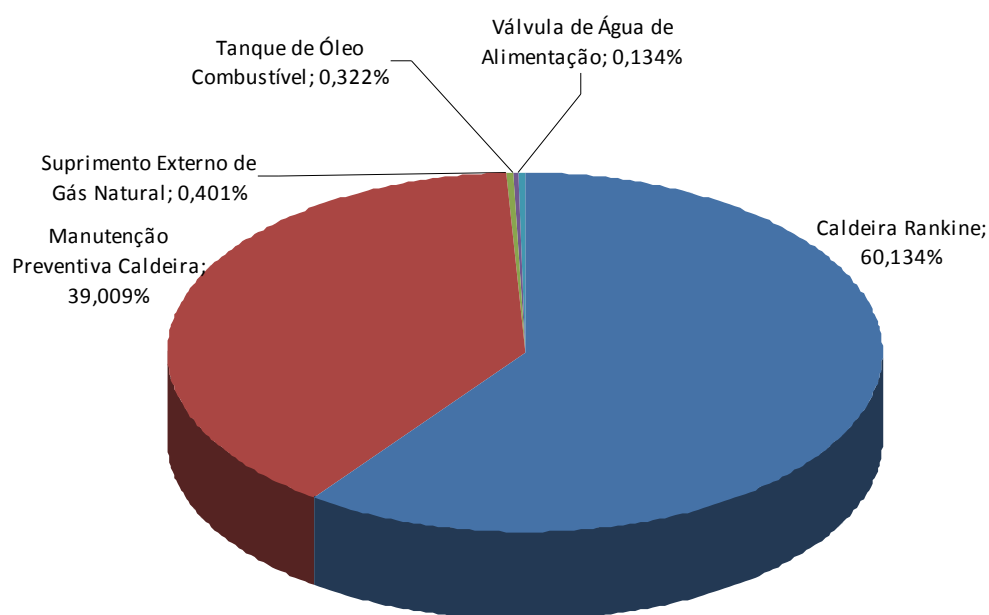
| Sistema | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa(%) |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| Caldeira | 0,374 | 99,925 |
| Geração de Energia | 0,000 | 0,075 |

Deve-se avaliar a criticidade de cada componente dos sistemas da unidade de forma a se determinar os componentes que mais contribuem para a perda de eficiência produtiva. Da Tabela 4-2 pode-se verificar que o sistema de caldeira é o que mais contribui para a perda de eficiência produtiva. Desta forma, a Tabela 4-3 apresenta a perda absoluta e perda relativa dos componentes do sistema de caldeiras para a Alternativa 1. Os resultados estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-3.

Tabela 4-3– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 1

| Equipamento | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa (%) |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Caldeiras Rankine | 0,225 | 60,134 |
| Manutenção Preventiva Caldeiras | 0,146 | 39,009 |
| Suprimento Externo de Gás Natural | 0,002 | 0,401 |
| Tanque de Óleo Combustível | 0,001 | 0,322 |
| Válvulas de Água de Alimentação | 0,001 | 0,134 |
| Total | 0,374 | 100,000 |

Criticidade dos Elementos do Sistema Caldeiras

**Figura 4-3 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 1**

Analisando-se a Tabela 4-3 e a Figura 4-3, é possível verificar que as caldeiras são responsáveis por aproximadamente 60,134% das perdas observadas e o evento de Manutenção Preventiva das mesmas por 39,009%. Os demais componentes não causam grandes impactos no sistema, gerando poucas perdas.

4.2 Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 2

Avalia-se a performance desta simulação a partir de valores extraídos dos resultados da mesma. Dentre estes valores, pode-se verificar a eficiência produtiva obtida, a disponibilidade para capacidade máxima, a produção de vapor por ano, a perda média de vapor por ano, a duração total das paradas, a frequência e a duração média das paradas e a duração máxima e mínima das paradas. Estes dados podem ser observados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Performance da Simulação para a Alternativa 2

| Indicador | Alternativa 2 |
|--|---------------|
| Valores de Eficiência Produtiva (%) | 99,496 |
| Disponibilidade para Máxima Capacidade (%) | 98,529 |
| Produção de vapor (ton) por ano | 10.459.000 |
| Perda Média de Vapor (ton) por ano | 52.974 |
| Duração Total das Paradas (%) | 0,003 |
| Número Médio de Paradas por ano | 0,022 |
| Duração Média das Paradas (hrs) | 10,358 |
| Maior Duração de uma Parada (hrs) | 106,3 |
| Menor Duração de uma Parada (hrs) | 7,344 |

Verifica-se nesta tabela que a eficiência produtiva média obtida foi de 99,496%, o que representa uma perda anual de produção de vapor de 0,504% da capacidade de processamento da unidade. Contemplando a produção de vapor por ano desta Alternativa, da ordem de 10.459.000 toneladas, esta perda chega a 1.059.480 toneladas no fim de sua vida útil.

Na Figura 4-4 pode-se observar o Histograma da produção da Alternativa 2 da Unidade de Geração de Vapor.

Histograma da Produção

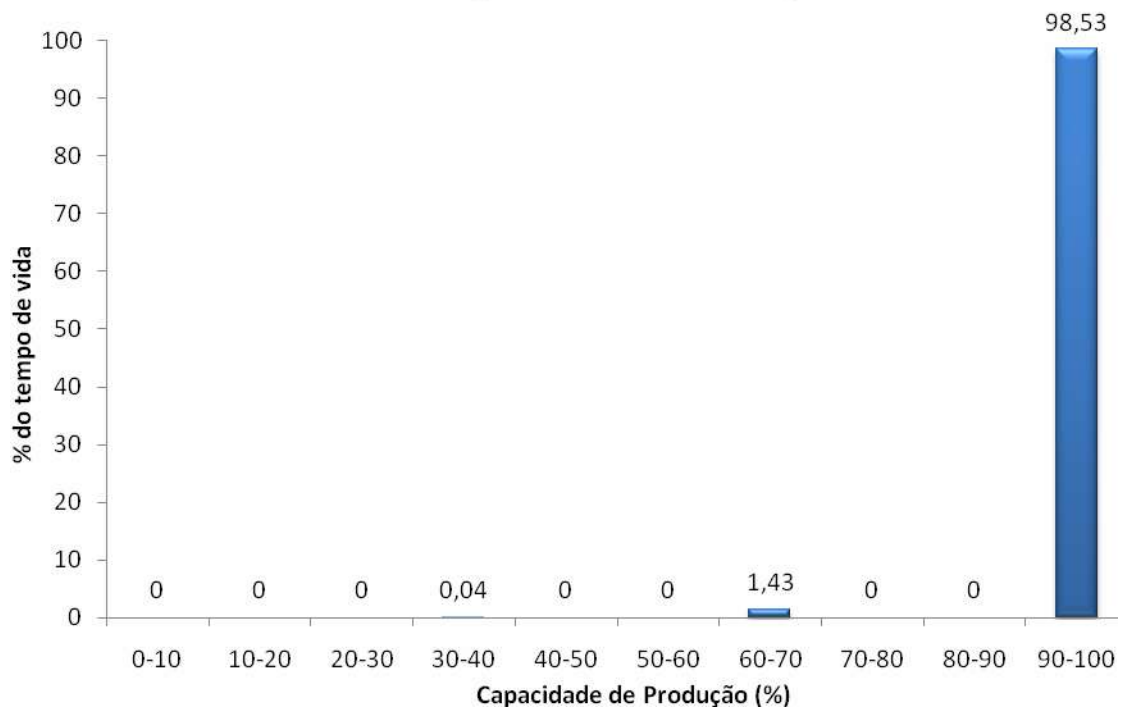


Figura 4-4 – Histograma da Produção da Alternativa 2

A Figura 4-4, mostra que, com a configuração da Alternativa 2, a Unidade de Geração de Vapor opera entre 90 e 100% da sua capacidade durante 98,53% do tempo. Tem sua capacidade reduzida entre 60% e 70% durante 1,43% do tempo e entre 30% e 40% durante 0,04% do seu tempo de vida útil. Esta Alternativa não chega a zerar sua capacidade de produção.

Na Figura 4-5 pode-se observar a distribuição da ocorrência de paradas da Alternativa 2 da Unidade de Geração de Vapor.

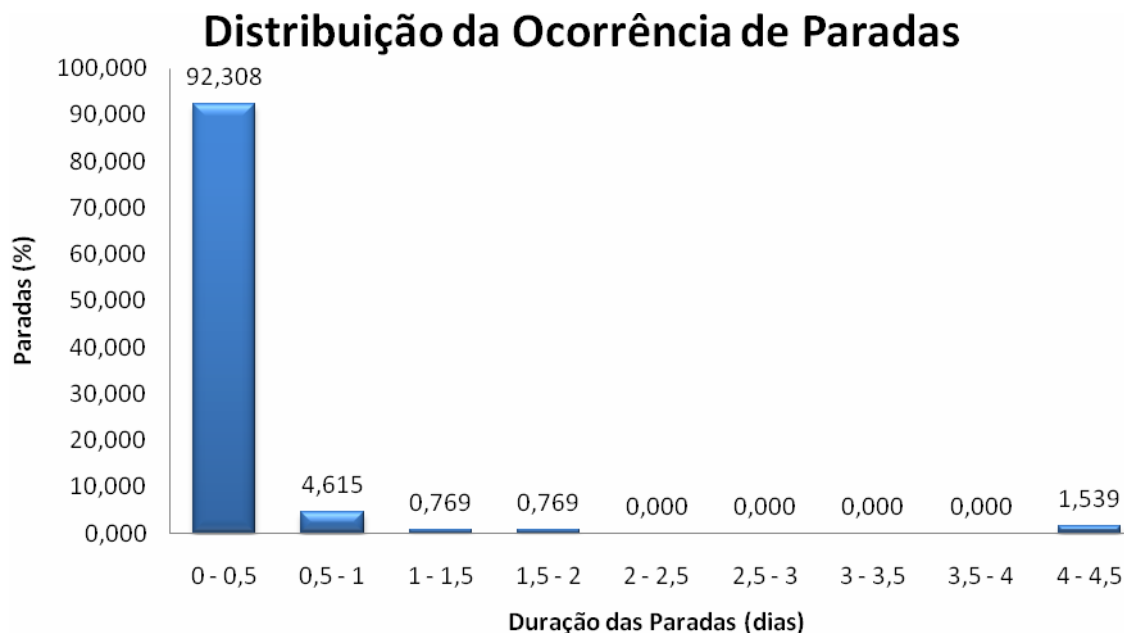


Figura 4-5 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 2

Muitos dos problemas enfrentados durante a operação da unidade, que levam a paradas de produção e a conseqüente perda de eficiência produtiva ($\pm 92,31\%$ das paradas), têm duração esperada entre 0 a 0,5 dia. Aproximadamente 4,62% destas paradas têm duração esperada entre 0,5 e 1,0 dia. Nenhuma parada tem duração superior a 4,5 dias.

Na Tabela 4-5 estão apresentadas as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Alternativa 2.

Tabela 4-5– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 2

| Sistema | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa(%) |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| Caldeira | 0,504 | 99,952 |
| Geração de Energia | 0,000 | 0,048 |

A Tabela 4-5 mostra que o sistema de caldeiras contribui com aproximadamente 99,952% para as perdas observadas, sendo irrelevante a contribuição do sistema de geração de energia.

A Tabela 4-6 apresenta a perda absoluta e perda relativa dos componentes do sistema de caldeiras para a Alternativa 2. Os resultados estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-6.

Tabela 4-6– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 2

| Equipamento | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa (%) |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Caldeiras Rankine | 0,302 | 59,980 |
| Manutenção Preventiva Caldeiras | 0,198 | 39,305 |
| Suprimento Externo de Gás Natural | 0,001 | 0,278 |
| Tanque de Óleo Combustível | 0,001 | 0,278 |
| Válvulas de Água de Alimentação | 0,001 | 0,159 |
| Total | 0,504 | 100,00 |

Criticidade dos Elementos do Sistema Caldeiras

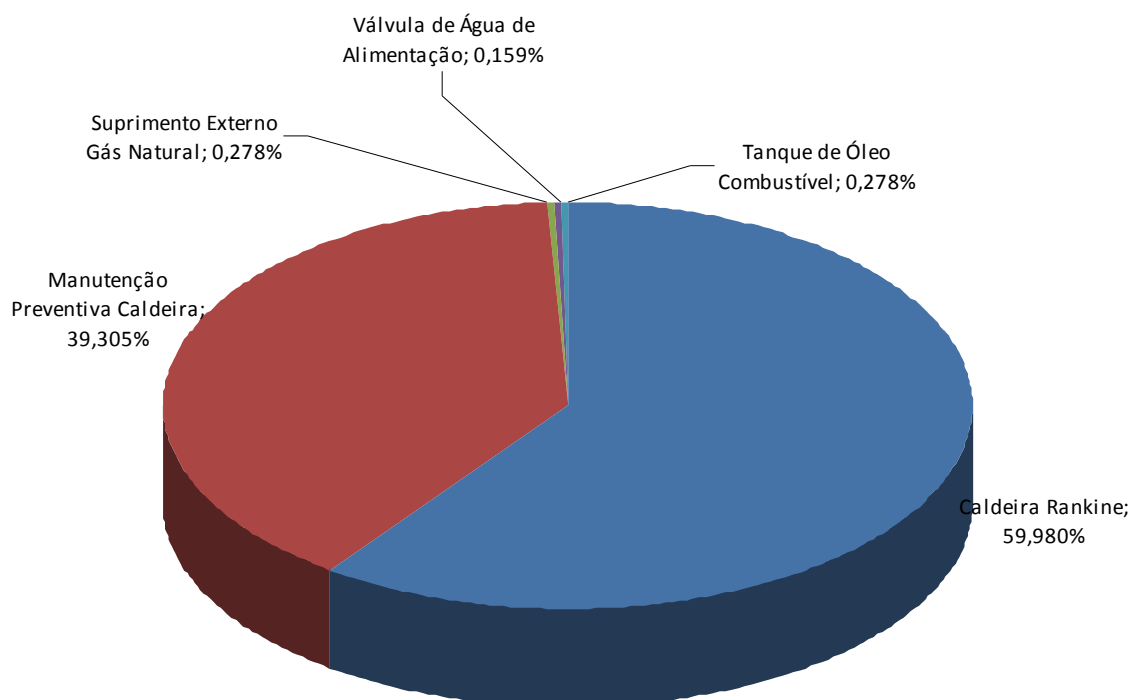


Figura 4-6 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 2

A Tabela 4-6 e a Figura 4-6 evidenciam que as caldeiras são as maiores responsáveis pelas perdas observadas, 59,980%, como esperado, seguida do evento de Manutenção Preventiva das mesmas, este responsável por 39,305%. O Suprimento Externo de Gás Natural, bem como o Tanque de Óleo Combustível, geram 0,278% das perdas. As Válvulas de Água de Alimentação geram 0,159% das perdas.

De uma forma geral, comparando-se os resultados obtidos para cada uma das alternativas, pode-se verificar que entre a Alternativa 1 e a Alternativa 2 houve uma perda de 0,13% no valor da eficiência produtiva, apesar da última apresentar uma

maior redundância no número de caldeiras e de turbo geradores. Este resultado deve-se principalmente a diferença na folga da capacidade produtiva encontrada em cada uma das alternativas: a configuração da Alternativa 1 possui capacidade produtiva de aproximadamente 150% do consumo de vapor, enquanto a Alternativa 2 possui aproximadamente 133,33% do consumo.

4.3 Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 3

A Tabela 4-7 apresenta os valores resumidos da performance obtida para a Simulação da Alternativa 3. Como nas alternativas anteriores, esta tabela mostra os resultados obtidos na simulação.

Tabela 4-7 – Performance da Simulação para a Alternativa 3

| Indicador | Alternativa 3 |
|--|---------------|
| Valores de Eficiência Produtiva (%) | 99,387 |
| Disponibilidade para Máxima Capacidade (%) | 97,762 |
| Produção de vapor (ton) por ano | 10.447.500 |
| Perda Média de Vapor (ton) por ano | 64.483 |
| Duração Total das Paradas (%) | 0,002 |
| Número Médio de Paradas por ano | 0,023 |
| Duração Média das Paradas (hrs) | 9,341 |
| Maior Duração de uma Parada (hrs) | 40,979 |
| Menor Duração de uma Parada (hrs) | 0,401 |

A Alternativa 3 gerou uma eficiência produtiva média da ordem de 99,387%, representando assim uma perda anual de produção de vapor de 0,613% da capacidade de processamento da unidade. Sendo assim, se são produzidas durante a vida útil da unidade 208.950.000 toneladas de vapor, sua produção perdida chega a 1.289.660 toneladas.

Na Figura 4-7 pode-se observar o Histograma da produção da Alternativa 3 da Unidade de Geração de Vapor.

Histograma da Produção

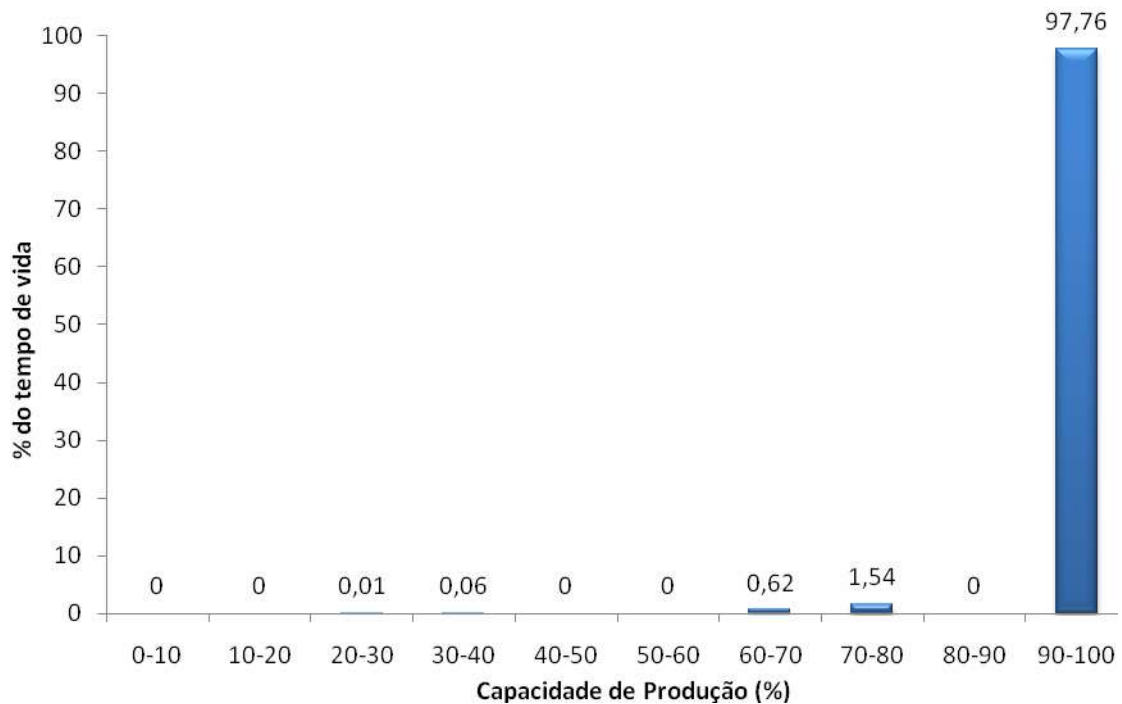


Figura 4-7 – Histograma da Produção da Alternativa 3

Da Figura 4-7 pode-se verificar que esta configuração opera entre 90 e 100% da sua capacidade durante 97,76% do tempo. Sua capacidade é reduzida entre 70 e 80% durante 1,54% do tempo de vida útil e entre 60 e 70% durante 0,62% do tempo. Para porcentagens menos representativas do tempo de vida útil - 0,01% e 0,06% - sua capacidade permanece entre 20 e 30%, e entre 30 e 40% respectivamente.

Na Figura 4-8 pode-se observar a distribuição da ocorrência de paradas da Alternativa 3 da Unidade de Geração de Vapor.

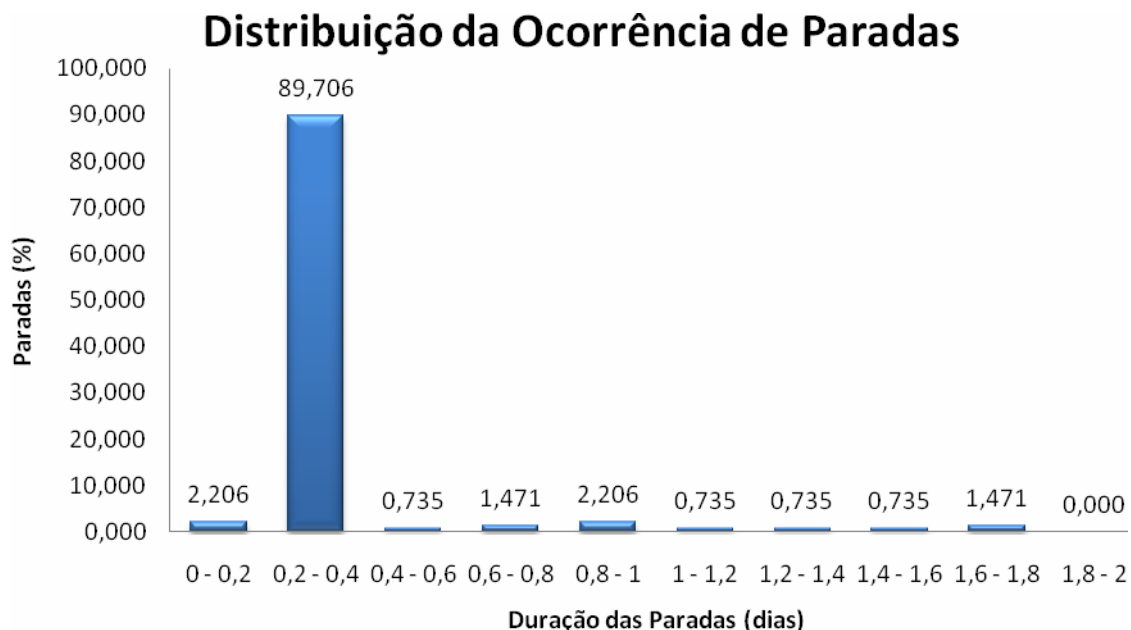


Figura 4-8 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 3

As paradas ocorridas na Alternativa 3 tem em sua maioria (89,706%) uma duração entre 0,2 e 0,4 dia. Um mesmo número de paradas (2,206% do total) tem duração entre 0 e 0,2 dia, e 0,8 e 1,0 dia, assim como 1,471% das paradas tem duração de 0,6 a 0,8 dia, e 1,6 e 1,8 dia. Já 2,94% das paradas estão distribuídas igualmente em períodos de 0,4 a 0,6 dia, 1 a 1,2 dias, 1,2 a 1,4 dias e 1,4 a 1,6 dias, representando cada uma 0,735% das mesmas.

Na Tabela 4-8 estão apresentadas as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Alternativa 3. Desta tabela pode-se verificar a perda relativa global e a perda absoluta.

Tabela 4-8– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 3

| Sistema | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa(%) |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| Caldeira | 0,613 | 100,000 |
| Geração de Energia | 0,000 | 0,000 |

A Tabela 4-8 ressalta o impacto do sistema de caldeiras nas perdas observadas na unidade de geração de vapor. A Tabela 4-9 apresenta a perda absoluta e perda relativa dos componentes do sistema de caldeiras para a Alternativa 3. Os resultados estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-9.

Tabela 4-9– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 3

| Equipamento | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa (%) |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Caldeiras Rankine | 0,250 | 40,718 |
| Manutenção Preventiva Caldeiras | 0,220 | 35,922 |
| Suprimento Externo de Gás Natural | 0,071 | 11,533 |
| Tanque de Óleo Combustível | 0,070 | 11,517 |
| Caldeira Recuperadora | 0,001 | 0,196 |
| Válvulas de Água de Alimentação | 0,001 | 0,114 |
| Total | 0,613 | 100,000 |

Criticidade dos Elementos do Sistema Caldeiras

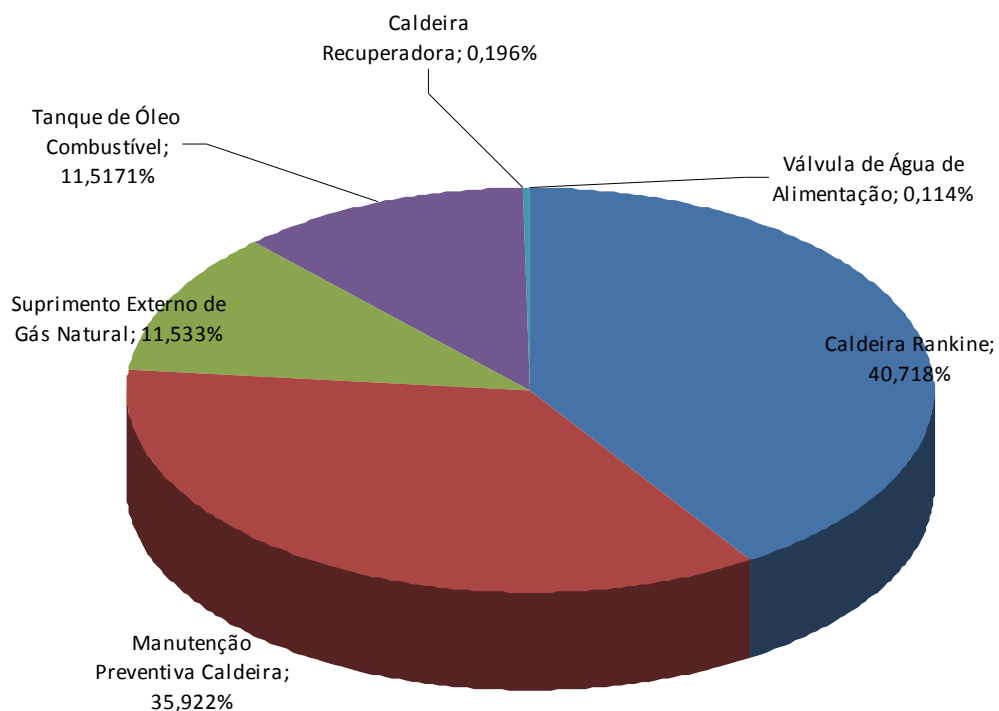


Figura 4-9 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 3

Como apresentados acima, observa-se que as próprias caldeiras e o evento de Manutenção Preventiva das mesmas são os maiores responsáveis pelas perdas observadas no sistema de caldeiras, representando 40,718% e 35,922% respectivamente. O Suprimento Externo de Gás Natural e o Tanque de Óleo Combustível têm participações bem semelhantes nas perdas desta Alternativa,

representando 11,533% e 11,5171%. Os demais elementos somam apenas 0,310% da responsabilidade pelas paradas.

Comparando-se os resultados obtidos para cada uma das alternativas, pode-se verificar que entre a Alternativa 1 e a Alternativa 3 houve uma perda de 0,239% no valor da eficiência produtiva, apesar da alternativa 3 possuir uma redundância maior no número de caldeiras e de turbo geradores.

Este resultado deve-se principalmente a três fatores:

1) a capacidade produtiva da Alternativa 1 é de aproximadamente 150% do consumo de vapor, ao passo que na Alternativa 3 é de 139,58%, ou seja, a Alternativa 1 possui uma folga na capacidade produtiva de 10,42% a mais que a Alternativa 3.

2) aumento na quantidade e duração das manutenções preventivas. Na Alternativa 1, onde o sistema é composto por três caldeiras, o tempo total de manutenções preventivas é de 1080 horas/ano, enquanto na Alternativa 3, com a adição da caldeira recuperadora, é de 1440 horas/ano;

3) O Fator de Utilização (quantidade programada/capacidade máxima) da Alternativa 1 é de 66,66%, ou seja, o sistema está operando muito aquém da sua capacidade nominal. Já na Alternativa 3, o Fator de Utilização é de 71,64%, o que significa que o sistema ainda opera com folga, no entanto é mais próxima de sua capacidade máxima do que a Alternativa 1. Devido a isso, as falhas que ocorrem nas caldeiras da Alternativa 1 não causam grandes impactos no sistema.

Comparando-se a Alternativa 2 com a Alternativa 3 percebe-se que houve uma redução de 0,109% no valor da eficiência produtiva, mesmo com a substituição de uma caldeira Rankine, a qual apresenta uma taxa de falha de aproximadamente 4,17/ano, por uma caldeira Recuperadora, a qual apresenta uma taxa de falha de 0,19/ano. Este resultado deve-se principalmente ao fato de que ao substituir uma das caldeiras Rankine por uma caldeira recuperadora na Alternativa 3, houve uma redução na capacidade das caldeiras de 400 toneladas de vapor/hora, para 250 toneladas de vapor/hora.

4.4 Análise dos Resultados da Simulação da Alternativa 4

Os valores de eficiência produtiva obtida, disponibilidade para capacidade máxima, produção de vapor por ano, perda média de vapor por ano, duração total das paradas, frequência e duração média das paradas e duração máxima e mínima das paradas, estão apresentados na Tabela 4-10. Estes são os chamados valores de performance encontrados para a Alternativa 4.

Tabela 4-10 – Performance da Simulação para a Alternativa 4

| Indicador | Alternativa 4 |
|--|---------------|
| Valores de Eficiência Produtiva (%) | 95,818 |
| Disponibilidade para Máxima Capacidade (%) | 87,399 |
| Produção de vapor (ton) por ano | 10.072.500 |
| Perda Média de Vapor (ton) por ano | 439.640 |
| Duração Total das Paradas (%) | 0,002 |
| Número Médio de Paradas por ano | 0,021 |
| Duração Média das Paradas (hrs) | 8,102 |
| Maior Duração de uma Parada (hrs) | 31,597 |
| Menor Duração de uma Parada (hrs) | 0,326 |

Como apresentado acima, a eficiência produtiva média obtida para a simulação da Alternativa 4 foi da ordem de 95,818%, acarretando uma perda anual de produção de vapor de 4,182% (8.792.800 toneladas no fim de sua vida útil) da capacidade de processamento da unidade, se considerado que são produzidas durante a vida útil da mesma 201.450.000 toneladas de vapor.

O Histograma da produção da Alternativa 4 da Unidade de Geração de Vapor, está apresentado na Figura 4-10.

Histograma da Produção

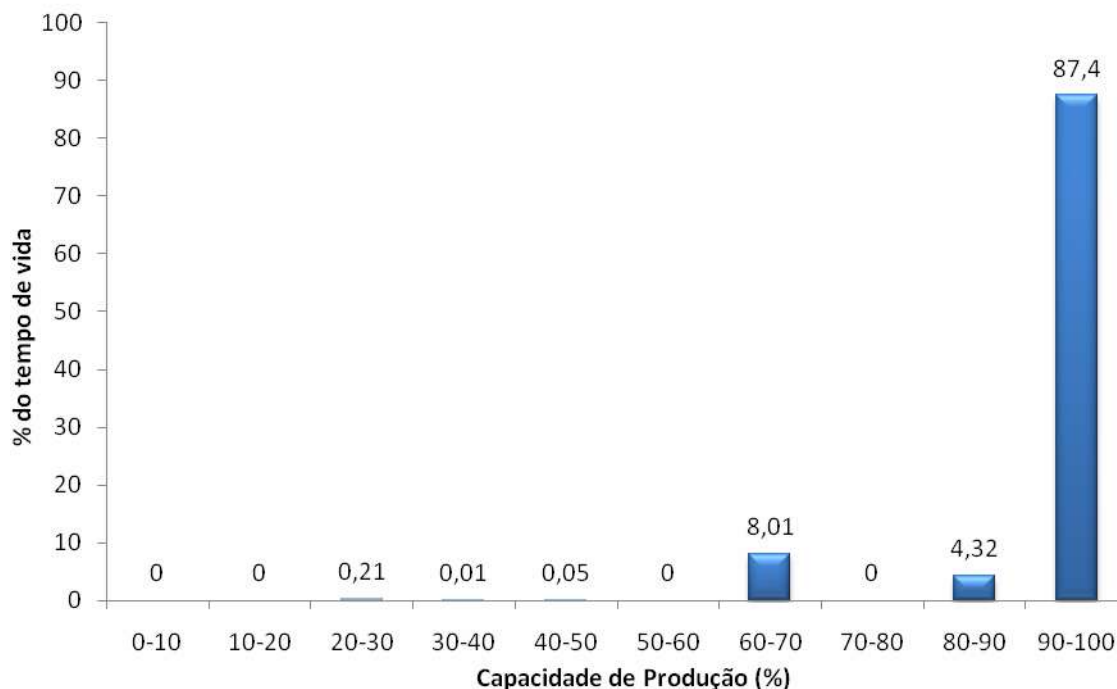


Figura 4-10 – Histograma da Produção da Alternativa 4

A Figura 4-10 mostra que, com a configuração da Alternativa 4, a Unidade de Geração de Vapor opera entre 90 e 100% da sua capacidade durante 87,4% do tempo. Porém, diferentemente das demais alternativas analisadas, o percentual de redução da capacidade de produção em faixas diferentes de 90 e 100% apresenta valores consideráveis. Observa-se que durante 8,01% do tempo de vida útil desta unidade, sua capacidade foi reduzida entre 60 e 70%, assim como em 4,32% do tempo, entre 80 e 90%. No restante do tempo, 0,27%, sua capacidade esteve entre 20 e 50% do total.

Na Figura 4-11 pode-se observar a distribuição da ocorrência de paradas da Alternativa 4 da Unidade de Geração de Vapor.

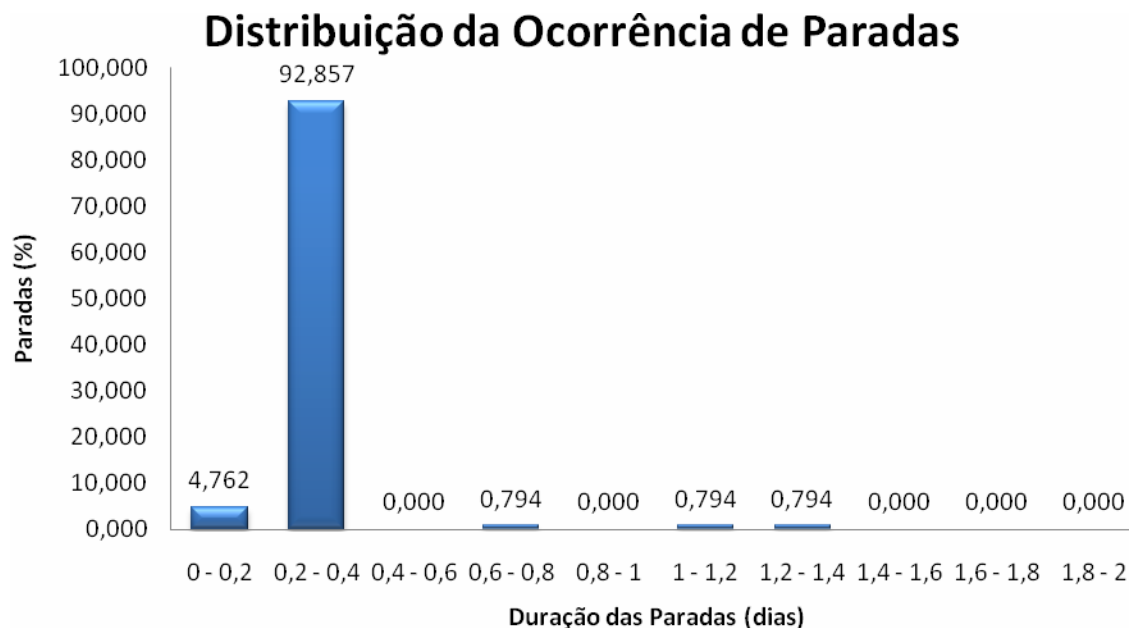


Figura 4-11 – Distribuição da Ocorrência de Paradas da Alternativa 4

As paradas desta Alternativa estão concentradas numa duração de 0,2 a 0,4 dia, pois somam 92,857% das paradas totais da unidade. Outras, com duração entre 0 e 0,2 dia representam 4,762% das paradas e cada um dos períodos de tempo de duração entre 0,6 e 0,8, 1,0 e 1,2, e 1,2 e 1,4 representa 0,794% do total.

Na Tabela 4-11 estão apresentadas as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Alternativa 4. Desta tabela pode-se verificar a perda relativa global e a perda absoluta.

Tabela 4-11– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência – Alternativa 4

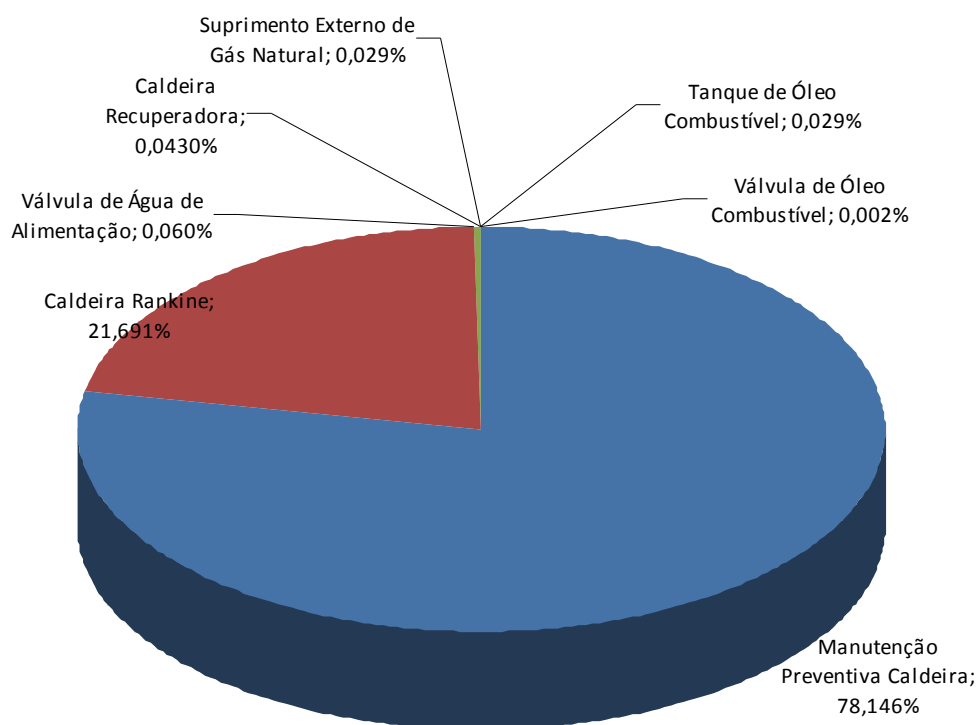
| Sistema | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa(%) |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| Caldeira | 4,182 | 100,000 |
| Geração de Energia | 0,000 | 0,000 |

Da Tabela 4-11 pode-se verificar que o sistema de caldeiras é o único responsável pelas paradas desta Alternativa, impactando em 100% da parada da unidade de geração de vapor. A Tabela 4-12 apresenta a perda absoluta e perda relativa dos componentes do sistema de caldeiras para a Alternativa 4. Os resultados estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-12.

Tabela 4-12– Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 4

| Equipamento | Perda Absoluta (%) | Perda Relativa (%) |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Manutenção Preventiva Caldeiras | 3,268 | 78,146 |
| Caldeiras Rankine | 0,907 | 21,691 |
| Válvulas de Água de Alimentação | 0,003 | 0,060 |
| Caldeiras Recuperadoras | 0,002 | 0,043 |
| Suprimento Externo de Gás Natural | 0,001 | 0,029 |
| Tanque de Óleo Combustível | 0,001 | 0,029 |
| Válvula de Óleo Combustível | 0,000 | 0,002 |
| Total | 4,182 | 100,000 |

Criticidade dos Elementos do Sistema Caldeiras

**Figura 4-12 – Criticidade dos equipamentos do sistema de caldeiras – Alternativa 4**

Analisando-se a Tabela 4-12 e a Figura 4-12, pode-se verificar que neste caso, as manutenções preventivas das caldeiras são responsáveis por 78,146% das perdas observadas, divergindo do que ocorre nas outras alternativas onde as próprias caldeiras são as principais responsáveis pelas perdas. Nesta Alternativa, as caldeiras Rankine impactam em aproximadamente 21,691% das perdas. As válvulas de

alimentação de água, as caldeiras recuperadoras e os demais elementos representam apenas 0,060%, 0,043% e 0,060% respectivamente.

Apesar da Alternativa 4 apresentar uma maior redundância no número de caldeiras, comparando-se com a Alternativa 1, verifica-se que houve uma perda de 3,808% no valor da eficiência produtiva. A justificativa para este resultado encontra-se principalmente na quantidade e duração das manutenções preventivas. Na Alternativa 1, onde o sistema é composto por três caldeiras, o tempo total de manutenções preventivas é de 1080 horas/ano, enquanto na alternativa 4 é de 1440 horas/ano. Uma segunda motivação para esta diferença reside na capacidade produtiva de 150% da Alternativa 1, frente a 120,83% da Alternativa 4.

Comparando-se a Alternativa 3 com a Alternativa 4 percebe-se que houve uma perda de 3,569% no valor da eficiência produtiva. Neste caso, uma menor redundância no número de turbo geradores da Alternativa 4 é o principal fator que explica este resultado. Além da capacidade produtiva da Alternativa 4, de 120,83%, ser menor do que a folga na capacidade produtiva da Alternativa 3 de 139,58%.

5 Conclusão

Os resultados de eficiência produtiva de cada uma das configurações analisadas para a Unidade de Geração de Vapor encontram-se resumidos na Tabela 5-1 e na Figura 5-1. Na Tabela 5-1 pode-se verificar uma comparação entre os valores de performance obtidos no fim da simulação de cada alternativa.

Tabela 5-1 - Resumo da Performance da Simulação da Unidade de Geração de Vapor

| Indicador | Alternativas | | | |
|--|--------------|------------|------------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Valores de Eficiência Produtiva (%) | 99,626 | 99,496 | 99,387 | 95,818 |
| Disponibilidade para Máxima Capacidade (%) | 99,263 | 98,529 | 97,762 | 87,399 |
| Produção de vapor (ton) por ano | 10.472.500 | 10.459.000 | 10.447.500 | 10.072.500 |
| Perda Média de Vapor (ton) por ano | 39.322 | 52.974 | 64.483 | 439.350 |
| Duração Total das Paradas (%) | 0,011 | 0,003 | 0,002 | 0,002 |
| Número Médio de Paradas por ano | 0,055 | 0,022 | 0,023 | 0,021 |
| Duração Média das Paradas (hrs) | 17,516 | 10,358 | 9,341 | 8,102 |
| Maior Duração de uma Parada (hrs) | 52,625 | 106,3 | 40,979 | 31,597 |
| Menor Duração de uma Parada (hrs) | 1,111 | 7,344 | 0,401 | 0,326 |

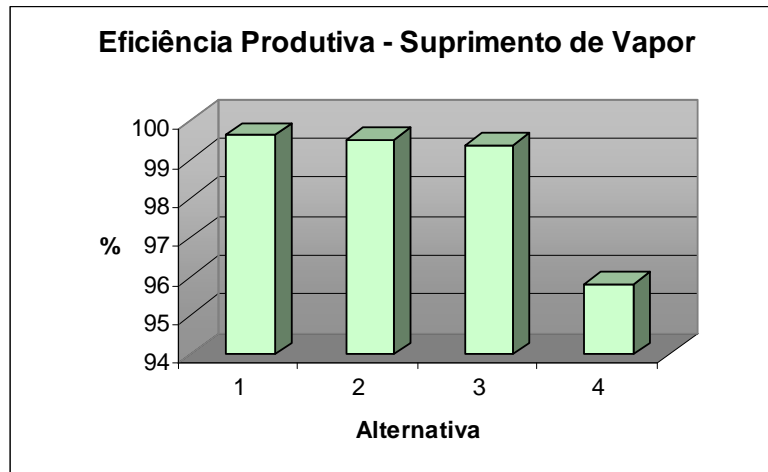


Figura 5-1 - Valores Comparativos das Eficiências Produtivas das Unidades de Geração de Vapor

A fase de projeto de um sistema é a etapa ideal para aplicação de uma análise de confiabilidade. Nessa fase é possível que se realize modificações necessárias com maior flexibilidade, diferentemente de quando o sistema já está com suas instalações em operação.

Analisando-se a Tabela 5-1 e a Figura 5-1 pode-se verificar que a alternativa que apresentou o maior valor de eficiência produtiva foi a Alternativa 1, apesar de, no geral, todas as alternativas apresentaram elevados valores de eficiência produtiva, variando de 95,818% – para a Alternativa 4 – a 99,626% – para a Alternativa 1. Isso representa uma diferença de 3,808% entre a pior e a melhor alternativa.

Os elevados valores de Eficiência Produtiva obtidos devem-se principalmente a grande folga de capacidade e as redundâncias encontradas em todas as configurações apresentadas. Analisando-se, por exemplo, a Alternativa 1, a qual resultou em eficiência produtiva de 99,626%, pode-se verificar que a mesma tem uma capacidade produtiva de aproximadamente 1800 toneladas de vapor/hora. Isso evidencia que a unidade pode operar somente com duas caldeiras e ainda assim suprir a demanda de vapor.

De uma forma geral, pode-se concluir que apesar da introdução de redundâncias nas caldeiras das alternativas 2, 3 e 4, houve perda de eficiência produtiva quando comparada a Alternativa 1 devido aos seguintes fatores:

- Folga na capacidade produtiva: a Alternativa 1 possui uma capacidade produtiva de 150% do consumo do vapor, enquanto a Alternativa 4, por exemplo, possui aproximadamente 121 % (equivalente a 3 milhões de t/ano);
- Aumento na quantidade e duração das manutenções preventivas: 1080h/ano na alternativa 1 para 1440h/ano nas demais (equivalente a aproximadamente 0,5 mês).

Levando em consideração o custo de cada unidade de geração de vapor, o investimento necessário para a implantação de um projeto deste porte, o tempo de retorno do investimento e a eficiência produtiva obtida neste estudo, pode-se concluir que a Alternativa 1 foi a melhor das alternativas. Isto porque, além de ser a mais eficiente, seu sistema é composto por um menor número de equipamentos (apenas 3 caldeiras frente aos demais sistemas que possuem 4), reduzindo todos os custos de implantação e tempo de retorno da mesma.

6 Referências Bibliográficas

1. FILHO, SALVADOR SIMÕES, **Análise de Árvore de Falhas considerando Incertezas na definição de Eventos Básicos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro/Curso de Doutorado.
2. BAZOVSKY, I., **Reliability Theory and Practice**, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1961
3. American Institute of Chemical Engineers, **Guidelines for Process Equipment Reliability Data**, AIChE, 1989
4. LEWIS, E. E., **Introduction to Reliability Engineering**, Wiley Interscience Publications, 2nd Edition, 1996
5. PIAZZA, G., **Introdução a Engenharia da Confiabilidade**, Caxias do Sul: EDUCS, 2000.
6. SMITH, DAVID J., **Reliability, Maintainability and Risk**. 5.ed. Massachusetts: Woburn, 2000. 234 p.
7. ANDREWS, J. D., MOSS, T. R., **Reliability and Risk Assessment**, 2 Ed.
8. GREEN, A. E., **Safety Systems Reliability**. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1983.
9. AMSTADTER, B., **Reliability Mathematics**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1971.
10. BARLOW, R. E. E PROSCHAN, F., **Mathematical Theory of Reliability**. Wiley, New York, EUA, 1965.
11. FRANKEL, E. G., **Systems Reliability and Risk Analysis**. Kluwer Academic Publishers, 2nd Edition, 1988.
12. JACOBS, I. M., **Reliability of Engineered Safety Features as a Function of testing Frequency**. Nuclear Safety, Vol 9, 1968.
13. HENLEY, E. J., **Reliability Engineering and Risk Assessment**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, EUA, 1981.
14. **MAROS Maintainability, Availability, Reliability and Operability Simulation Program**, Jardine Technology Limited, Glasgow, 2002.
15. <http://www.jardinetechology.com/home.htm>
16. OREDA, **Offshore Reliability Data Handbook**, 4a Edição, OREDA Participants, SINTEF Industrial Management, Norway, 2002.
17. NERC
18. http://www.qualimetria.ufsc.br/teses_arquivos/luis.pdf
19. http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2003_TR0103_0030.pdf

20. http://www.producao.uff.br/conteudo/rpep/volume52005/RelPesq_V5_2005_15.pdf
21. http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/port/boletim_tecnico/v41_n3-4_jul-dez-1998/pdf/art1integra.pdf
22. http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR580442_0041.pdf