



# **Análise de Confiabilidade de uma Unidade de Compressão de Gás Natural**

**Patrícia de Oliveira Mussel  
Patrícia Erthal Ribeiro Tavares**

## **Projeto de Final de Curso**

**Orientadores**

**Prof. Márcio Nele, D.Sc.**

**Ricardo Porto Cabete, Eng.**

**Março de 2008**

# ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UMA UNIDADE DE COMPRESSÃO DE GÁS NATURAL

***Patrícia de Oliveira Mussel***  
***Patrícia Erthal Ribeiro Tavares***

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. Daniel Weingart Barreto, D.Sc.

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

Orientado por:

---

Prof. Marcio Nele, D.Sc.

---

Ricardo Porto Cabete, Eng.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2008

Mussel, Patrícia de Oliveira e Tavares, Patrícia Erthal Ribeiro.

Análise de Confiabilidade de uma Unidade de Compressão de Gás Natural / Patrícia de Oliveira Mussel e Patrícia Erthal Ribeiro Tavares. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008. x, 56 p.; il.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008. Orientadores: Márcio Nele e Ricardo Porto Cabete.

1. Confiabilidade 2. Gás Natural 3. Análise de Sensibilidade 4. Projeto Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Márcio Nele e Ricardo Porto Cabete. I. Análise de Confiabilidade de uma Unidade de Compressão de Gás Natural

"Plante seu jardim e decore sua alma, ao invés de esperar que alguém lhe traga flores.

E você aprende que realmente pode suportar, que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais. E que realmente a vida tem valor e que você tem valor diante da vida!"

William Shakespeare

"Procure ser uma pessoa de valor, em vez de procurar ser uma pessoa de sucesso.

O sucesso é consequência."

Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos queridos pais, que sempre preencheram nossas vidas com carinho, alegria, compreensão, amor e apoio nos momentos mais difíceis. Eles que abriram as portas para o nosso futuro, fornecendo um ensino de qualidade, não medindo esforços para que obtivéssemos sucesso em mais uma etapa de nossas vidas.

Agradecemos também aos nossos namorados e irmãos, pelo amor dedicado, companheirismo, compreensão e incentivo, ao longo de todos esses anos. Obrigada pela demonstração constante de carinho e respeito, mesmo nas horas mais difíceis.

Agradecemos aos amigos de infância e àqueles que conquistamos ao longo desses anos de faculdade, sem os quais certamente essa tarefa teria sido muito mais árdua. Obrigada pela paciência, pelas infinitas horas de estudo em grupo e pelas palavras de apoio quando precisamos. Agradecemos ao nosso companheiro de trabalho, Rafael Nelson Abramovitch, pela ajuda e boa vontade, contribuindo para obtenção de melhores resultados neste trabalho.

Agradecemos ao professor Márcio Nele, que nos iniciou nos estudos desta especialidade e nos orientou na realização deste projeto, sempre paciente e disponível.

Agradecemos ao nosso amigo, companheiro de trabalho, e co-orientador Ricardo Porto Cabete, pelos conselhos, pela dedicação, pela compreensão e pelo empenho para que esta tarefa fosse bem sucedida.

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

## **CONFIABILIDADE DE PLANTAS QUÍMICAS**

Ao longo da história da engenharia o aumento do enfoque no conceito de confiabilidade surgiu como consequência natural da análise do insucesso, já que nenhum equipamento possui taxa de falha nula e que nenhuma atividade humana é isenta de risco. Sendo assim, fez-se necessária a utilização de uma tecnologia segura para otimização do risco.

Este trabalho teve por objetivo analisar a confiabilidade de uma Unidade de Compressão de Gás Natural, com o intuito de avaliar a redução da eficiência produtiva devido à perdas de produção. Para tal, utilizou-se a técnica de Diagrama de Blocos para a modelagem dos sistemas da unidade e a Simulação por Eventos Discretos para o cálculo da eficiência produtiva.

De acordo com os resultados obtidos, a parada programada é o evento que mais influencia nas perdas da unidade, seguida do Sistema de Baixa Pressão e Sistema de Média Pressão. Dentro dos referidos sistemas, verificou-se que os compressores são os componentes que mais influenciam nas perdas da unidade. A eficiência produtiva da configuração atual da unidade em questão (Caso Base) não atingiu a meta estabelecida nas premissas do presente estudo (99%).

Através da identificação dos pontos fracos do sistema foram propostas modificações para ampliação da eficiência produtiva, que chamamos de Análise de Sensibilidade. Foram propostas três alternativas, denominadas Caso A, B e C, e concluiu-se que o Caso C é o de maior interesse para a unidade de compressão de gás natural.

## ÍNDICE

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1	HISTÓRICO DA ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE	1
1.2	OBJETIVO	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
<b><u>2</u></b>	<b><u>ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE</u></b>	<b><u>4</u></b>
2.1	DEFINIÇÃO DE CONFIABILIDADE	4
2.1.1	TAXA DE FALHA	5
2.1.2	TEMPO MÉDIO ATÉ FALHAR (MEAN TIME TO FAILURE – MTTF)	7
2.1.3	TEMPO MÉDIO PARA REPARO (MEAN TIME TO REPAIR – MTTR)	8
2.1.4	TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (MEAN TIME BETWEEN FAILURE – MTBF)	9
2.2	INDICADORES DE CONFIABILIDADE	10
2.2.1	DISPONIBILIDADE E INDISPONIBILIDADE	11
2.2.2	EFICIÊNCIA PRODUTIVA	16
2.3	AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE	17
2.3.1	DIAGRAMA DE BLOCOS	17
2.3.2	SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS	21
<b><u>3</u></b>	<b><u>BASES PARA ANÁLISE</u></b>	<b><u>25</u></b>
3.1	UNIDADE DE COMPRESSÃO DE GÁS NATURAL	25
3.1.1	DEFINIÇÃO DO SISTEMA	25
3.1.2	PREMISSAS DA ANÁLISE	28
3.2	CONFIABILIDADE DA UNIDADE DE COMPRESSÃO DE GÁS NATURAL	30
3.2.1	DADOS DE TAXA DE FALHA	30
3.2.2	AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE POR DIAGRAMA DE BLOCOS	31
3.2.3	CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA	31
<b><u>4</u></b>	<b><u>RESULTADOS OBTIDOS</u></b>	<b><u>32</u></b>
4.1	CASO BASE	32
4.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	37
4.2.1	ALTERNATIVA CASO A	37
4.2.2	ALTERNATIVA CASO B	42
4.2.3	ALTERNATIVA CASO C	47
<b><u>5</u></b>	<b><u>CONCLUSÃO</u></b>	<b><u>54</u></b>
<b><u>6</u></b>	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b><u>56</u></b>

*Anexo A – Fluxograma de Processo*

*Anexo B – Diagrama de Blocos*

*Anexo C – Algoritmo para Simulação por Eventos Discretos no Excel*

*Anexo D – Planilhas de Excel*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA CONFIABILIDADE.....	2
FIGURA 2-1 – CURVA DA BANHEIRA .....	6
FIGURA 2-2– REPRESENTAÇÃO DO TEMPO DE REPARO .....	8
FIGURA 2-3– REPRESENTAÇÃO DE MTTF, MTTR E MTBF .....	10
FIGURA 2-4– EVOLUÇÃO TEMPORAL DO ESTADO DE UM COMPONENTE NÃO REPARÁVEL.....	12
FIGURA 2-5– INDISPONIBILIDADE DE UM COMPONENTE NÃO REPARÁVEL .....	13
FIGURA 2-6 – INDISPONIBILIDADE DE UM COMPONENTE TESTADO PERIODICAMENTE – EXPRESSÃO EXATA.....	14
FIGURA 2-7 – INDISPONIBILIDADE DE UM COMPONENTE TESTADO PERIODICAMENTE – EXPRESSÃO EXATA.....	14
FIGURA 2-8 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO ESTADO DE UM COMPONENTE MONITORADO REPARÁVEL .....	15
FIGURA 2-9 – RELAÇÃO ENTRE A QUANTIDADE REAL PRODUZIDA E A QUANTIDADE MÁXIMA (“NOMINAL”) POSSÍVEL DO SISTEMA OU DESEJADA.....	17
FIGURA 2-10 – DIAGRAMA DE BLOCOS PARA UM SISTEMA EM SÉRIE COM DOIS COMPONENTES .....	19
FIGURA 2-11 – DIAGRAMA DE BLOCOS PARA UM SISTEMA EM PARALELO COM DOIS COMPONENTES.....	20
FIGURA 2-12 – EXEMPLIFICAÇÃO DE UMA SIMULAÇÃO POR EVENTO DISCRETO.....	22
FIGURA 2-13 - SORTEIO DO TEMPO DE FALHA POR GERAÇÃO DE NÚMEROS RANDÔMICOS.....	23
FIGURA 2-14 - SORTEIO DO TEMPO DE FALHA POR GERAÇÃO DE NÚMEROS RANDÔMICOS.....	24
FIGURA 4-1 - EFICIÊNCIA PRODUTIVA ANUAL - CASO BASE.....	33
FIGURA 4-2 – CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS PARA PERDA DE EFICIÊNCIA PRODUTIVA – CASO BASE...	34
FIGURA 4-3 – CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE BAIXA PRESSÃO – CASO BASE .....	35
FIGURA 4-4 – CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE MÉDIA PRESSÃO – CASO BASE .....	36
FIGURA 4-5 – EFICIÊNCIA PRODUTIVA ANUAL - CASO A .....	39
FIGURA 4-6 – CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS PARA PERDA DE EFICIÊNCIA PRODUTIVA – CASO A .....	40
FIGURA 4-7 – CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS NO SISTEMA DE BAIXA PRESSÃO – CASO A .....	41
FIGURA 4-8 – EFICIÊNCIA PRODUTIVA ANUAL - CASO B .....	44
FIGURA 4-9 – CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS PARA PERDA DE EFICIÊNCIA PRODUTIVA - CASO B .....	45
FIGURA 4-10– CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS NO SISTEMA DE MÉDIA PRESSÃO - CASO B .....	46
FIGURA 4-11 – EFICIÊNCIA PRODUTIVA ANUAL - CASO C.....	49
FIGURA 4-12 – CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS NA PERDA DE EFICIÊNCIA PRODUTIVA - CASO C.....	50
FIGURA 4-13 – BENEFÍCIO E CUSTO ANUAL DE CADA SUGESTÃO DA UNIDADE DE COMPRESSÃO .....	51
FIGURA 4-14– VOLUME PROCESSADO, PERDIDO E EFICIÊNCIA MÉDIA DA UNIDADE DE COMPRESSÃO DE GÁS NATURAL.....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1-1- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	3
TABELA 3-1- COMPONENTES DE CADA SISTEMA DA UNIDADE DE COMPRESSÃO DE GÁS NATURAL.....	27
TABELA 3-2 – PREÇOS DOS COMPONENTES DA UNIDADE DE COMPRESSÃO* .....	30
TABELA 3-3- DADOS DE FALHA E REPARO DOS COMPONENTES DA UNIDADE .....	31
TABELA 4-1 – RESULTADOS - CASO BASE.....	32
TABELA 4-2– CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS PARA PERDA DE EFICIÊNCIA POR SISTEMA – CASO BASE	33
TABELA 4-3– CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE BAIXA PRESSÃO – CASO BASE.....	35
TABELA 4-4 – CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE MÉDIA PRESSÃO.....	36
TABELA 4-5– RESULTADOS - CASO A .....	38
TABELA 4-6 – CONTRIBUIÇÃO PARA PERDA DE EFICIÊNCIA POR SISTEMA – CASO A.....	39
TABELA 4-7– RESULTADOS - CASO B .....	43
TABELA 4-8 – CONTRIBUIÇÃO PARA PERDA DE EFICIÊNCIA POR SISTEMA – CASO B.....	44
TABELA 4-9 – RESULTADOS - CASO C .....	48
TABELA 4-10 – CONTRIBUIÇÃO PARA PERDA DE EFICIÊNCIA POR SISTEMA – CASO C .....	49
TABELA 4-11 – RESULTADOS DOS CASOS PROPOSTOS .....	53

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Histórico da Engenharia da Confiabilidade<sup>[1,3]</sup>

Os primeiros conceitos da engenharia de confiabilidade surgiram no início do século XX. Até o surgimento destes novos conceitos, a questão da confiabilidade dos equipamentos era resolvida através do uso de fatores de segurança excessivamente caros e por uma filosofia do tipo “projetar-testar-reprojetar”. Esse procedimento de testes e reparos tornou-se inviável com o surgimento de equipamentos cada vez mais caros e complexos.

Através da expansão da indústria aeronáutica uma amostragem suficiente de dados de falhas foi disponibilizada, visto que as viagens tornaram-se mais freqüentes, possibilitando a determinação da confiabilidade dos sistemas utilizando-se um número médio de taxa de falhas. Essa nova visão difundiu-se no decorrer da década de 30.

Com o passar dos anos, a segurança tornou-se essencial ao desenvolvimento de qualquer empreendimento. Devido a este fato, durante a década de 40, níveis de segurança requeridos passaram a ser expressos na forma de taxas de falhas aceitáveis. A Segunda Guerra Mundial desencadeou a formulação de uma teoria quantitativa de confiabilidade de sistemas a partir do projeto de construção dos mísseis V1 e V2.

O próximo setor a implementar esses conceitos foi o setor militar norte-americano, na década 50. A necessidade de aumentar a disponibilidade dos equipamentos militares mostrava a importância da confiabilidade do ponto de vista de custo e manutenção.

A engenharia da confiabilidade começou a ser amplamente utilizada na maioria das indústrias durante a década de 60. Na indústria eletrônica estes conceitos eram utilizados a fim de fornecer ao usuário um produto mais confiável e conseqüentemente aumentar o volume de vendas. Na indústria nuclear a finalidade era minimizar os riscos de acidentes em suas instalações. Já as indústrias química e petroquímica começaram a utilizar intensamente tais conceitos em meados dos anos 70, objetivando a melhoria da eficiência produtiva e o aumento da segurança de suas plantas.

No Brasil, a aplicação da engenharia de confiabilidade começou a ganhar força a partir da década de 80, inicialmente, em algumas aplicações no setor nuclear, e

posteriormente em vários setores industriais, como, por exemplo, nos setores de óleo e gás, químico e petroquímico.

A crescente cobrança da sociedade em relação à segurança dos trabalhadores, a necessidade de um mínimo de qualidade dos produtos adquiridos e a consciência ambiental refletem no aumento da preocupação com a questão da confiabilidade em proporções globais. A Figura 1-1 ilustra a evolução da história da Engenharia de Confiabilidade.



Figura 1-1 – Evolução Histórica da Confiabilidade

## 1.2 Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo analisar os índices de confiabilidade de uma Unidade de Compressão de Gás Natural, responsável pelo abastecimento de uma Unidade de Produção de Gás Natural (UPGN).

O principal índice de confiabilidade analisado neste estudo foi a eficiência produtiva devido a paradas ou redução da capacidade dos equipamentos da unidade que comprometam o abastecimento da UPGN. Para tanto, utilizou-se a técnica de Diagrama de Blocos a fim de se representar a lógica da unidade, e a metodologia de simulação por eventos discretos para se determinar a eficiência produtiva da mesma. Posteriormente realizou-se uma análise econômica de projetos alternativos e constatou-se a influência dos diversos equipamentos e componentes do sistema na redução da produtividade da unidade.

### 1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho foi estruturado em seis capítulos, conforme apresentado na Tabela 1-1. No Capítulo 2 é definida a Confiabilidade, seus indicadores e as técnicas existentes para sua quantificação e avaliação. O estudo de caso é descrito no Capítulo 3, abrangendo a descrição da unidade e a avaliação da confiabilidade da mesma. No Capítulo 4 encontram-se detalhados os resultados obtidos nas alternativas propostas através da análise de sensibilidade realizada no Capítulo anterior. Finalmente, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas nesse projeto e no Capítulo 6 as referências bibliográficas. O Anexo A apresenta o Fluxograma de Processo da unidade analisada, o Anexo B o Diagrama de Blocos e o Anexo C a planilha de Excel utilizada para o cálculo da confiabilidade.

**Tabela 1-1- Organização do Trabalho**

<b>ÍTEM</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
CAPÍTULO 1	Introdução
CAPÍTULO 2	Engenharia de Confiabilidade
CAPÍTULO 3	Estudo de Caso
CAPÍTULO 4	Resultados Obtidos
CAPÍTULO 5	Conclusões
CAPÍTULO 6	Referências Bibliográficas
ANEXO A	Fluxograma de Processo
ANEXO B	Diagrama de Blocos
ANEXO C	Algoritmo para Simulação por Eventos Discretos no Excel
ANEXO D	Planilhas de Excel

## 2 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

### 2.1 Definição de Confiabilidade<sup>[1,3,4,16]</sup>

Confiabilidade é a probabilidade de que um sistema, subsistema ou componente desempenhe com sucesso suas funções específicas, durante um período de tempo determinado, sob condições também determinadas.

A definição mais formal e completa de confiabilidade é: a probabilidade condicional, para um dado nível de confiança, que um equipamento irá executar suas funções planejadas satisfatoriamente sem falhas, com limites especificados de desempenho, para uma dada idade, para um intervalo de tempo especificado, ou tempo de missão, quando usado da maneira e para o propósito planejado, enquanto operando de uma maneira específica, sob uma determinada solicitação ambiental.

O fato de ser definida como uma probabilidade significa que a confiabilidade pode ser expressa quantitativamente, assumindo valores compreendidos entre 0 e 1. A utilização deste conceito probabilístico na prática da engenharia da confiabilidade implica no reconhecimento explícito, tanto do projetista como da parte da gerência, de que é impossível projetar-se um sistema inteiramente à prova de falha, mas que a sua probabilidade de falha pode ser tornada tão pequena quanto se queira.

A confiabilidade refere-se, portanto, à probabilidade acumulada de que o equipamento não sofra uma falha desde  $t=0$  até o instante final da missão de interesse. Vê-se, então, que a capacidade de se reparar o equipamento e colocá-lo novamente em funcionamento não tem influência sobre a sua “confiabilidade”, de acordo com a definição apresentada acima.

A confiabilidade de um componente pode ser expressa pela Equação 2.1:

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

Adotando-se a premissa de que todos os componentes do sistema de compressão 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:

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

onde  $\lambda$  é a taxa de falhas do componente. Além da consideração de taxa de falhas constante com o tempo, considera-se que o componente está funcionando perfeitamente no início da missão, ou seja:

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

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.

As condições de operação devem ser claramente indicadas, uma vez que o mesmo equipamento pode ter valores de confiabilidade distintos dependendo das condições de operação a que está submetido. A experiência tem mostrado que condições operacionais, tais como, temperatura, umidade, pressão, choque, vibração, voltagem, torque, atmosfera corrosiva e outros, podem causar grandes impactos sobre o desempenho dos equipamentos.

### 2.1.1 Taxa de Falha

Antes de apresentar os indicadores de confiabilidade é essencial que o conceito de falha esteja definido e entendido de forma completa.

Falha pode ser definida como uma não conformidade de um critério de desempenho definido, como a cessão da função de um item ou como a incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto. A ocorrência de falha é um fenômeno que compromete o desempenho ou impossibilita a interpretação de um item, que é definido como qualquer parte, componente, dispositivo, sistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente. As falhas podem ocorrer por algum erro de projeto, envelhecimento ou desgaste de um equipamento.

A taxa de falha é a taxa em que cada falha ocorre no tempo. Uma distribuição acumulada  $F(t)$  é descrita para obter uma estimativa da proporção total de itens que falham ao longo do tempo até a falha do último item.

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

onde  $R(t)$  é a confiabilidade, já definida no item 2.1.

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

A curva que representa a taxa de falha em relação à idade de um equipamento é conhecida como Curva da Banheira (Figura 2-1) devido a sua forma. Ela representa o comportamento ao longo da sua vida sendo construída a partir de estudos estatísticos.

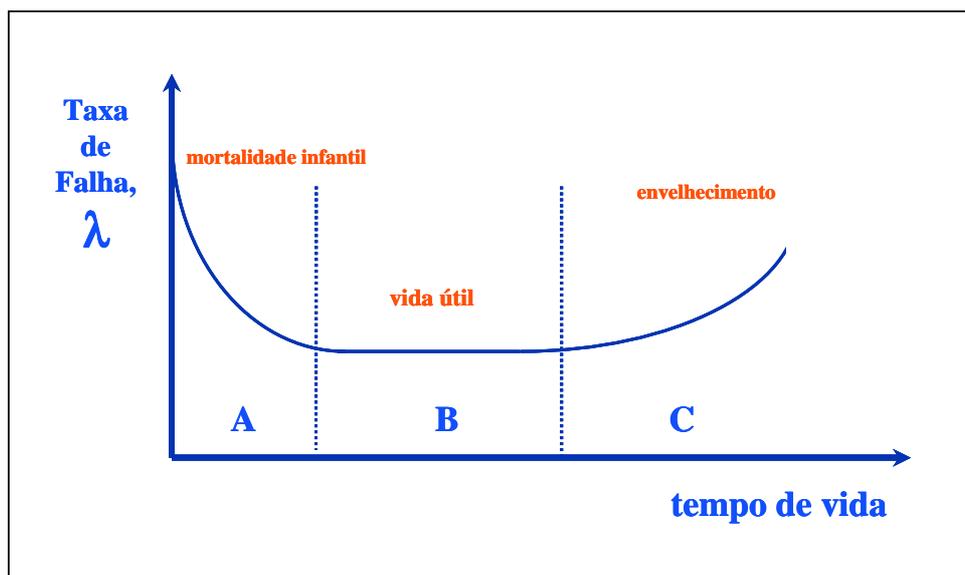


Figura 2-1 – Curva da Banheira

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

➤ *Estágio A – amaciamento ou mortalidade infantil*

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, ou “*burn in*”, 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*

A incidência de falhas é relativamente estável no tempo. A ocorrência de falhas advém de fatores aleatórios e, portanto, menos controláveis, como fadiga por sobrecarga e aumentos na temperatura e umidade durante a operação normal das unidades. Esse estágio se caracteriza pela dificuldade de predição.

➤ *Estágio C – desgaste ou envelhecimento*

No terceiro estágio da curva da banheira, a taxa de falha 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 passa o tempo. Uma das alternativas utilizadas para amenizar a intensidade do envelhecimento é a realização de projetos de produtos com componentes e materiais mais duráveis.

Em 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 A. Além disso, as práticas de parada programada e corretiva têm por objetivo 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 C.

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.

### **2.1.2 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. O tempo médio até falhar, MTTF (do inglês Mean Time To Failure), é o tempo médio esperado de operação do sistema antes da ocorrência do primeiro defeito.

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.

$$MTTF = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N} \quad (2.5)$$

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

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.6)$$

Assim, com o valor do MTTF pode-se calcular a taxa de falhas do componente a partir da Equação 2.6.

### 2.1.3 Tempo Médio para Reparo (Mean Time To Repair – MTTR)

Para 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.

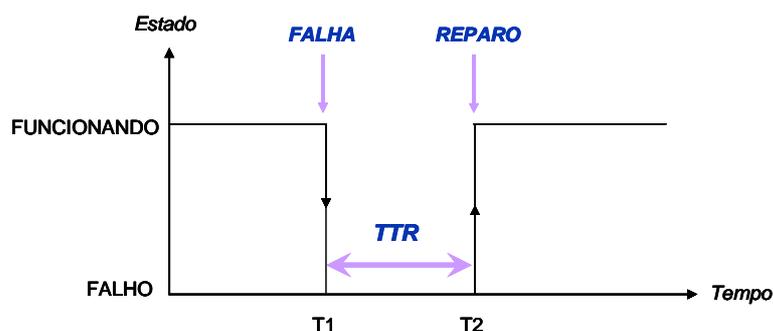


Figura 2-2– Representação do tempo de reparo

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,  $\mu$ , 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:

$$G(t) = e^{-\mu t} \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{1}{\mu} \quad (2.8)$$

onde  $\tau$  é o tempo médio de reparo, também chamado MTTR (do inglês, Mean Time To Repair), que corresponde ao valor médio da variável aleatória “tempo 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.

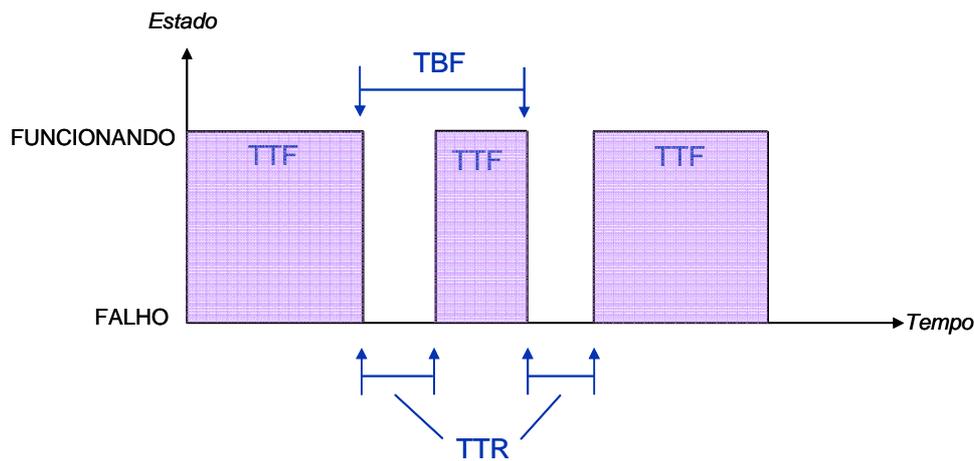
#### 2.1.4 Tempo Médio entre Falhas (Mean Time Between Failure – MTBF)

O período médio entre falhas, denominado MTBF (Mean Time Between Failures) é um valor atribuído a um determinado equipamento para descrever a sua confiabilidade. Este valor atribuído indica quando poderá ocorrer uma falha no equipamento e quanto maior for este índice maior será a confiabilidade do equipamento.

O MTBF é representado por  $\theta$  e pela relação:

$$\theta = \frac{1}{\lambda} \quad (2.9)$$

A partir da ilustração apresentada na Figura 2-3, podemos encontrar uma relação entre MTTF, MTTR e MTBF.



**Figura 2-3– Representação de MTTF, MTTR e MTBF**

TTF = Tempo até Falhar

MTTF = Valor Médio dos TTF

TTR = Tempo de Reparo

MTTR = Valor Médio dos TTR

TBF = Tempo entre Falhas

MTBF = Valor Médio dos TTF

Pode-se concluir a partir da Figura 2-3 que:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2.10)$$

Comumente, nos bancos de dados de falhas existentes, os dados são fornecidos sob a forma de taxa de falhas, tal como mostrado na Tabela 3-3. No entanto, os fabricantes tendem a fornecer dados sob a forma de MTTF ou MTBF (Mean Time Between Failures). Embora exista uma diferença conceitual entre esses dois termos, numericamente eles são muito parecidos, sendo praticamente iguais na grande maioria das vezes.

## 2.2 Indicadores de Confiabilidade

Além das definições apresentadas no item 2.1, existem outras formas de expressar a noção de confiabilidade de um equipamento, as quais dependem dos objetivos da análise que estiver sendo realizada. Em conseqüência, os resultados quantitativos podem ser expressos de formas distintas, que são apresentadas a seguir.

### 2.2.1 Disponibilidade e Indisponibilidade

Disponibilidade ( $A(t)$ , do inglês Availability) é a capacidade de um item estar em condições de executar certa 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.

Quando o interesse da análise é saber a probabilidade de que um dado equipamento funcione no instante em que for necessário ou determinar qual fração de um dado período de tempo no qual o equipamento estará operacional, o indicador de interesse é a disponibilidade instantânea do equipamento e a disponibilidade média no período, respectivamente. Disponibilidade instantânea de um equipamento é a probabilidade de que o mesmo funcione com sucesso no instante em que for demandado e disponibilidade média de um equipamento em um determinado período de tempo é a fração do período durante o qual o componente funciona com sucesso.

Os conceitos de disponibilidade média no intervalo de tempo  $T$  e disponibilidade estacionária ou assintótica têm sido muito utilizados na solução de problemas práticos, e são definidos, respectivamente, por:

$$A_{med}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.11)$$

$$A_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (2.12)$$

Para um componente ou sistema que tenha somente dois estados possíveis, *funcionando* ou *falho*, podemos definir sua indisponibilidade,  $Q(t)$ , como:

$$Q(t) = 1 - A(t) \quad (2.13)$$

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

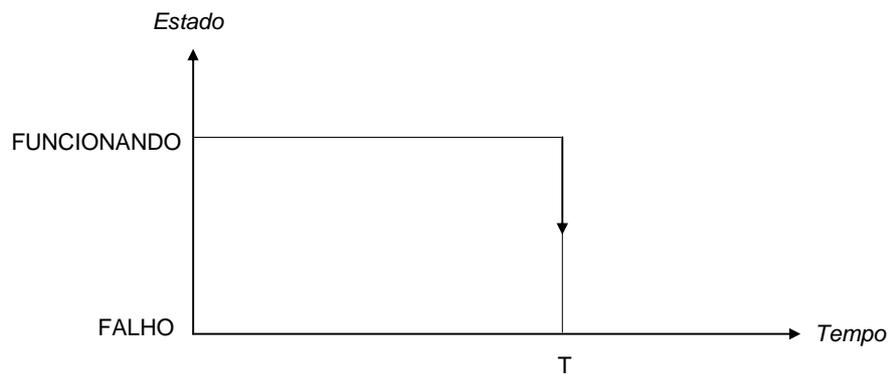
Indisponibilidade instantânea é a probabilidade de um item não ser capaz de desempenhar uma função requerida sob dadas condições, em um dado instante, supondo-se que os recursos externos tenham sido providos.

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, ao sofrerem uma transição do estado *funcionando* para o estado *falho*, 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 2-4:



**Figura 2-4– Evolução temporal do estado de um componente não reparável**

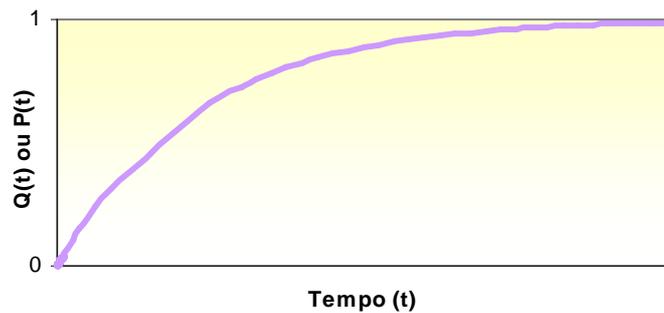
Se o componente sofrer uma falha antes de chegar a  $t$ , então, podemos garantir que estará no estado *falho* em  $t$  (portanto, indisponível), pois não pode ser reparado após a falha. Assim, podemos escrever:

$$Q(t) = P(t) \quad (2.14)$$

Portanto, para componentes não reparáveis:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.15)$$

Como pode ser visto na Figura 2-5, para um tempo suficientemente longo, a indisponibilidade do componente tenderá a 1.



**Figura 2-5– Indisponibilidade de um componente não reparável**

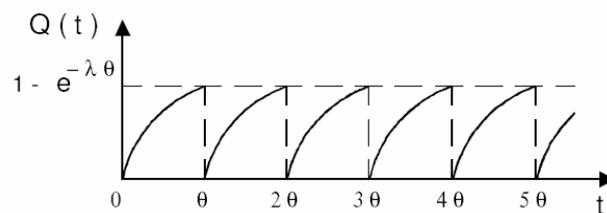
Cabe ressaltar que a condição de “não reparabilidade” não é uma característica intrínseca do componente, mas sim uma condição imposta pelo tipo de análise que está sendo realizada. É importante observar que quando falamos em reparo do componente, não nos limitamos simplesmente à possibilidade de recuperação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

➤ *Componentes Testados Periodicamente*

Os componentes testados periodicamente também são denominados componentes sujeitos a mudanças de estado parcialmente reversíveis. Eles são típicos de sistemas de segurança e não operam durante a maior parte do tempo, sendo demandados em caso de uma contingência. 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.

Desta forma, se nada for feito, a avaliação da indisponibilidade do sistema segue a mesma evolução temporal dos componentes não reparáveis mostrada na Figura 2-5. 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  $\theta$ ,  $2\theta$ ,  $3\theta$ , etc. Considerando que uma falha do componente somente pode ser detectada no instante de cada teste, então podemos 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. Na Figura 2-6 mostramos um gráfico da indisponibilidade,  $Q(t)$ , em função do tempo, onde se encontra a representação gráfica da expressão exata da indisponibilidade.



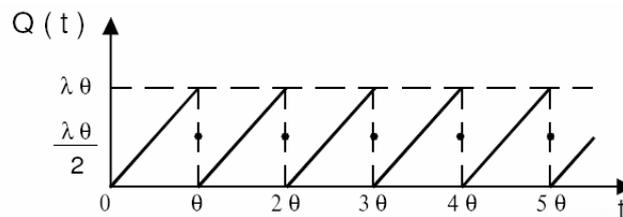
**Figura 2-6 – Indisponibilidade de um componente testado periodicamente – expressão exata**

Desta forma, para um determinado intervalo entre testes, pode-se escrever:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2.16}$$

$$Q_{med}(\theta) = 1 - \frac{1}{\lambda \theta} (1 - e^{-\lambda \theta}) \tag{2.17}$$

Na Figura 2-7, encontra-se a representação da correspondente expressão aproximada, válida pra  $\lambda\theta \ll 1$ .



**Figura 2-7 – Indisponibilidade de um componente testado periodicamente – expressão exata**

Sendo assim, para  $\lambda\theta \ll 1$ , tem-se:

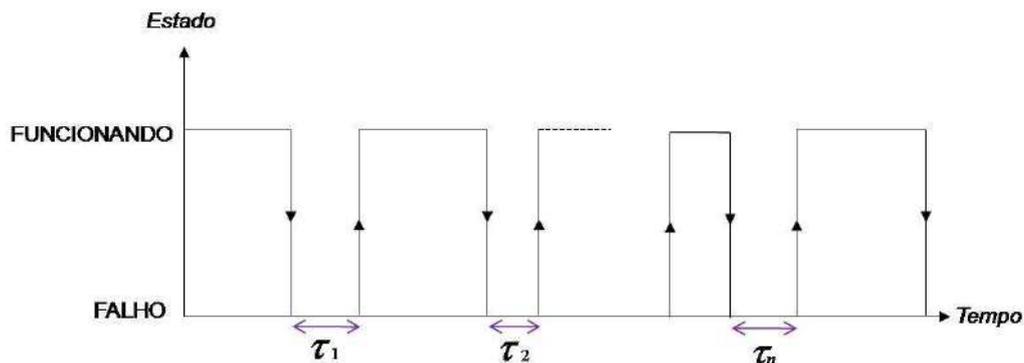
$$Q(t) = \lambda t \tag{2.18}$$

$$Q_{med}(\theta) = \frac{\lambda\theta}{2} \quad (2.19)$$

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 também são denominados componentes sujeitos a mudanças de estado reversíveis. Esta designação aplica-se a 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. Na prática, esta situação é usada para modelar componentes que operem continuamente e possuam um alto grau de monitoração. A evolução temporal do estado de um componente deste tipo é mostrada na Figura 2-8.



**Figura 2-8 – Evolução temporal do estado de um componente monitorado reparável**

Considerando um componente reparável, com taxa de falhas  $\lambda$  e taxa de reparos  $\mu$ , ambas consideradas constantes, pode-se mostrar que a sua indisponibilidade instantânea é dada por:

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}] \quad (2.20)$$

Aplicando-se as Equações 2.19 e 2.20 para a indisponibilidade, temos:

$$Q_{med}(T) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 T} [1 - e^{-(\lambda + \mu)T}] \quad (2.21)$$

$$Q_{\infty} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.22)$$

Da Equação 2.8 vemos que a taxa de reparo é o inverso do tempo médio de reparo, portanto, a Equação 2.22 pode ser reescrita como:

$$Q_{\infty} = \frac{\lambda\tau}{1 + \lambda\tau} \cong \lambda\tau \text{ se } \lambda\tau \ll 1 \quad (2.23)$$

Sabendo-se que:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (2.24)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (2.25)$$

Substituindo as Equações 2.24 e 2.25 na equação 2.22, podemos obter uma expressão alternativa para  $Q_{\infty}$  muito citada na literatura:

$$Q_{\infty} = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} \quad (2.26)$$

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.

### 2.2.2 Eficiência Produtiva

A Eficiência Produtiva é um dos principais indicadores de desempenho para comparação entre as alternativas analisadas. 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).

A eficiência média produtiva é avaliada pela relação entre a produção realizada e a produção prevista pela curva de produção, ou seja:

$$\text{Eficiência Produtiva} = \frac{\text{Produção Realizada}}{\text{Produção Potencial}} \times 100\% \quad (2.27)$$

A produção postergada é igual a 100% menos a eficiência produtiva.

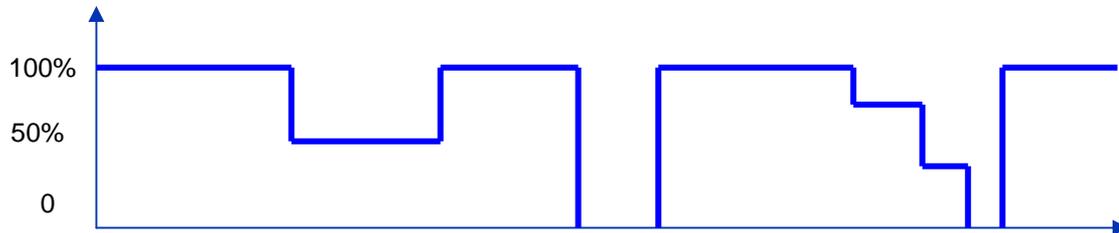


Figura 2-9 – Relação entre a quantidade real produzida e a quantidade máxima (“nominal”) possível do sistema ou desejada

### 2.3 Avaliação de Confiabilidade<sup>[1,2,3,4]</sup>

A aplicação de técnicas de engenharia de confiabilidade constitui 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. Dentre as diversas técnicas de análise de confiabilidade existentes, pode-se destacar: Diagrama de Blocos, Árvore de Falhas, Cadeias de Markov, Simulação de Monte Carlo.

No presente estudo, a avaliação da confiabilidade do sistema foi realizada através da análise da Eficiência Produtiva, que é um de seus indicadores mais importantes.

Através da técnica de diagrama de blocos é possível se representar a lógica de funcionamento do sistema bem como se calcular a confiabilidade do mesmo para um determinado tempo de missão. No entanto, através desta técnica não é possível se calcular a eficiência produtiva da unidade bem como se observar todas as nuances do sistema, como por exemplo, a influência de equipamentos cujas perdas não causam a parada total da unidade e do tempo de reparo dos mesmos.

Sendo assim, optou-se por se utilizar a técnica de simulação por eventos discretos para se calcular a eficiência produtiva da unidade. Esta técnica, permite que se observem todas as nuances do sistema, tais como, a influência de perdas parciais, dos tempos de reparo, entre outras. Desta forma, no presente estudo optou-se por

utilizar-se a metodologia de Diagrama de Blocos para a modelagem da unidade e a técnica de simulação por eventos discretos para a análise de confiabilidade.

### **2.3.1 Diagrama de Blocos**

A modelagem foi realizada utilizando-se a técnica de diagrama de blocos. Esta técnica identifica os principais elementos de cada sistema e os relacionamentos entre estes através de configurações série, paralelo.

Entretanto, cabe ressaltar que 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 Análise de Sistemas**

Um sistema é constituído de blocos funcionais que são interligados de forma a realizar um conjunto de funções com desempenho e medidas de confiabilidade aceitáveis. Blocos funcionais podem representar componentes individuais ou sistema, dependendo das condições estabelecidas para o 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, dois pontos devem ser abordados:

- 1) Quais componentes do sistema devem ser incluídos na análise;
- 2) O nível de detalhe em que esses componentes serão representados, o qual depende das informações disponíveis relativas à confiabilidade de suas partes componentes e dos objetivos do estudo.

Como já visto anteriormente, no presente trabalho utilizou-se a técnica de diagrama de blocos, que é a forma mais difundida de representação estrutural. Tal diagrama oferece uma representação gráfica da forma como os componentes do sistema estão conectados entre si.

Na representação de um sistema com  $n$  componentes, cada componente é ilustrado por um bloco. Dessa forma, sempre que existir uma conexão entre os pontos extremos do bloco, diz-se que o componente  $i$  está funcionando, o que não inclui todas as suas

formas de funcionamento, mas uma forma ou conjunto de formas pré-especificado (ou seja, alguns modos de falha pré-especificados de  $i$  não ocorrem). A definição das formas de funcionamento de um componente pode gerar múltiplas representações do componente e, por conseqüência, do sistema a que ele pertence.

O diagrama de blocos de um sistema apresenta a forma em que os  $n$  componentes do sistema estão interconectados de forma a proporcionar o funcionamento do sistema. Sempre que existir uma conexão entre os pontos extremos do bloco, diz-se que uma função específica do sistema é atingida.

Na análise de confiabilidade, o sistema e seus componentes são analisados em um tempo  $t$  específico. Desta forma, pressupõem-se componentes que seguem uma distribuição de probabilidade com parâmetros conhecidos, tal que suas confiabilidades podem ser determinadas no tempo  $t$  de interesse.

Uma segunda suposição importante diz respeito ao estado dos componentes do sistema no momento da análise. Nas seções que seguem, componentes e sistemas estão operantes (ou seja, funcionando) ou inoperantes.

### 2.3.1.2 Sistemas em Série

Um sistema é dito em série quando o funcionamento de todos os seus componentes é essencial para o funcionamento do sistema. Neste caso, a falha de um componente 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  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , é representado pelo diagrama de blocos indicado na Figura 2-10.



**Figura 2-10 – 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 2.28.

$$R_{ss}(t) = R_1(t) \times R_2(t) \quad (2.28)$$

onde:

$$R_1(t) = e^{-\lambda_1 t} \quad (2.29)$$

$$R_2(t) = e^{-\lambda_2 t} \quad (2.30)$$

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

$$R_{SS}(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (2.31)$$

Generalizando para um sistema de  $n$  componentes em série, obtemos:

$$R_{SS}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) dt = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t} \quad (2.32)$$

Pela Equação 2.33 obtêm-se o MTTF para esse sistema.

$$MTTF_{SS} = \int_0^{\infty} R_{SS}(t) dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2.33)$$

Assim, observa-se que aumentando o número de componentes num sistema em série, o MTTF diminui, ou seja, o sistema tende a falhar mais cedo.

### 2.3.1.3 Sistemas em Paralelo

Um sistema é dito em paralelo quando todos os componentes devem falhar para que o sistema falhe. Um sistema constituído de dois componentes em paralelo, cujas taxas de falha são  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , é representado pelo diagrama de blocos indicado na Figura 2-11.

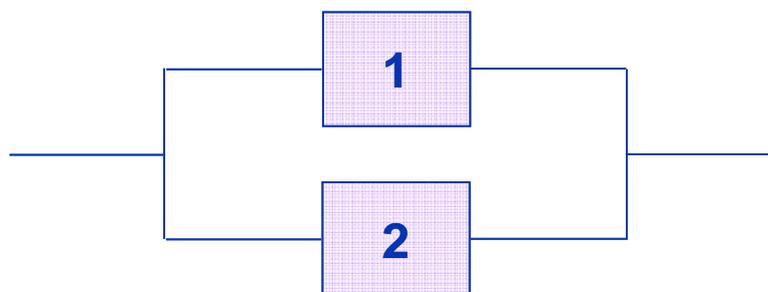


Figura 2-11 – Diagrama de Blocos para um sistema em paralelo com dois componentes

A confiabilidade do sistema até o instante  $t$  é dada por:

$$R_{SP}(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t) \quad (2.34)$$

Substituindo as Equações 2.29 e 2.30 na Equação 2.34, obtemos a Equação 2.35.

$$R_{SP}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.35)$$

Generalizando, para um sistema de  $n$  componentes em paralelo, obtemos a Equação 2.36.

$$R_{SP}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (2.36)$$

O MTTF para este sistema pode ser obtido integrando-se por partes a Equação 2.36. Para um sistema com dois componentes em paralelo, o MTTF é dado por:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (2.37)$$

#### 2.3.1.4 Sistemas K-de-N

Um sistema K-de-N é aquele constituído por  $N$  componentes, de modo que o sistema funciona se, pelo menos,  $K$  de seus componentes funcionarem. Os sistemas em série e em paralelo são casos particulares, onde  $K=N$  e  $K=1$ , respectivamente.

Para o caso de  $N$  componentes idênticos e independentes, com taxas de falha iguais a  $\lambda$ , a confiabilidade do sistema é dada por:

$$R_{K-N}(t) = \sum_{i=K}^N C_N^i [R(t)]^i [1 - R(t)]^{N-i} \quad (2.38)$$

Onde  $C_N^i$  representa a combinação de  $N$  em  $i$ , ou seja:

$$C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!} \quad (2.39)$$

O MTTF desse sistema é dado por:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} \left(\frac{1}{i}\right) \quad (2.40)$$

### 2.3.2 Simulação por Eventos Discretos

Um evento pode ser definido como uma ocorrência fundamental na vida de um sistema, que determina sua habilidade de gerar um produto desejado. Os eventos são obtidos através dos dados do elemento analisado, usando técnicas de amostragem aleatória. O evento foi descrito, na simulação realizada, em termos de distribuições exponenciais de falha e de reparo.

O princípio básico desta simulação é o da geração de eventos discretos através de um modelo computacional, que busca criar um cenário realista da vida dos componentes de um sistema. Uma simulação por eventos discretos é uma modelagem do comportamento dinâmico de todo o sistema através da descrição de seus estados e da alteração destes em função da ocorrência de eventos.

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. Desta forma, 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 2-12.

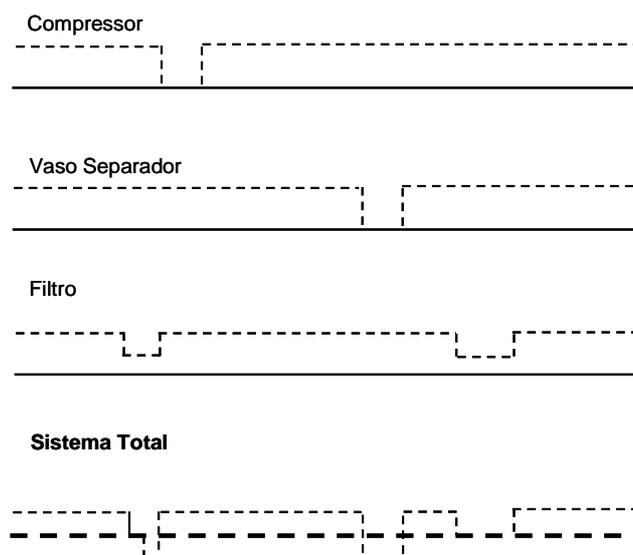


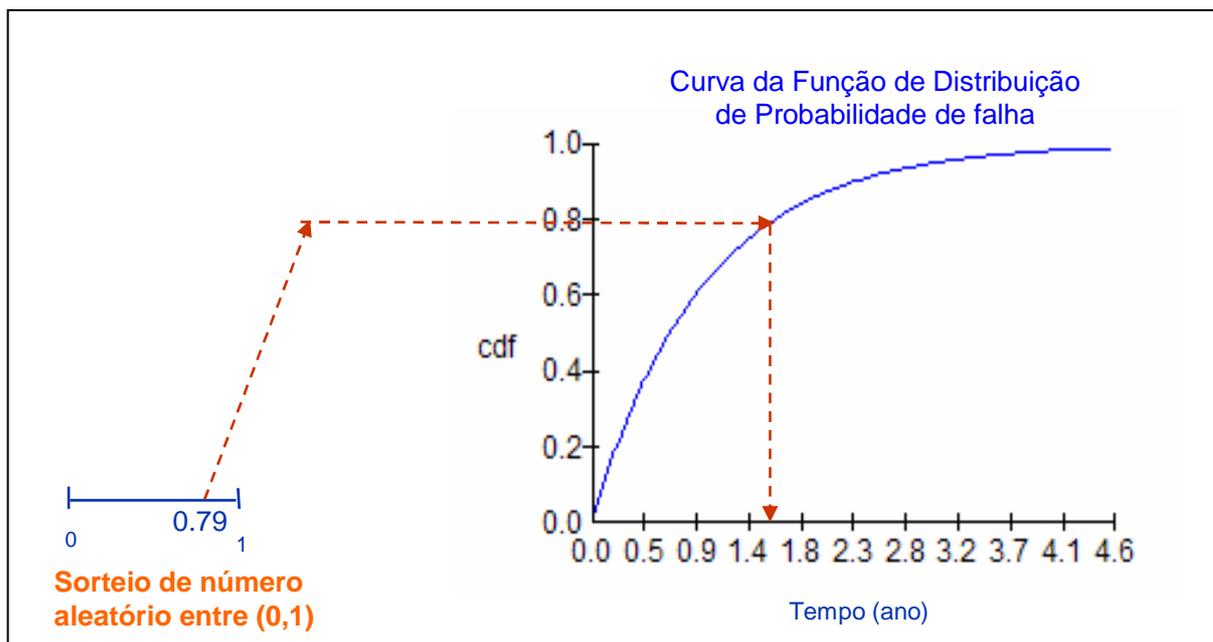
Figura 2-12 – Exemplificação de uma Simulação por Evento Discreto

No método de simulação por eventos discretos, o número de simulações está diretamente relacionado com a convergência do valor calculado. Um número total de mil simulações foi realizado para que o valor da Eficiência Produtiva da planta convergisse para um valor com precisão de três casas decimais. No presente estudo não foram calculados os erros.

O mecanismo de sorteio baseia-se na geração de um número randômico entre 0 e 1, que é convertido em tempo a partir das equações de confiabilidade, apresentadas no capítulo anterior.

O tempo de falha sorteado em cada simulação depende do número sorteado e da taxa de falha do equipamento. Caso o número sorteado seja maior que a vida útil da planta, considera-se que não ocorreram falhas no componente sorteado. Caso contrário, tempos de falha serão sorteados até que o tempo de simulação alcance o tempo de funcionamento da unidade.

Na Figura 2-13 observa-se como é realizado o sorteio do tempo de falha, através da geração de números randômicos.



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

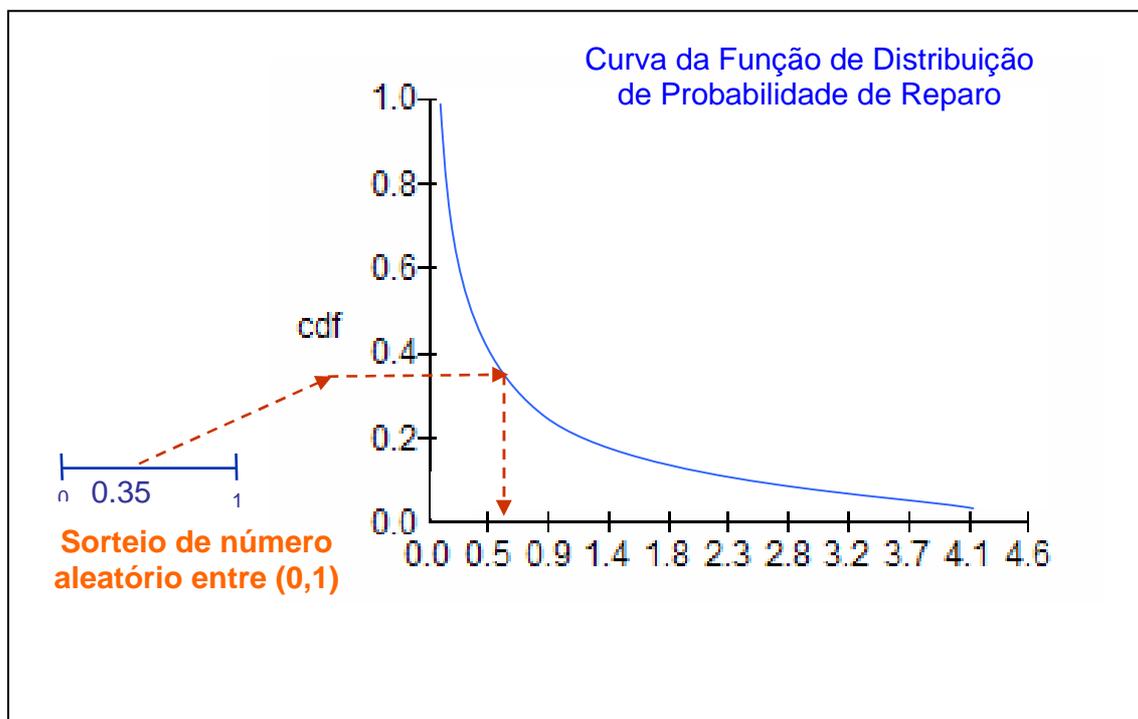
Pode-se observar na Figura 2-13 que o eixo y corresponde aos números randômicos. O número randômico sorteado é relacionado com a curva de probabilidade de falha do equipamento que é descrita pela Equação 2.41:

$$P = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.41)$$

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 com o valor sorteado é:

$$TF = \frac{-\ln(1 - Rnd)}{\lambda} \quad (2.42)$$

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 2-14 - Sorteio do tempo de falha por geração de números randômicos**

A curva apresentada no gráfico da Figura 2-14 é descrita pela Equação 2.43:

$$G(t) = e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (2.43)$$

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 está relacionado com o número sorteado através da equação:

$$TR = -\ln(Rnd) \cdot MTTR \quad (2.44)$$

No presente trabalho esta simulação foi realizada utilizando-se uma planilha de Excel na qual foram inseridas as fórmulas de confiabilidade pertinentes. O algoritmo de simulação por evento discreto é apresentado no Anexo C. Para tal simulação, os seguintes dados de entrada foram necessários: taxa de falha, tempo de reparo, configuração dos equipamentos (número de “*stand-by*” e contribuição de cada equipamento na produção total do sistema), intervalo/ duração de paradas para manutenção do sistema, vida útil da planta e número de simulações. Através da utilização desta ferramenta, foi possível obter o valor de eficiência produtiva e a contribuição de cada equipamento/sistema na perda relativa da unidade.

## 3 BASES PARA ANÁLISE

### 3.1 Unidade de Compressão de Gás Natural

Neste capítulo estão descritos os principais arranjos dos componentes do sistema de compressão de gás natural, bem como, todas as premissas adotadas.

#### 3.1.1 Definição do Sistema

A avaliação de confiabilidade da Unidade de Compressão de Gás Natural em análise englobou todos os sistemas da instalação, analisando-os ao nível dos modos de falha dos seus equipamentos. Foram incluídos nesta análise os eventos de falha de sistemas, equipamentos e componentes desta unidade cujos efeitos causem parada ou redução da produção.

O objetivo da unidade analisada é elevar a pressão do gás às condições de entrada da UPGN. A unidade recebe gás basicamente através de quatro linhas, com níveis de pressão distintos, sendo uma linha de baixa pressão (aproximadamente 1,0 Kgf/cm<sup>2</sup>), duas de média (aproximadamente 15,0 Kgf/cm<sup>2</sup>) e uma de alta (em torno de 90,0 Kgf/cm<sup>2</sup>). A unidade possui capacidade de processamento de projeto de 1.600,00 Mm<sup>3</sup>/dia de gás (38°C e 81 kgf/cm<sup>2</sup>).

#### Sistema de Baixa Pressão

Este sistema recebe gás natural a 1,0 kgf/cm<sup>2</sup> e eleva sua pressão até 14,5 kgf/cm<sup>2</sup>. É constituído por quatro baterias de compressores e um duto de média pressão. Este sistema supre 800 Mm<sup>3</sup>/dia de gás da carga da UPGN.

O sistema de baixa pressão é composto pelos seguintes equipamentos:

- dois compressores C-001 A/B, máquinas de coleta de gás à pressão de 1,0 Kgf/cm<sup>2</sup>, com a capacidade de 100,00 Mm<sup>3</sup>/dia cada, destinados ao suprimento de gás à pressão de 14,5 Kgf/cm<sup>2</sup>. Os compressores funcionam em uma lógica de 2x100%, ou seja, um ativo e outro reserva.
- dois compressores C-004 A/B, máquinas de coleta de gás à pressão de 1,0 Kgf/cm<sup>2</sup>, com capacidade de compressão de 300,00 Mm<sup>3</sup>/dia cada, destinados ao suprimento de gás para re-compressão a 14,5 Kgf/cm<sup>2</sup>. Estes compressores também funcionam em uma lógica 2x100%.

- um compressor C-003 (com dois estágios de compressão, dividindo-se em C-003-1 e C-003-2), máquina de coleta de gás à pressão de 1,0 Kgf/cm<sup>2</sup>, com capacidade de compressão de 200 Mm<sup>3</sup>/dia, destinado ao suprimento de gás para re-compressão a 14,5 Kgf/cm<sup>2</sup>.
- um duto de gás de média pressão operando a 15 kgf/cm<sup>2</sup> fornecendo 200 Mm<sup>3</sup>/dia
- dois compressores C-005 A/B, máquinas de re-compressão de gás com sucção a 14,5 Kgf/cm<sup>2</sup>, operando com capacidade de 400,0 Mm<sup>3</sup>/dia cada, destinados ao suprimento da UPGN à pressão de 81 Kgf/cm<sup>2</sup>. Os C-005 A/B operam também em uma lógica 2x50%, ou seja, os dois compressores estão ativos.

Sendo assim, o sistema de baixa pressão é responsável por suprir 800 Mm<sup>3</sup>/dia (200 Mm<sup>3</sup>/dia oriundos do duto de média pressão e 600 Mm<sup>3</sup>/dia oriundos dos compressores de baixa pressão).

#### Sistema de Média Pressão

Este sistema recebe gás natural a 15,0 kgf/cm<sup>2</sup> e eleva sua pressão até 81,0 kgf/cm<sup>2</sup>. É constituído por três baterias de compressores. Este sistema supre 600 Mm<sup>3</sup>/dia de gás da carga da UPGN.

O sistema de média pressão é composto pelos seguintes equipamentos:

- três compressores C-002 A/B/C, máquinas de coleta de gás à pressão de 14,5 Kgf/cm<sup>2</sup>, com capacidade de 200,00 Mm<sup>3</sup>/dia cada, destinados ao suprimento de gás à pressão de 81 Kgf/cm<sup>2</sup>. Os compressores funcionam em uma lógica 3x33,3%, ou seja, todos estão ativos.

#### Sistema de Alta Pressão

Este sistema recebe gás natural a 90,0 Kgf/cm<sup>2</sup> e 30°C, não sendo necessária a sua compressão, visto que já se encontra na pressão desejada para abastecimento da UPGN. O gás passa por dois vasos separadores no decorrer do seu percurso, atingindo no final 81,0 Kgf/cm<sup>2</sup> e 38°C. Este sistema supre 200 Mm<sup>3</sup>/dia de gás da carga da UPGN.

A Tabela 3-1 mostra os componentes de cada sistema da Unidade de Compressão de Gás Natural.

**Tabela 3-1- Componentes de cada sistema da Unidade de Compressão de Gás Natural**

Sistema	TAG	Nome	Observação
<b>Sistema de Baixa Pressão</b>	C-001A/B	Compressor	2x100%
	C-003-1/2	Compressor	
	C-004A/B	Compressor	2x100%
	C-005-A/B	Compressor	2x50%
	FT-C-004-1	Filtro	
	P-C-003-01	Air Cooler	
	P-C-004A-1/2	Air Cooler	
	P-C-005-A1/2	Air Cooler	
	P-C-005-B1/2	Air Cooler	
	P-C-01A2	Air Cooler	
	SD-C-001A1/2	Vaso Separador	
	SD-C-003-1/2	Vaso Separador	
	SD-C-004A1/2	Vaso Separador	
	SD-C-005-A1/2	Vaso Separador	
	SD-C-005-B1/2	Vaso Separador	
	V-001	Vaso	
	V-003	Vaso Demister	
V-006	Vaso Demister		
<b>Sistema de Média Pressão</b>	C-002-A/B/C	Compressor	3x33,3%
	FT-C-002-1	Filtro	
	FT-C-005-1	Filtro	
	P-C-003A1	Air Cooler	
	P-C-003B1	Air Cooler	
	P-C-003C1	Air Cooler	
	SD-C-002A1/2/3	Vaso Separador	
	SD-C-002B1/2/3	Vaso Separador	
	SD-C-002C1/2/3	Vaso Separador	
<b>Sistema de Alta Pressão</b>	V-004	Vaso Scrubber	
	SG-106	Vaso Separador	

O fluxograma de processo da Unidade de Compressão de Gás Natural está apresentado Anexo A.

### 3.1.2 Premissas da Análise<sup>[13,14,15]</sup>

Visando proporcionar maior clareza, foram determinadas premissas relativas à modelagem e ao tratamento dos dados de falha a serem utilizados. A seguir encontram-se as principais premissas utilizadas na modelagem da Unidade de Compressão de Gás Natural.

- 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 cinco anos têm um impacto muito forte nos resultados, distorcendo-os quanto à proporção da contribuição (criticidade) de cada causa de falha.
- Considerou-se que o gás comprimido é fornecido continuamente para a UPGN e que a carga de referência da unidade é de 1.600,00 Mm<sup>3</sup>/dia.
- Foram consideradas somente as falhas operacionais que impactam sobre a produção, ou seja, os sistemas e/ou equipamentos cujas falhas não impactam na produção ou na perda de especificação do gás não foram incluídos na análise.
- 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.
- Os dados de falha e reparo utilizados neste trabalho foram coletados no banco de dados OREDA 2002 e *OREDA 1992 – Offshore Reliability Data*. No OREDA os dados estão disponibilizados em itens (que se definem por equipamentos ou

grupo de equipamentos dentro da fronteira especificada ou particular). O modo de falha reportado entende-se como sendo o efeito pelo qual a falha é observada no item que falhou. O modo de falha descreve as variações de estado do item como resultado da falha:

- Falha Crítica – é uma falha súbita e que causa a interrupção de uma ou mais funções fundamentais do item. Este tipo de falha exige uma ação corretiva imediata de forma recolocar o item em condições operacionais satisfatórias.
  - Falha Degradada – é uma falha gradual e/ou parcial. Tal falha não interrompe funções fundamentais, mas compromete uma ou mais funções. Ao longo do tempo, a falha degradada pode evoluir para uma falha crítica.
  - Falha Incipiente – uma imperfeição no estado ou condição do item que pode resultar numa falha degradada ou crítica se não for tomada nenhuma ação corretiva.
- No presente estudo, foram utilizados os valores de falhas críticas para os equipamentos e componente de forma a se obter o resultado mais conservativo, ou seja, que considerasse o insucesso do equipamento em realizar uma dada função, e não somente suas perdas parciais.
- Válvulas manuais e linhas não foram incluídas no presente estudo de confiabilidade, visto que estes equipamentos apresentam baixa frequência de ocorrência de falhas, não contribuindo de forma significativa para as perdas da unidade.
- Considerou-se que a Unidade de Compressão realiza paradas programadas a cada cinco anos com duração de dez dias.
- 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.

- Para possibilitar a escolha da melhor alternativa para a Unidade de Compressão de Gás Natural, foi realizado um cálculo de custo-benefício, baseado nos valores dos produtos e dos componentes que mais impactam para as perdas deste sistema, os quais estão indicados na Tabela 3-2.

**Tabela 3-2 – Valores dos componentes da Unidade de Compressão**

<b>Produto</b>	<b>Preço</b>
Gás Natural	US\$ 120.00 Mm <sup>3</sup>
Pacote de Compressão	US\$ 4.000.000,00

- Foi estabelecido como meta um tempo de retorno do capital investido de sete anos, correspondendo a uma taxa de retorno de aproximadamente 15% ao ano. Este valor é bastante razoável em unidades que possuem um tempo de vida útil em torno de 20 anos.
- O principal requisito de confiabilidade analisado foi a eficiência produtiva. É razoável considerar-se aceitável um índice de eficiência produtiva em torno de 99,0% para o tipo de unidade analisada. Este é o valor médio encontrado para unidades deste mesmo tipo em diversas partes do mundo.

## **3.2 Confiabilidade da Unidade de Compressão de Gás Natural**

### **3.2.1 Dados de Taxa de Falha**

Os dados de falha e tempos de reparo dos equipamentos da unidade de compressão de gás natural estão apresentados na Tabela 3-3. Esta tabela apresenta o tipo de equipamento, a frequência de falha (por hora), bem como os tempos médios de reparo, MTTR, para cada modo de falha reportado e a base de dados de onde foram retirados esses dados. Os dados de falha utilizados para o cálculo de confiabilidade são referentes aos modos de falha críticos (CRT) e “All Modes”.

**Tabela 3-3- Dados de falha e reparo dos componentes da Unidade**

Equipamento	Taxa de falhas (1/h)	MTTR (horas)	Base de Dados
Air Cooler	8,56E-06	4,2	OREDA 2002, pg 380
Compressor	1,66E-04	29,3	OREDA 2002, pg 58
Filtro	1,19E-05	14	OREDA 1992, pg 513
Vaso	2,45E-05	8,7	OREDA 2002, pg 416
Vaso Demister	2,45E-05	8,7	OREDA 2002, pg 416
Vaso Scrubber	2,30E-05	5,8	OREDA 2002, pg 457
Vaso Separador	2,89E-05	5,2	OREDA 2002, pg 465

### 3.2.2 Avaliação da Confiabilidade por Diagrama de Blocos

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 que representa o comportamento dinâmico de todo o sistema, através de arranjos funcionais lógicos do sistema analisado. No Anexo B deste trabalho está apresentada a configuração em diagrama de blocos da Unidade de Compressão de Gás Natural.

### 3.2.3 Cálculo da Confiabilidade do sistema

A análise de confiabilidade da Unidade de Compressão de Gás Natural foi realizada através da implementação das equações em um arquivo Excel e utilizando-se a técnica de simulação por eventos discretos, o que representa o estado da arte atualmente. As planilhas de Excel utilizadas encontram-se no Anexo D.

## 4 Resultados obtidos<sup>[17]</sup>

O principal resultado avaliado neste trabalho foi o indicador de eficiência produtiva e de confiabilidade da unidade de compressão de gás natural.

Inicialmente foi realizada uma avaliação com a configuração atual da Unidade de Distribuição de Gás Natural, intitulada de “caso base”. A análise de sensibilidade propôs configurações alternativas, com o objetivo de aumentar a eficiência produtiva da unidade.

### 4.1 Caso Base

A simulação proposta no “caso base” busca representar todas as variáveis inerentes a este sistema, considerando desde os arranjos físicos e módulos funcionais da Unidade de Compressão até a logística de parada programada e disponibilidade de sobressalentes. A configuração do “caso base” encontra-se descrita no item 3.1.1.

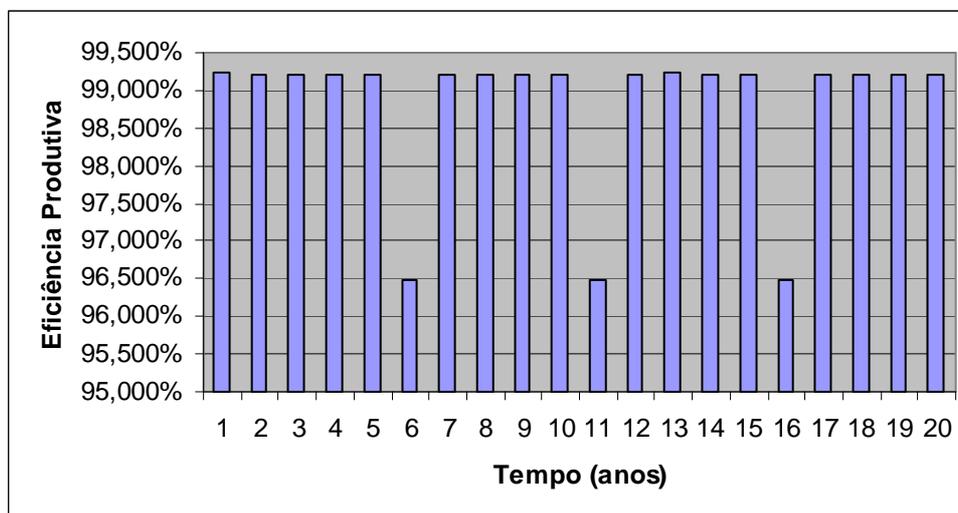
Na Tabela 4-1 estão apresentados os valores resumidos da performance obtida para esta simulação. Desta tabela pode-se verificar a eficiência produtiva obtida, a perda anual de gás, o volume produzido de gás (Mm<sup>3</sup>/ano), total de produção de gás Perdido (Mm<sup>3</sup>/ano) em 20 anos e a perda média de gás (Mm<sup>3</sup>/ano).

**Tabela 4-1 – Resultados - Caso Base**

<b>INDICADOR</b>	<b>CASO BASE</b>
Valores de Eficiência Produtiva (%)	98,802
Perda Anual de Gás (%)	1,198
Volume Produzido de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	5,77E+05
Total de Produção de Gás Perdido (Mm <sup>3</sup> ) em 20 anos	1,40E+05
Perda Média de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	6,98E+03

A eficiência produtiva média obtida para a simulação do Caso Base foi de aproximadamente 98,802%, o que representa uma perda anual de gás de 1,198% da capacidade de produção da unidade de compressão. O valor da eficiência produtiva encontra-se 0,198% abaixo da meta estabelecida. Este percentual representa 2,3126 E+04 Mm<sup>3</sup>/ano.

O volume de gás produzido durante a vida útil da unidade é  $1,1680E+07$  Mm<sup>3</sup>, enquanto que a produção perdida está representada pelo valor de  $1,399E+05$  Mm<sup>3</sup>. A Figura 4-1 mostra a distribuição da eficiência produtiva ao longo da vida útil da unidade.

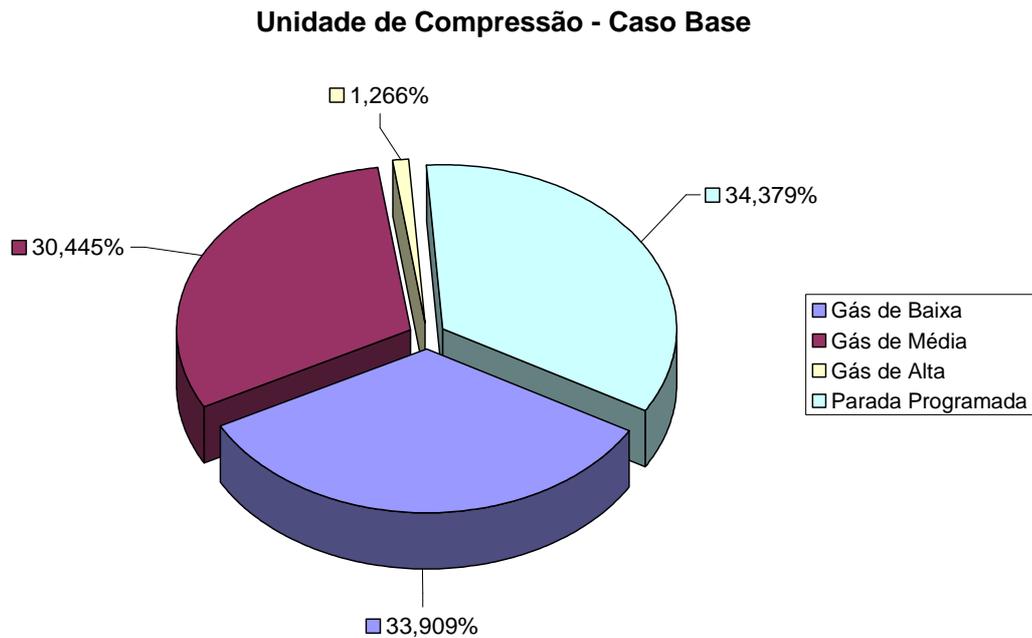


**Figura 4-1 - Eficiência Produtiva Anual - Caso Base**

A Tabela 4-2 apresenta as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Unidade de Compressão analisada. Estes resultados, referentes à perda relativa global (%) e estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-2.

**Tabela 4-2– Contribuição dos sistemas para perda de eficiência por sistema – Caso Base**

Sistema	Perda Absoluta	Perda Relativa
Gás de Baixa	0,405%	33,909%
Gás de Média	0,364%	30,445%
Gás de Alta	0,015%	1,266%
Parada Programada	0,411%	34,379%
Total	1,195%	100,000%



**Figura 4-2 – Contribuição dos sistemas para perda de eficiência produtiva – Caso Base**

Analisando-se a Figura 4-2, pode-se verificar que o sistema de gás de baixa, o sistema de gás de média e a parada programada contribuem com a mesma ordem de grandeza para as perdas observadas para a unidade, sendo estes valores 33,909%, 30,445% e 34,379%, respectivamente.

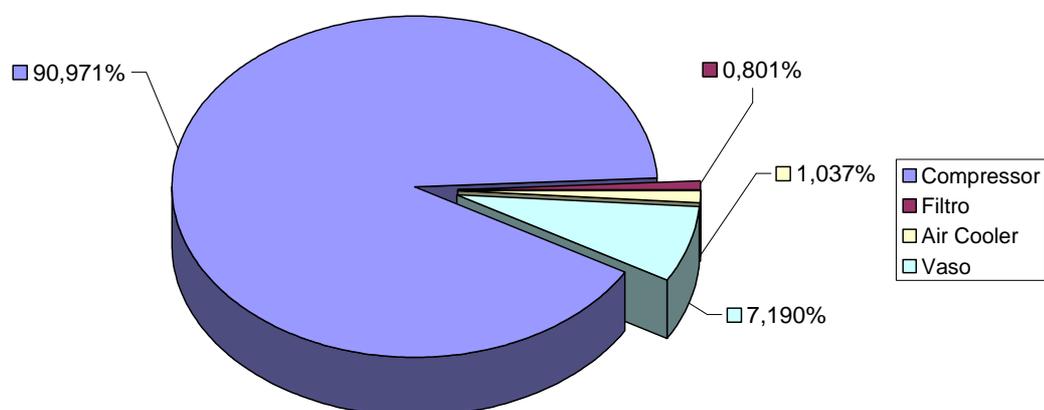
Deve-se avaliar a criticidade de cada sistema e componente do projeto, pois somente assim os componentes que mais contribuem para as perdas do conjunto podem ser identificados.

Uma análise detalhada dos equipamentos que compõem o sistema de gás natural de baixa pressão evidencia a importância de cada um dos compressores. A Tabela 4-3 apresenta os componentes do sistema de baixa pressão, a perda absoluta e perda relativa.

**Tabela 4-3– Criticidade dos equipamentos do sistema de baixa pressão – Caso Base**

Gás de Baixa	Perda Absoluta	Perda Relativa
C-005-A1	0,075%	18,392%
C-005-B1	0,074%	18,276%
C-005-A2	0,073%	18,117%
C-005-B2	0,073%	17,999%
C-003-1	0,037%	9,024%
C-003-2	0,036%	8,973%
Outros	0,037%	9,219%
<b>Total</b>	<b>0,405%</b>	<b>100,000%</b>

A partir da análise da Tabela 4-3 pode-se observar que os compressores do sistema de baixa pressão que mais influenciam nas perdas desse sistema são os compressores C-005, contribuindo com 72,784%. O compressor C-003 contribui em média com 8,99% das perdas deste sistema, enquanto os compressores C-005 contribuem em média com 18,20% cada. Os compressores C-001 e C-004 contribuem menos com as perdas relativas, sendo estas, 0,026% (cada) e 0,083% respectivamente. Os resultados estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-3.

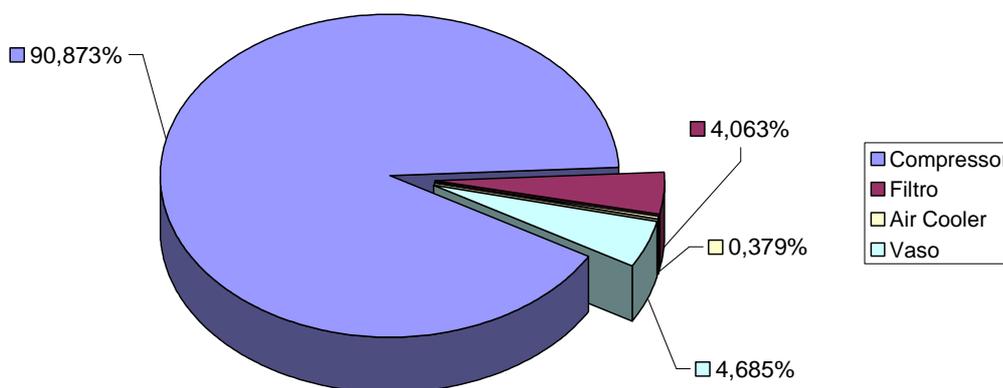
**Sistema de Baixa Pressão - Caso Base****Figura 4-3 – Criticidade dos equipamentos do sistema de baixa pressão – Caso Base**

A Tabela 4-4 apresenta a criticidade dos equipamentos presentes no sistema de média pressão, indicando a contribuição de cada um nas perdas absolutas e relativas da unidade. Estes resultados estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-4.

**Tabela 4-4 – Criticidade dos equipamentos do sistema de média pressão**

Gás de Média	Perda Absoluta	Perda Relativa
C-002-A1	0,037%	10,215%
C-002-C2	0,038%	10,330%
C-002-B2	0,037%	10,168%
C-002-C1	0,037%	10,112%
C-002-A2	0,037%	10,107%
C-002-A3	0,037%	10,072%
C-002-B1	0,036%	10,004%
C-002-C3	0,036%	9,933%
C-002-B3	0,036%	9,932%
FT-C-005-1	0,009%	2,369%
FT-C-002-1	0,006%	1,694%
Outros	0,018%	5,064%
<b>Total</b>	<b>0,364%</b>	<b>100,000%</b>

#### Sistema de Média Pressão - Caso Base

**Figura 4-4 – Criticidade dos equipamentos do sistema de média pressão – Caso Base**

Analisando-se os resultados obtidos, pode-se observar que os compressores são os componentes que mais contribuem para as perdas do sistema de média pressão, sendo responsáveis por aproximadamente 90,872% das perdas.

O sistema de alta pressão contribui com aproximadamente 1,27% das perdas da unidade. Este sistema é composto por um vaso separador e um vaso scrubber, que recebe toda a carga da unidade.

## 4.2 Análise de Sensibilidade

O objetivo da análise de sensibilidade foi propor novas configurações para a unidade de compressão de gás natural visando aumentar a eficiência produtiva do sistema, e consequentemente, melhor os índices de confiabilidade.

Sob este enfoque, a sensibilidade realizada evidenciou três alternativas de melhoria que podem fazer com que a meta estabelecida para a eficiência produtiva média seja alcançada. Estas melhorias estão apresentadas nos Casos Alternativos A, B e C.

### 4.2.1 Alternativa Caso A

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4-2, o sistema de baixa pressão contribuiu com 33,909% das perdas da unidade, e os compressores C-005 foram os componentes que mais contribuíram dentro desse sistema, com 72,784%, conforme a Tabela 4-3. Desta forma, uma modificação na configuração do sistema de baixa pressão foi analisada para verificar a nova eficiência produtiva da unidade. A alternativa A propôs a implementação de um novo compressor C-005, modificando, assim, o atual arranjo 2x50% por um arranjo 3x50%, ou seja, este sistema passa a ter redundância no que tange aos compressores C-005.

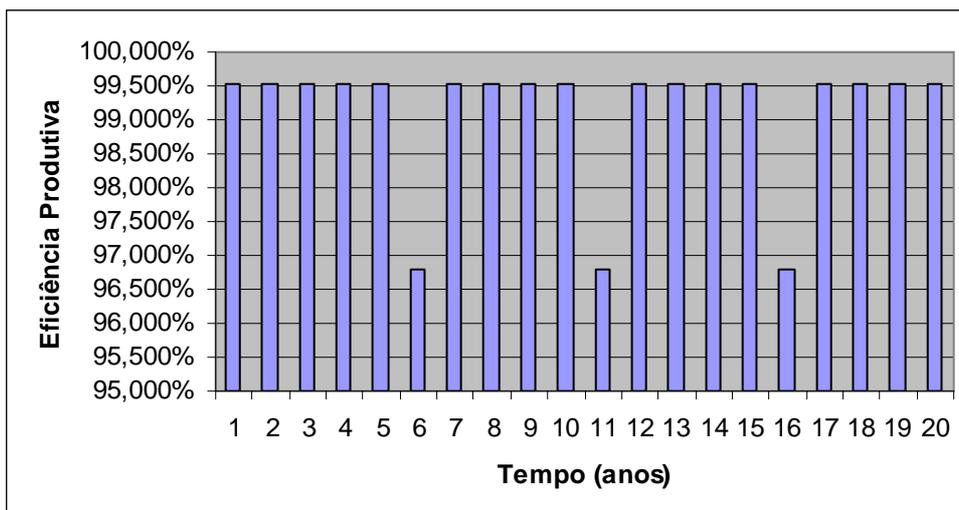
Na Tabela 4-5 estão apresentados os valores resumidos da performance obtida para esta simulação, incluindo os resultados do caso base para fins de comparação. Desta tabela pode-se verificar a eficiência produtiva obtida, o volume produzido de gás ( $Mm^3/ano$ ), perda anual de gás, total de produção de gás perdido ( $Mm^3/ano$ ) em 20 anos, perda média de gás ( $Mm^3/ano$ ), aumento da produção de gás natural com a implementação da medida em  $m^3/ano$ , valor do gás ( $USD * Mm^3$ ), ganho anual (A) em US\$ com a diminuição das perdas de produção, custo (B) em US\$ para implementação da medida, tempo de retorno (anos) da alternativa proposta.

**Tabela 4-5– Resultados - Caso A**

<b>INDICADOR</b>	<b>CASO BASE</b>	<b>CASO A</b>
Valores de Eficiência Produtiva (%)	98,805	99,117
Perda Anual de Gás (%)	1,198	0,883
Volume Produzido de Gás (Mm <sup>3</sup> /ano)	5,77E+05	5,79E+05
Total de Produção de Gás Perdido (Mm <sup>3</sup> ) em 20 anos	1,40E+05	1,03E+05
Perda Média de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	6,98E+03	5,16E+03
Aumento da produção de Gás Natural com a implementação da medida em m <sup>3</sup> por ano	-	1.822,08
Valor do gás (USD*Mm <sup>3</sup> )	-	120,00
Ganho anual (A) em US\$ com a diminuição das perdas de produção	-	218.649,60
Custo (B) em US\$ para implementação da medida	-	4.000.000,00
Tempo de retorno (anos)	-	18 anos e 4 meses

Da Tabela 4-5 verifica-se que a eficiência produtiva média obtida para a simulação do Caso A foi de aproximadamente 99,117%, o que representa uma perda anual de gás de 0,883% da capacidade de produção da unidade de compressão, correspondendo a um aumento de 3,676E+04 Mm<sup>3</sup> de gás durante a vida útil da unidade.

A Figura 4-5 mostra a distribuição da eficiência produtiva ao longo da vida útil da unidade proposta no Caso A.



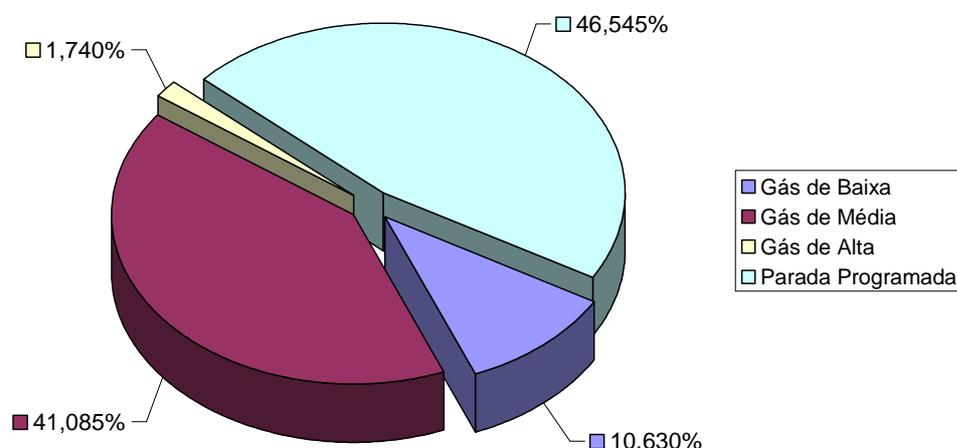
**Figura 4-5 – Eficiência Produtiva Anual - Caso A**

A Tabela 4-6 apresenta as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Unidade de Compressão analisada no Caso A. Estes resultados, referentes à perda relativa global (%), estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-6.

**Tabela 4-6 – Contribuição para perda de eficiência por sistema – Caso A**

Sistema	Perda Absoluta	Perda Relativa
Gás de Baixa	0,094%	10,630%
Gás de Média	0,363%	41,085%
Gás de Alta	0,015%	1,740%
Parada Programada	0,411%	46,545%
Total	0,883%	100,000%

### Unidade de Compressão - Caso A

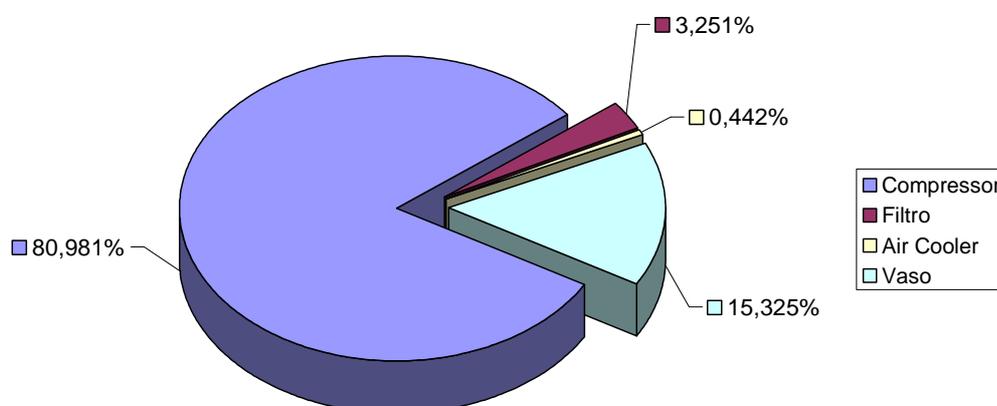


**Figura 4-6 – Contribuição dos sistemas para perda de eficiência produtiva – Caso A**

Analisando-se a Figura 4-2, pode-se verificar que o sistema de gás de média e a parada programada contribuem com a mesma ordem de grandeza para as perdas observadas da unidade, sendo estes valores 41,085%, 46,545%, respectivamente.

O sistema de baixa pressão da unidade teve uma redução de 23,28% na influência das perdas em relação à configuração atual da Unidade de Compressão, analisada anteriormente no item 4.1 (caso base), contribuindo com 10,63% para as perdas da unidade no caso A. Dessa forma, o sistema de média pressão e a parada programada passaram a ser os sistemas que mais contribuíram para a redução da eficiência produtiva.

Na Figura 4-7 observa-se a contribuição dos componentes na nova configuração proposta no Caso A para o sistema de baixa pressão.

**Sistema de Baixa Pressão - Caso A****Figura 4-7 – Criticidade dos equipamentos no sistema de baixa pressão – Caso A**

Analisando-se a Figura 4-7, pode-se verificar que, a contribuição dos compressores na perda relativa do sistema de baixa pressão para o Caso A foi de 80,981%, contra 90,873% no Caso Base. Sendo assim, percebe-se que a reavaliação do projeto de compressores realizada no Caso A contribuiu de forma significativa para o aumento da eficiência produtiva do sistema.

Sendo assim, pode-se verificar que a meta estabelecida para a eficiência produtiva da unidade foi atingida.

A decisão de implementar uma redundância nos compressores C-005 do sistema de compressão de baixa pressão, requer uma análise de custo-benefício desta alternativa. Os resultados da avaliação econômica para esta configuração foram calculados a partir dos valores da Tabela 3-2.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4-5, verifica-se que a inclusão de um compressor redundante no sistema de baixa pressão da unidade, proporcionou um aumento da produção anual de 1.822,08 Mm<sup>3</sup> de gás, o que corresponde a um ganho anual de US\$ 218.649,00.

Os custos referentes à implementação de um pacote de compressão adicional devem ser descontados do ganho que o mesmo proporciona. Desta forma, o tempo de retorno do capital investido para o Caso A foi de 18 anos e 4 meses.

### 4.2.2 Alternativa Caso B

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4-2, o sistema de média pressão contribuiu com 30,445% das perdas da unidade, e os compressores C-002 foram os componentes que mais contribuíram dentro desse sistema, com 71,008%, conforme a Tabela 4-4. Desta forma, uma modificação na configuração do sistema de média pressão foi analisada para verificar a nova eficiência produtiva da unidade. A alternativa B propôs que fosse implementado um novo compressor C-002, modificando assim, o atual arranjo 3x33,3% por um arranjo 4x33,3%, no qual estão presentes três compressores ativos e um reserva.

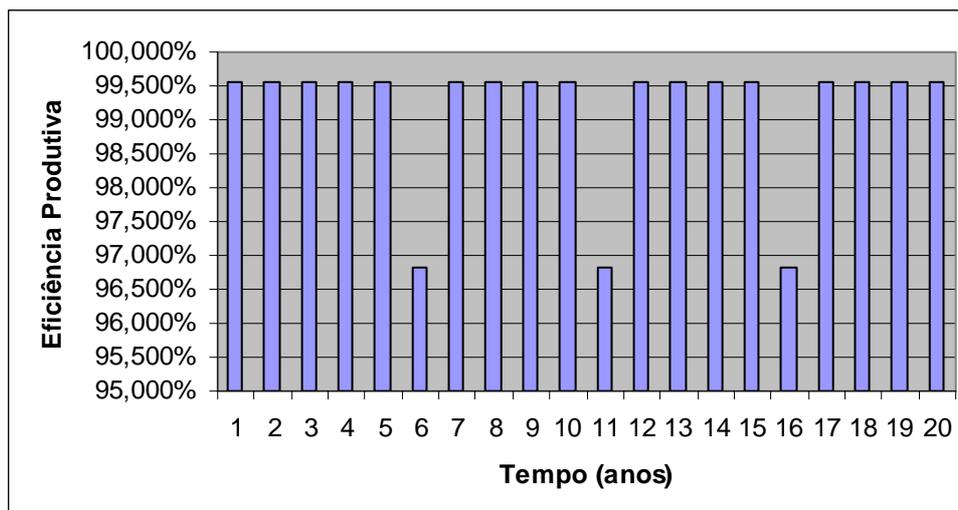
Na Tabela 4-7 estão apresentados os valores resumidos da performance obtida para esta simulação, incluindo os resultados do caso base para fins de comparação. Desta tabela pode-se verificar a eficiência produtiva obtida, o volume produzido de gás ( $\text{Mm}^3/\text{ano}$ ), perda anual de gás, total de produção de gás perdido ( $\text{Mm}^3/\text{ano}$ ) em 20 anos, perda média de gás ( $\text{Mm}^3/\text{ano}$ ), aumento da produção de gás natural com a implementação da medida em  $\text{m}^3/\text{ano}$ , valor do gás ( $\text{USD} \cdot \text{Mm}^3$ ), ganho anual (A) em US\$ com a diminuição das perdas de produção, custo (B) em US\$ para implementação da medida, tempo de retorno (anos) da alternativa proposta.

**Tabela 4-7– Resultados - Caso B**

<b>INDICADOR</b>	<b>CASO BASE</b>	<b>CASO B</b>
Valores de Eficiência Produtiva (%)	98,805	99,149
Perda Anual de Gás (%)	1,198	0,851
Volume Produzido de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	5,77E+05	5,79E+5
Total de Produção de Gás Perdido (Mm <sup>3</sup> ) em 20 anos	1,40E+05	9,94E+04
Perda Média de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	6,98E+03	4,97E+03
Aumento da produção de Gás Natural com a implementação da medida em m <sup>3</sup> por ano	-	2,01E+03
Valor do gás (USD*Mm <sup>3</sup> )	-	120,00
Ganho anual (A) em US\$ com a diminuição das perdas de produção	-	241.075,20
Custo (B) em US\$ para implementação da medida	-	4.000.000,00
Tempo de retorno (anos)	-	16 anos e 7 meses

Da Tabela 4-7 verifica-se que a eficiência produtiva média obtida para a simulação do Caso B foi de aproximadamente 99,149%, o que representa uma perda anual de gás de 0,851% da capacidade de produção da unidade de compressão, correspondendo a um aumento de 4,053 E+04 Mm<sup>3</sup> de gás na vida útil da unidade.

A Figura 4-8 mostra a distribuição da eficiência produtiva ao longo da vida útil da unidade, proposta no Caso B.



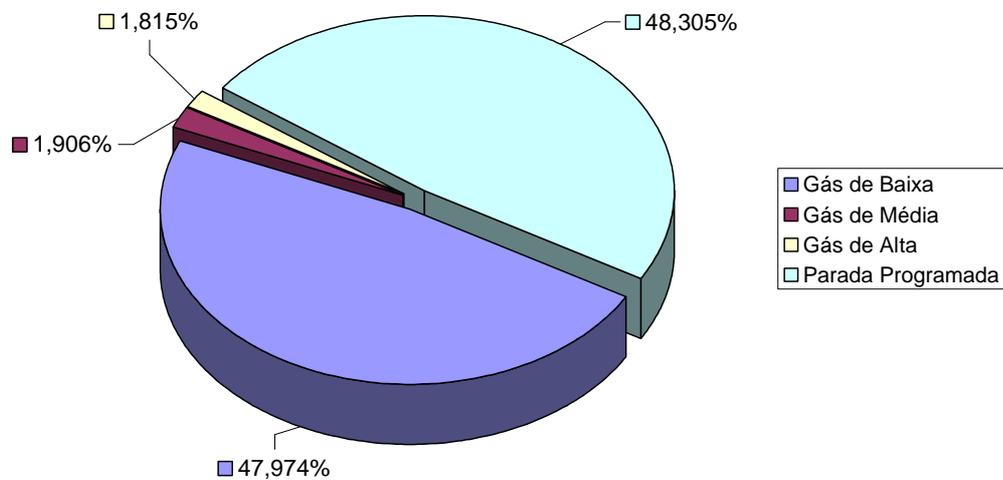
**Figura 4-8 – Eficiência Produtiva Anual - Caso B**

A Tabela 4-8 apresenta as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Unidade de Compressão analisada no Caso B. Estes resultados, referentes à perda relativa global (%), estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-9.

**Tabela 4-8 – Contribuição para perda de eficiência por sistema – Caso B**

Sistema	Perda Absoluta	Perda Relativa
Gás de Baixa	0,408%	47,974%
Gás de Média	0,016%	1,906%
Gás de Alta	0,015%	1,815%
Parada Programada	0,411%	48,305%
Total	0,851%	100,000%

### Unidade de Compressão - Caso B

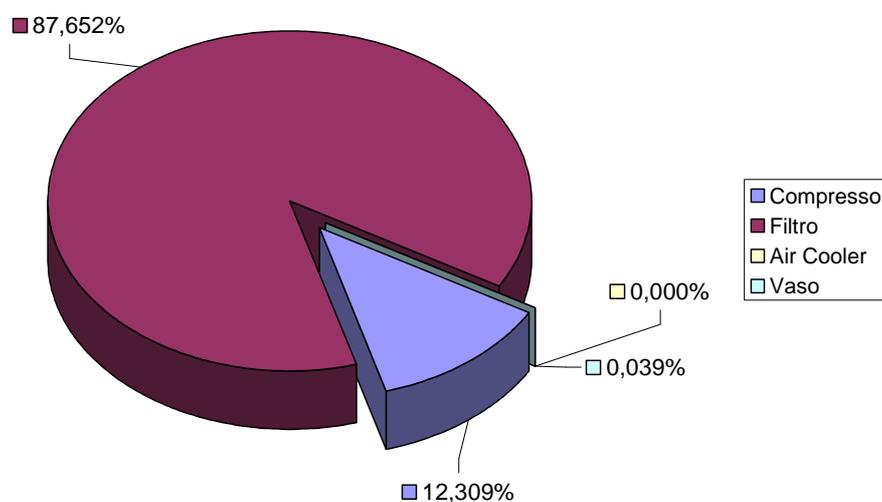


**Figura 4-9 – Contribuição dos sistemas para perda de eficiência produtiva - Caso B**

Analisando-se a Figura 4-9, pode-se verificar que o sistema de gás de baixa e a parada programada contribuem com a mesma ordem de grandeza para as perdas observadas para a unidade, sendo estes valores 47,974% e 48,305%, respectivamente.

O sistema de média pressão da unidade teve uma redução de 28,54% na influência das perdas em relação a configuração atual da Unidade de Compressão, analisada anteriormente no item 4.1 (caso base), contribuindo com 1,906% para as perdas da unidade no caso B. Dessa forma, o sistema de baixa pressão e a parada programada passaram a ser os sistemas que mais contribuem para redução da eficiência produtiva.

Na Figura 4-10 observa-se a contribuição dos componentes na nova configuração proposta no Caso B para o sistema de média pressão.

**Sistema de Média Pressão - Caso B****Figura 4-10– Criticidade dos equipamentos no sistema de média pressão - Caso B**

Analisando-se a Figura 4-10, pode-se verificar que a contribuição dos compressores na perda relativa do sistema de média pressão para o Caso B foi de 12,309%, contra 90,873% no Caso Base. Sendo assim, percebe-se que a reavaliação do projeto de compressores realizada no Caso B contribuiu de forma significativa para o aumento da eficiência produtiva do sistema.

Sendo assim, da mesma forma que no Caso A, pode-se verificar que a meta estabelecida para a eficiência produtiva da unidade foi atingida.

A decisão de implementar uma redundância nos compressores C-002 do sistema de compressão de média pressão, requer uma análise de custo-benefício desta alternativa. Os resultados da avaliação econômica para esta configuração foram calculados a partir dos valores da Tabela 3-2.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4-7, verifica-se que a inclusão de um compressor redundante no sistema de média pressão da unidade, proporcionou um aumento da produção anual de 2.008,96 Mm<sup>3</sup> de gás, o que corresponde a um ganho anual de US\$ 241.075,20.

Os custos referentes à implementação de um pacote de compressão adicional devem ser descontados do ganho que o mesmo proporciona. Desta forma, o tempo de retorno do capital investido para o Caso B foi de 16 anos e 7 meses.

### 4.2.3 Alternativa Caso C

A última configuração analisada foi um sistema incluindo as suposições realizadas no Caso A e no Caso B em conjunto, ou seja, uma nova redundância no sistema de compressão de gás de baixa (C-005) e outra no de gás de média (C-002).

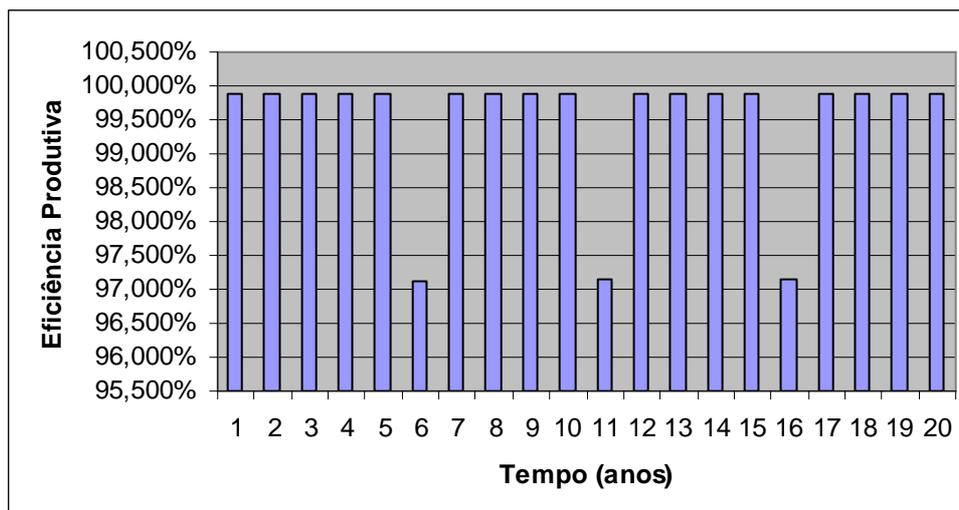
Na Tabela 4-9 estão apresentados os valores resumidos da performance obtida para esta simulação, incluindo os resultados do caso base para fins de comparação. Desta tabela pode-se verificar a eficiência produtiva obtida, o volume produzido de gás ( $\text{Mm}^3/\text{ano}$ ), perda anual de gás, total de produção de gás perdido ( $\text{Mm}^3/\text{ano}$ ) em 20 anos, perda média de gás ( $\text{Mm}^3/\text{ano}$ ), aumento da produção de gás natural com a implementação da medida em  $\text{m}^3/\text{ano}$ , valor do gás ( $\text{USD} \cdot \text{Mm}^3$ ), ganho anual (A) em US\$ com a diminuição das perdas de produção, custo (B) em US\$ para implementação da medida, tempo de retorno (anos) da alternativa proposta.

Tabela 4-9 – Resultados - Caso C

<b>INDICADOR</b>	<b>CASO BASE</b>	<b>CASO C</b>
Valores de Eficiência Produtiva (%)	98,805	99,464
Perda Anual de Gás (%)	1,198	0,536
Volume Produzido de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	5,77E+05	5,81E+05
Total de Produção de Gás Perdido (Mm <sup>3</sup> ) em 20 anos	1,40E+05	6,26E+04
Perda Média de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	6,98E+03	3,13E+03
Aumento da produção de Gás Natural com a implementação da medida em m <sup>3</sup> por ano	-	3,85E+03
Valor do gás (USD*Mm <sup>3</sup> )	-	120
Ganho anual (A) em US\$ com a diminuição das perdas de produção	-	461.827,20
Custo (B) em US\$ para implementação da medida	-	8.000.000,00
Tempo de retorno (anos)	-	17 anos e 4 meses

Da Tabela 4-9 verifica-se que eficiência produtiva média obtida para a simulação do Caso C foi de aproximadamente 99,464%, o que representa uma perda anual de gás de 0,536% da capacidade de produção da unidade de compressão, correspondendo a um aumento de 7,732 E+04 Mm<sup>3</sup> na vida útil da unidade.

A Figura 4-11 mostra a distribuição da eficiência produtiva ao longo da vida útil da unidade, proposta no Caso C.

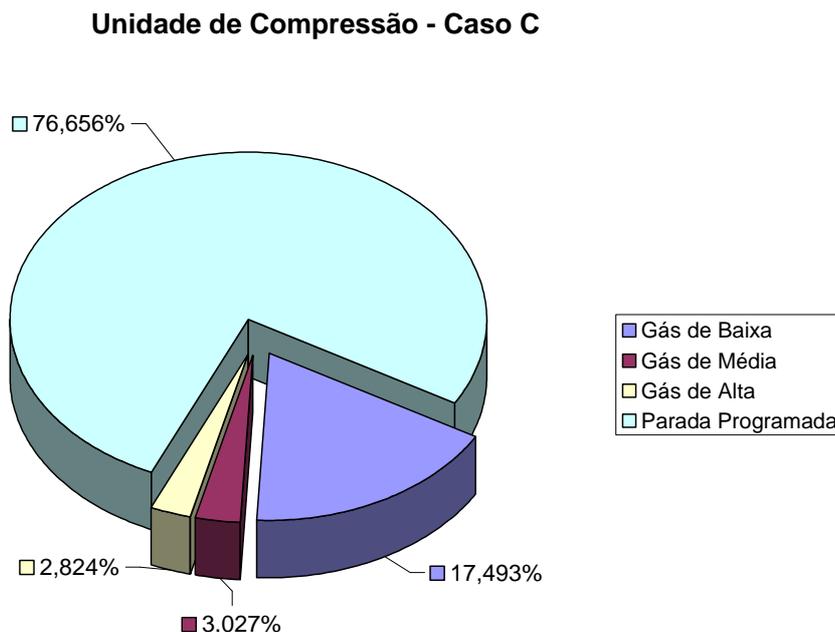


**Figura 4-11 – Eficiência Produtiva Anual - Caso C**

A Tabela 4-10 apresenta as contribuições percentuais por sistema para a perda de eficiência da Unidade de Compressão analisada no Caso C. Estes resultados, referentes à perda relativa global (%), estão apresentados em forma gráfica na Figura 4-12.

**Tabela 4-10 – Contribuição para perda de eficiência por sistema – Caso C**

Sistema	Perda Absoluta	Perda Relativa
Gás de Baixa	0,094%	17,493%
Gás de Média	0,016%	3,027%
Gás de Alta	0,015%	2,824%
Parada Programada	0,411%	76,657%
Total	0,536%	100,000%



**Figura 4-12 – Contribuição dos sistemas na perda de eficiência produtiva - Caso C**

Analisando-se a Figura 4-12 pode-se verificar que a parada programada contribui para as perdas observadas da unidade com 76,656%; enquanto os sistemas de baixa, média e alta contribuem com 17,493%, 3,027% e 2,824% respectivamente. No entanto, apesar da parada programada ser o maior contribuinte para as perdas observadas, não é possível se propor nenhuma análise em relação a mesma, pois esta está baseada em fundamentos legais tais como a NR-13, relacionada a inspeção de vasos de pressão.

Sendo assim, da mesma forma que os casos B e C, pode-se verificar que a meta estabelecida para a eficiência produtiva da unidade foi atingida.

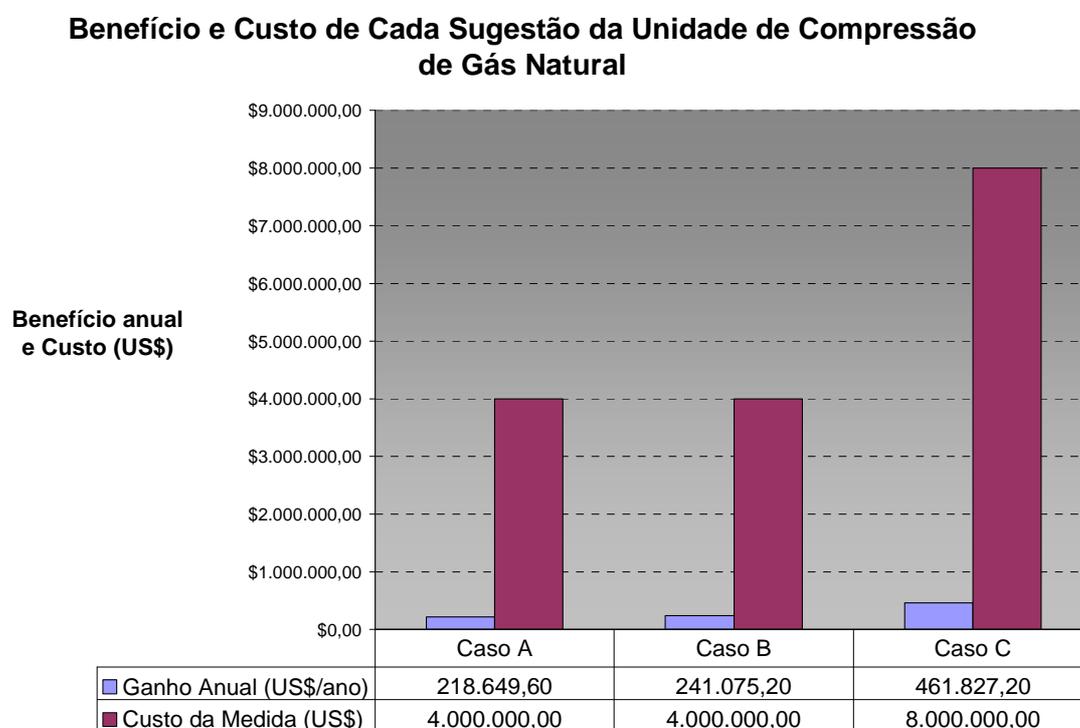
A decisão de implementar dois novos pacotes de compressão, sendo um redundante aos compressores C-005 do sistema de baixa pressão e outro redundante aos compressores C-002, do sistema de média pressão, requer uma análise de custo-benefício desta alternativa. Os resultados da avaliação econômica para esta configuração foram calculados a partir dos valores da Tabela 3-2.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4-9, verifica-se que a inclusão de dois compressores redundantes (um no sistema de baixa pressão e outro no sistema de média pressão) proporcionou aumento da produção anual de 3.848,56 Mm<sup>3</sup> de gás, o que corresponde a um ganho anual de US\$ 461.827,20.

O custo referente à implementação de dois novos pacotes de compressão adicionados deve ser descontado do ganho que os mesmos proporcionam. Desta forma, o tempo de retorno do capital investido para o Caso C foi de 17 anos e 4 meses.

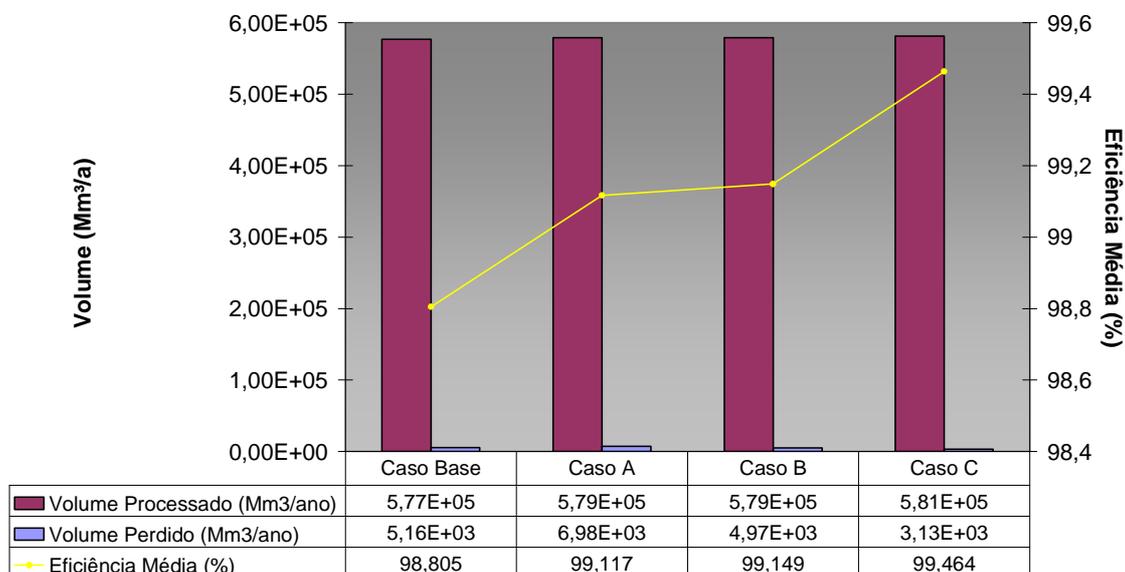
A partir da análise dos Casos Alternativos verificou-se que todos foram capazes de atingir a meta estabelecida para uma unidade de compressão, correspondente a uma eficiência produtiva de 99%. Dessa forma, o fator decisivo na escolha da melhor alternativa foi a análise de custo-benefício.

A Figura 4-13 apresenta os ganhos anuais e os custos de todas as medidas propostas e a Figura 4-14 apresenta o volume processado de gás com as medidas propostas, os seus respectivos volumes perdidos e a eficiência média obtida.



**Figura 4-13 – Benefício e Custo Anual de Cada Sugestão da Unidade de Compressão**

**Volume Processado, Perdido e Eficiência Média da Unidade de Compressão de Gás Natural**



**Figura 4-14– Volume Processado, Perdido e Eficiência média da Unidade de Compressão de Gás Natural**

No cálculo realizado para a obtenção do balanço final (saldo obtido com a implementação dos casos alternativos), os custos de projeto, obras civis, montagem, instalação e manutenção não foram contabilizados no custo total. Essa consideração pôde ser feita visto que estes custos adicionais são compensados com o ganho referente à diminuição das multas por atraso de entrega do produto, que ocorre em consequência da melhoria dos índices de confiabilidade.

A Tabela 4-11 contém o resumo dos resultados obtidos dos casos propostos.

Tabela 4-11 – Resultados dos casos propostos

<b>INDICADOR</b>	<b>CASO BASE</b>	<b>CASO A</b>	<b>CASO B</b>	<b>CASO C</b>
Valores de Eficiência Produtiva (%)	98,805	99,117	99,149	99,464
Volume Produzido de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	5,77E+05	5,79E+05	5,79E+05	5,81E+05
Total de Produção de Gás Perdido (Mm <sup>3</sup> ) em 20 anos	1,40E+05	1,03E+05	9,94E+04	6,26E+04
Perda Média de Gás (Mm <sup>3</sup> ) por ano	6,98E+03	5,16E+03	4,97E+03	3,13E+03
Aumento da produção de Gás Natural com a implementação da medida em m <sup>3</sup> por ano	-	1.822,08	2,01E+03	3,85E+03
Valor do gás (USD*Mm <sup>3</sup> )	-	120,00	120,00	120,00
Ganho anual (A) em US\$ com a diminuição das perdas de produção	-	218.649,60	241.075,20	461.827,20
Custo (B) em US\$ para implementação da medida	-	4.000.000,00	4.000.000,00	8.000.000,00
Tempo de retorno (anos)	-	18 anos e 4 meses	16 anos e 7 meses	17 anos e 4 meses

## 5 CONCLUSÃO

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

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, a partir dos dados e premissas consideradas, obteve-se para o Caso Base da Unidade de Compressão de Gás Natural uma Eficiência Produtiva Média de 98,802%, estando o mesmo abaixo da meta estabelecida para a operação de uma unidade de compressão (este valor é de 99,0%).

As maiores influências nas perdas da unidade para o caso base (de 1,198%) foram: o sistema de gás de média pressão, com 30,445%, no qual os compressores C-002 foram responsáveis por 90,87%; sistema de gás de baixa, principalmente os compressores C-005, responsável por 72,78% das perdas, e correspondente à 33,909% das perdas da unidade de compressão; e Parada Programada da unidade que contribuiu com 34,379% das perdas.

Os componentes que mais contribuíram para as perdas da unidade foram os compressores. Este resultado era esperado, visto que equipamentos rotativos, tais como compressores, possuem uma taxa de falha maior do que a de equipamentos estáticos, como vasos.

Em função deste resultado, e do número de falhas reportado, foram propostas análises de sensibilidade, considerando uma reestruturação dos compressores e implementando redundâncias nos sistemas mais críticos. Com isso, a eficiência produtiva aumentou de 98,802% no Caso Base, para 99,117% no Caso A, 99,149% no Caso B e 99,464% no Caso C.

Todas as novas configurações atingiram a meta de eficiência produtiva proposta de 99,0%, logo um fator decisivo para a escolha da melhor alternativa a ser implementada deu-se através da realização de uma análise de custo-benefício destas propostas.

Comparando os resultados obtidos nos casos alternativos A e B, percebe-se que a instalação de um compressor redundante no sistema de média pressão, proporciona um maior acréscimo de eficiência produtiva da unidade do que a instalação de redundância no sistema de compressão no sistema de baixa pressão. Nota-se que o

capital investido será recuperado em um menor prazo na Alternativa B, e este ainda proporciona uma margem de lucro anual superior em US\$ 22.425,60. Dessa forma seria mais interessante assumir-se a reestruturação proposta no Caso B do que a do Caso A, pois esta Alternativa gera maior lucro, possui um menor tempo de retorno e uma eficiência produtiva maior.

Comparando os resultados obtidos nos casos alternativos B e C, percebe-se que a instalação de dois compressores redundantes, sendo um no sistema de baixa e um no sistema de média, alcança uma maior eficiência produtiva do que na instalação de apenas um compressor no sistema de média pressão. Nota-se que no caso C a eficiência produtiva foi 99,464% e no caso B, 99,149%. Na Alternativa C a perda média de gás por ano é menor que a perda do Caso B. Além disso, o ganho anual do caso C é 1,91 vezes maior que o alcançado pelo Caso A.

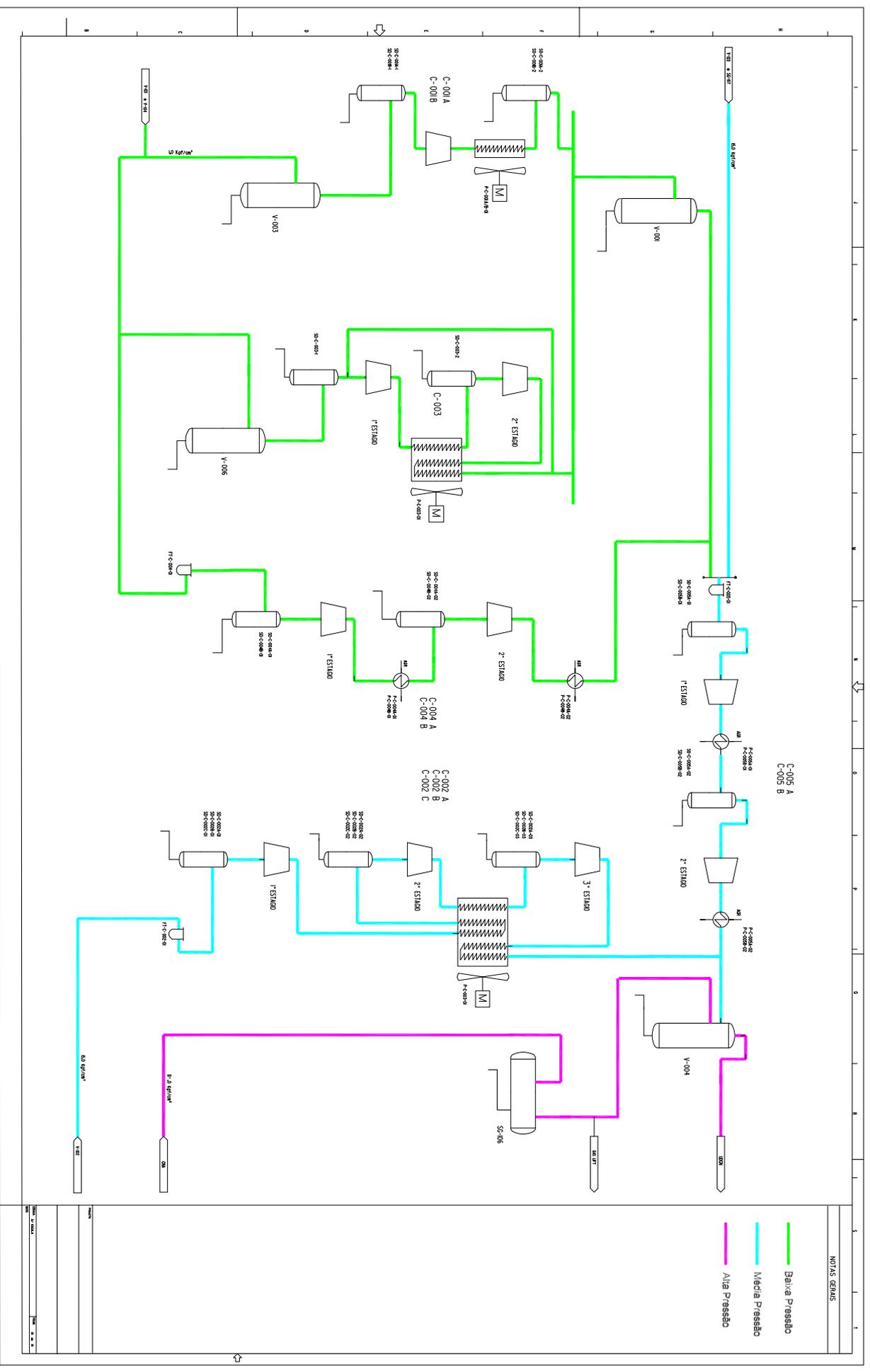
Portanto, apesar do caso B fornecer um tempo de retorno nove meses antes do previsto no caso C, a Alternativa C é a de maior interesse para o sistema, pois produz maior lucro, e possui um sistema de maior confiabilidade que os demais propostos nas alternativas A e B e do que no próprio caso base.

Vale ressaltar que a adoção desta reestruturação da unidade não foi considerada vantajosa em termos de lucratividade. Mas, apesar de não possuírem taxa de retorno atraente, propõe-se adotar a configuração do Caso C, pois o objetivo principal deste estudo é atingir a meta estabelecida de 99,00% para o índice de confiabilidade.

## 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. PAINTES, ALASTAIR R. **Life Cycle Lost Analysis using advanced simulation**. Houston, Texas: Jardine and Associates
3. SMITH, DAVID J. **Reliability, Maintainability and Risk**. 5.ed. Massachusetts: Woburn, 2000. 234 p
4. ANDREWS, J. D., MOSS, T. R. **Reliability and Risk Assessment**, 2 Ed.
5. [http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2005\\_Enegep0206\\_1305.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2005_Enegep0206_1305.pdf)
6. <http://www.gestaodoagronegocio.com.br/aziz/download/MonteCarlo.pdf>
7. <http://www.sereno.com.br/serenoware/gloss.htm>
8. [http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2005\\_Enegep0206\\_1277.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2005_Enegep0206_1277.pdf)
9. <http://www.netpedia.com.br/MostraTermo.php?TermID=653>
10. [http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/397\\_laminas\\_de\\_aula\\_cap\\_5\\_\(6\\_por\\_pagina\).pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/397_laminas_de_aula_cap_5_(6_por_pagina).pdf)
11. BORGES, CARMEM LUCIA TANCREDO. **Confiabilidade de Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro/ EE-COPPE. Parte II, 2005
12. [http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/FTA.htm](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/FTA.htm)
13. PETROBRAS
14. OREDA, **Offshore Reliability Data Handbook**, 4a Edição, OREDA Participants, SINTEF Industrial Management, Norway, 2002.
15. OREDA, **Offshore Reliability Data Handbook**, Published by OREDA Participants, Prepared by SINTEF Industrial Management and Distributed by Det Norske Veritas, 2nd Edition, 1992.
16. BASSETO, IZEDS FELIPE. **Estudo de Confiabilidade de Compressores Alternativos semi herméticos de sistema de refrigeração**. São Paulo: Universidade de São Paulo/Curso de Mestrado
17. [http://www.mte.gov.br/legislacao/normas\\_regulamentadoras/nr\\_13.asp](http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_13.asp)

# Fluxograma de Processo - Unidade de Compressão de Gás Natural



NOTAS GERAIS

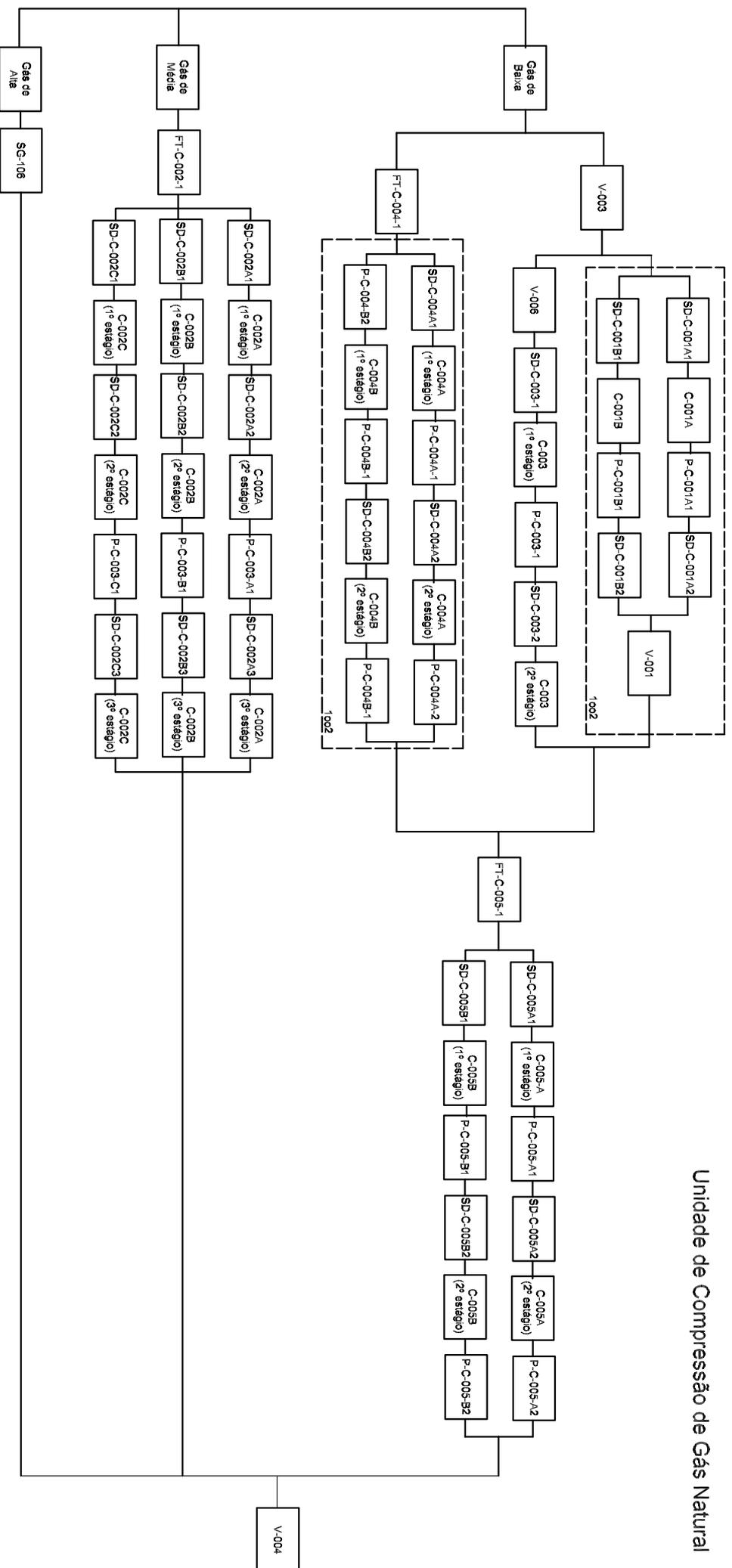
Baixa Pressão

Média Pressão

Alta Pressão

PROJETO	REVISÃO
DATA	FECHA
ELABORADO	APROVADO
DESENHADO	REVISADO

# Unidade de Compressão de Gás Natural



## Algoritmo de simulação

Para cada simulação

    Zerar tempo de falha acumulado

    Repetir até que todos componentes alcancem o tempo de vida da unidade

        Para cada componente

            Se o tempo de falha acumulado < vida útil da planta

                Sortear novo tempo de falha

                Se o novo tempo de falha < vida útil da planta – tempo de falha acumulado

                    Sortear tempo de reparo

                    Se o componente tiver *stand-by*

                        Adicionar tempo de falha sorteado ao tempo de falha acumulado

                        Pular para *sem perda*

                    Finalizar Se

                    Adicionar tempo de falha sorteado ao tempo de falha acumulado

                    Classificar o tempo de falha dentro dos vetores anuais e por componente

                    Incrementar o número de paradas em um

            Finalizar Se

        Senão

            Adicionar tempo de falha sorteado ao tempo de falha acumulado

        Finalizar Se

*Sem perda:*

    Próximo componente

    Finalizar Repetir

Próxima simulação

Adicionar a manutenção (caso exista) aos vetores anuais

Imprimir resultados

Vida útil da planta (anos):	20
Intervalo entre paradas para manutenção (anos):	5
Duração da manutenção (dias):	10
No. de simulações:	1000

1000

Gás de Baixa	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do sistema
V-001	2,45E-05	8,7	19%	0	
SD-C-001A2	2,89E-05	5,2	6%	0	1
P-C-01A2	8,56E-06	4,2	6%	0	
C-001A	1,66E-04	17,8	6%	0	
SD-C-001A1	2,89E-05	5,2	6%	0	
V-003	2,45E-05	8,7	19%	0	
C-003-1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-2	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003-01	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-003-2	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-1	2,89E-05	5,2	13%	0	
V-006	2,45E-05	8,7	13%	0	
PC-004-A2	8,56E-06	4,2	19%	0	1
C-004A-1	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A2	2,89E-05	5,2	19%	0	
PC-004A-1	8,56E-06	4,2	19%	0	
C-004A-2	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A1	2,89E-05	5,2	19%	0	
FT-C-004-1	1,19E-05	14	19%	0	
SD-C-005-A1	2,89E-05	5,2	25%	0	1
C-005-A1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-A2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-A2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A2	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B1	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B2	8,56E-06	4,2	25%	0	

Gás de Alta	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by
SG-106	2,89E-05	5,2	13%	0
V-004	2,30E-05	5,8	100%	0

Eficiência Produtiva:	99,117%
-----------------------	---------

Gás de Média	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do Sistema
FT-C-005-1	1,19E-05	14	50%	0	
C-002-A3	1,66E-04	17,8	13%	0	0
SD-C-002A3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003A1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003B1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003C1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C1	2,89E-05	5,2	13%	0	
FT-C-002-1	1,19E-05	14	38%	0	

Ano	Eficiência Produtiva
1	99,525%
2	99,528%
3	99,528%
4	99,521%
5	99,531%
6	96,790%
7	99,522%
8	99,518%
9	99,532%
10	99,529%
11	96,788%
12	99,529%
13	99,530%
14	99,526%
15	99,531%
16	96,794%
17	99,535%
18	99,521%
19	99,526%
20	99,537%



Vida útil da planta (anos):	20
Intervalo entre paradas para manutenção (anos):	5
Duração da manutenção (dias):	10
No. de simulações:	1000

1000

Gás de Baixa	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do sistema
V-001	2,45E-05	8,7	19%	0	
SD-C-001A2	2,89E-05	5,2	6%	0	1
P-C-01A2	8,56E-06	4,2	6%	0	
C-001A	1,66E-04	17,8	6%	0	
SD-C-001A1	2,89E-05	5,2	6%	0	
V-003	2,45E-05	8,7	19%	0	
C-003-1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-2	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003-01	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-003-2	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-1	2,89E-05	5,2	13%	0	
V-006	2,45E-05	8,7	13%	0	
PC-004-A2	8,56E-06	4,2	19%	0	1
C-004A-1	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A2	2,89E-05	5,2	19%	0	
PC-004A-1	8,56E-06	4,2	19%	0	
C-004A-2	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A1	2,89E-05	5,2	19%	0	
FT-C-004-1	1,19E-05	14	19%	0	
SD-C-005-A1	2,89E-05	5,2	25%	0	0
C-005-A1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-A2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-A2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A2	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B1	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B2	8,56E-06	4,2	25%	0	

Gás de Alta	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by
SG-106	2,89E-05	5,2	13%	0
V-004	2,30E-05	5,8	100%	0

<b>Eficiência Produtiva:</b>	<b>99,149%</b>
------------------------------	----------------

Gás de Média	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do Sistema
FT-C-005-1	1,19E-05	14	50%	0	
C-002-A3	1,66E-04	17,8	13%	0	1
SD-C-002A3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003A1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003B1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003C1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C1	2,89E-05	5,2	13%	0	
FT-C-002-1	1,19E-05	14	38%	0	

Ano	Eficiência Produtiva
1	99,566%
2	99,558%
3	99,564%
4	99,560%
5	99,560%
6	96,814%
7	99,559%
8	99,566%
9	99,565%
10	99,564%
11	96,827%
12	99,556%
13	99,556%
14	99,563%
15	99,563%
16	96,820%
17	99,557%
18	99,559%
19	99,560%
20	99,548%



Vida útil da planta (anos):	20
Intervalo entre paradas para manutenção (anos):	5
Duração da manutenção (dias):	10
No. de simulações:	1000

1000

Gás de Baixa	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do sistema
V-001	2,45E-05	8,7	19%	0	
SD-C-001A2	2,89E-05	5,2	6%	0	1
P-C-01A2	8,56E-06	4,2	6%	0	
C-001A	1,66E-04	17,8	6%	0	
SD-C-001A1	2,89E-05	5,2	6%	0	
V-003	2,45E-05	8,7	19%	0	
C-003-1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-2	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003-01	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-003-2	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-1	2,89E-05	5,2	13%	0	
V-006	2,45E-05	8,7	13%	0	
PC-004-A2	8,56E-06	4,2	19%	0	1
C-004A-1	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A2	2,89E-05	5,2	19%	0	
PC-004A-1	8,56E-06	4,2	19%	0	
C-004A-2	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A1	2,89E-05	5,2	19%	0	
FT-C-004-1	1,19E-05	14	19%	0	
SD-C-005-A1	2,89E-05	5,2	25%	0	0
C-005-A1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-A2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-A2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A2	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B1	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B2	8,56E-06	4,2	25%	0	

Gás de Alta	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by
SG-106	2,89E-05	5,2	13%	0
V-004	2,30E-05	5,8	100%	0

<b>Eficiência Produtiva:</b>	<b>98,805%</b>
------------------------------	----------------

Gás de Média	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do Sistema
FT-C-005-1	1,19E-05	14	50%	0	
C-002-A3	1,66E-04	17,8	13%	0	0
SD-C-002A3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003A1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003B1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003C1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C1	2,89E-05	5,2	13%	0	
FT-C-002-1	1,19E-05	14	38%	0	

Ano	Eficiência Produtiva
1	99,232%
2	99,218%
3	99,207%
4	99,210%
5	99,215%
6	96,490%
7	99,208%
8	99,214%
9	99,215%
10	99,208%
11	96,486%
12	99,211%
13	99,224%
14	99,210%
15	99,218%
16	96,471%
17	99,221%
18	99,212%
19	99,218%
20	99,205%



Vida útil da planta (anos):	20
Intervalo entre paradas para manutenção (anos):	5
Duração da manutenção (dias):	10
No. de simulações:	1000

1000

Gás de Baixa	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do sistema
V-001	2,45E-05	8,7	19%	0	
SD-C-001A2	2,89E-05	5,2	6%	0	1
P-C-01A2	8,56E-06	4,2	6%	0	
C-001A	1,66E-04	17,8	6%	0	
SD-C-001A1	2,89E-05	5,2	6%	0	
V-003	2,45E-05	8,7	19%	0	
C-003-1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-2	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003-01	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-003-2	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-003-1	2,89E-05	5,2	13%	0	
V-006	2,45E-05	8,7	13%	0	
PC-004-A2	8,56E-06	4,2	19%	0	1
C-004A-1	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A2	2,89E-05	5,2	19%	0	
PC-004A-1	8,56E-06	4,2	19%	0	
C-004A-2	1,66E-04	17,8	19%	0	
SD-C-004A1	2,89E-05	5,2	19%	0	
FT-C-004-1	1,19E-05	14	19%	0	
SD-C-005-A1	2,89E-05	5,2	25%	0	1
C-005-A1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-A2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-A2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-A2	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B1	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B1	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B1	8,56E-06	4,2	25%	0	
SD-C-005-B2	2,89E-05	5,2	25%	0	
C-005-B2	1,66E-04	17,8	25%	0	
P-C-005-B2	8,56E-06	4,2	25%	0	

Gás de Alta	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by
SG-106	2,89E-05	5,2	13%	0
V-004	2,30E-05	5,8	100%	0

<b>Eficiência Produtiva:</b>	<b>99,464%</b>
------------------------------	----------------

Gás de Média	Taxa de falha (1/h)	MTTR (h)	Perda de eficiência	Stand-by Individual	Stand-by do Sistema
FT-C-005-1	1,19E-05	14	50%	0	
C-002-A3	1,66E-04	17,8	13%	0	1
SD-C-002A3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003A1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-A1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002A1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003B1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-B1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002B1	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C3	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C3	2,89E-05	5,2	13%	0	
P-C-003C1	8,56E-06	4,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C2	2,89E-05	5,2	13%	0	
C-002-C1	1,66E-04	17,8	13%	0	
SD-C-002C1	2,89E-05	5,2	13%	0	
FT-C-002-1	1,19E-05	14	38%	0	

Ano	Eficiência Produtiva
1	99,875%
2	99,874%
3	99,876%
4	99,872%
5	99,882%
6	97,131%
7	99,875%
8	99,874%
9	99,877%
10	99,876%
11	97,138%
12	99,871%
13	99,873%
14	99,876%
15	99,877%
16	97,136%
17	99,875%
18	99,869%
19	99,875%
20	99,876%

