

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DO SISTEMA DE  
PRODUÇÃO DE ARGÔNIO NUMA PLANTA DE  
SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA DE GASES DO AR**

Fábio Pimentel Ribeiro  
Orientador: Prof. Enrique Andrés López Droguett

Recife, setembro de 2006

Fábio Pimentel Ribeiro

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DO SISTEMA DE  
PRODUÇÃO DE ARGÔNIO NUMA PLANTA DE  
SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA DE GASES DO AR**

Monografia apresentada à graduação  
de Engenharia de Produção da  
Universidade Federal de Pernambuco  
como requisito para a conclusão do  
curso de graduação

Orientador: Prof. Enrique Andrés López Droguett

Recife, setembro de 2006

**R484a**

**Ribeiro, Fábio Pimentel**

Análise da disponibilidade do sistema de produção de argônio numa planta de separação criogênica de gases do ar / Fábio Pimentel Ribeiro. — Recife: O Autor, 2006.  
39 f.; il., gráfs., tabs.

Monografia (TCC) Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Depto. de Engenharia de Produção, 2006.

Inclui referencias bibliográficas.

**1. Engenharia de Produção. 2. Cadeias de Markov.  
3. Disponibilidade. 4. Separação criogênica do ar.I.  
Título.**

**658.5 CDD (22.ed.)**

**UFPE/BCTG/ 2006-114**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela minha existência, e por tudo o que conquistei.

A meus pais por todo o apoio e esforço que fizeram para que chegasse até aqui.

A meus irmãos, Bruno e André por todo o companheirismo e lições aprendidas.

A minha namorada Lívia por todo o carinho, apoio e cuidado.

Aos meus verdadeiros amigos, por toda a confiança que depositaram em mim e aos momentos de felicidade que proporcionaram.

A todos os que fazem o RISCTEC, em especial ao Professor Enrique López, por toda a ajuda, paciência, confiança e ensinamentos passados.

A todos os funcionários da White Martins - Usina Cabo, em especial ao engenheiro Luiz Carlos, por todo o conhecimento passado e colaboração.

A todos os professores e funcionários da UFPE, por todo o trabalho que fazem todos os dias para que momentos como esse aconteçam na vida de todos os que entram nesta instituição.

Paradas não programadas trazem diversos inconvenientes ao processo de separação de gases do ar, que é contínuo e necessita de um tempo razoável para se estabilizar. Logo, a garantia da disponibilidade do processo e dos equipamentos, com a conseqüente diminuição do número e do tempo das paradas, é vital para a redução dos custos de manutenção. Apesar da produção de argônio não estar em crescimento de um modo geral, sua demanda cresce constantemente com a descoberta de novas aplicações. O estudo da disponibilidade do sistema de produção do argônio vem a trazer “inputs” para os gestores da empresa sobre a revisão dos procedimentos e políticas de manutenção dos equipamentos. A técnica das cadeias de Markov será utilizada para modelar o sistema por sua facilidade de aplicação e compreensão.

**Palavras-chave:** Cadeias de Markov – Disponibilidade - Separação criogênica do ar.

Nonprogrammed maintenance brings several problems to air separation process, which is continuous and needs time to be established. Maintain the process availability on high levels is very important to reduce costs on every market. Although the production of argon isn't growing, the demand is constantly increasing as new applications are being discovered. The companies must have a policy that involves the preventive and predictive maintenance on all equipments that take part in the process. The study of availability of argon separation brings inputs to managers about creating/modifying these maintenance procedures. In this study we will use the Markov chain technique to model the system, since its applicability and easiness to understanding.

**Keywords:** Markov Chain – Availability – Criogenic air separation

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 PROBLEMÁTICA .....	9
1.2 JUSTIFICATIVA .....	9
1.3 OBJETIVOS .....	9
1.3.1 OBJETIVO GERAL .....	9
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE .....	11
2.2 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS.....	12
2.2.1 PROCESSOS DE CONTAGEM .....	12
2.2.2 PROCESSO DE POISSON.....	13
2.2.2.1 PROCESSO HOMOGÊNEO DE POISSON .....	13
2.2.2.2 PROCESSO NÃO-HOMOGÊNEO DE POISSON .....	14
2.2.3 PROCESSOS DE MARKOV .....	14
2.2.3.1 PROBABILIDADES E TAXAS DE TRANSIÇÃO .....	15
2.2.3.2 CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE DE UMA CADEIA DE MARKOV.....	16
2.2.4 TESTE DE HIPÓTESES PARA MODELOS HPP E NHPP .....	17
2.2.4.1 TESTES DE TENDÊNCIA .....	17
2.2.4.2 TESTES DE ADERÊNCIA .....	18
3. O PROCESSO DE SEPARAÇÃO DO AR.....	20
3.1 HISTÓRICO .....	20
3.2 O PROCESSO DE SEPARAÇÃO DO AR.....	21
3.3 A SEPARAÇÃO DO ARGÔNIO .....	24
4. MODELAGEM E ANÁLISE DOS DADOS .....	26
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	26
4.2 APLICAÇÃO DOS TESTES.....	28
4.2.1 RESULTADOS DOS TESTES.....	28
4.3 MODELAGEM DO SISTEMA.....	30
5. CONCLUSÃO .....	37

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38
----------------------------------	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Hierarquização de um sistema.....	11
Figura 2.2 – Cadeia de Markov com 2 estados.....	16
Figura 3.1 - Efeito Joule-Thompson.....	20
Figura 3.2 – Coluna dupla de separação do ar.....	21
Figura 3.3 – Fluxograma da liquefação de gases do ar.....	23
Figura 3.4 – Fluxograma da separação do argônio. ....	25
Figura 4.1 – Diagrama de blocos para o sistema em estudo .....	27
Figura 4.2 – Cadeia de Markov para o sistema de produção de argônio.....	32
Figura 4.3 – Gráfico da disponibilidade versus tempo em horas .....	34
Figura 4.4 – Gráfico das probabilidades de falha de cada subsistema x sistema .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela de temperaturas de ebulição para dada pressão dos componentes.....	21
Tabela 4.1 – Subsistemas definidos e respectivos componentes.....	28
Tabela 4.2 – Teste de Laplace e MIL-HDBK-189. ....	29
Tabela 4.3 – Cálculo do p-valor para cada um dos testes.....	29
Tabela 4.4 – Teste de Kolmogorov-Smirnov e o p-valor correspondente.....	30
Tabela 4.5 – Taxas de falha e reparo dos subsistemas .....	31
Tabela 4.6 – Estados da cadeia de Markov do sistema em estudo .....	31
Tabela 4.7 – Disponibilidade do sistema em função do tempo em horas.....	33
Tabela 4.8 – “Rankeamento” dos subsistemas .....	35

---

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 PROBLEMÁTICA**

O mercado de gases do ar torna-se cada vez maior e mais competitivo, visto que novas aplicações que necessitam destes são descobertas num ritmo desenfreado. Seja na indústria, em hospitais ou pequenos negócios, o uso de gases em sua forma pura traz uma maior estabilidade e conformidade ao processo/produto oferecidos aos clientes.

O processo de separação do ar necessita de equipamentos específicos, constituídos de materiais relativamente caros, pois precisam ter uma alta resistência mecânica e química, já que se trabalha com temperaturas criogênicas. A quebra destes equipamentos em virtude de falta de manutenção preventiva é algo extremamente danoso a essas empresas, visto seu custo elevado.

A análise da disponibilidade deste sistema vem a trazer aos gestores os “inputs” necessários à tomada de decisão quanto à estratégia de manutenção a ser adotada na empresa.

### **1.2 JUSTIFICATIVA**

Paradas não programadas trazem diversos inconvenientes ao processo estudado, que é contínuo e necessita de um tempo razoável para se estabilizar. Logo, a garantia da disponibilidade do processo e dos equipamentos, com a conseqüente diminuição do número e do tempo das paradas, é vital para a redução dos custos de manutenção.

A motivação para a realização deste trabalho está no fato de que para se produzir o argônio é necessária uma elevada quantidade de energia (o mesmo só se liquefaz em temperaturas abaixo de  $-186^{\circ}\text{C}$  na pressão de 1 atm), e manutenções dispendiosas nos equipamentos. Sendo assim, um aumento da disponibilidade do processo vem trazer uma elevação significativa na lucratividade, com a redução de tais custos, bem como uma maior eficiência da planta, com a redução dos tempos e números de paradas.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é analisar a disponibilidade do sistema de produção de argônio em uma planta de separação de gases do ar, localizada no município de Cabo de Santo Agostinho-PE, utilizando para isso a técnica das cadeias de Markov.

---

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivos específicos:

Revisão de todos os conceitos que dão fundamento para a realização de todo o trabalho;

O encontro de um modelo para analisar a disponibilidade do sistema de forma a se adequar à realidade do processo;

Calcular a disponibilidade do sistema em estudo;

### 1.4 ESTRUTURADO TRABALHO

O primeiro capítulo mostra a motivação e a razão de ser do trabalho a ser feito, bem como mostra os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo faz uma breve revisão bibliográfica dos conceitos a serem aplicados no trabalho.

O terceiro capítulo explica como funciona o processo de separação de gases do ar para que seja melhor compreendido o sistema em estudo.

O quarto capítulo exhibe como foi feita a modelagem, os testes que foram aplicados e ainda mostra os resultados que foram obtidos ao final do estudo.

No quinto capítulo é feita uma conclusão do trabalho com uma síntese de tudo o que foi feito.

---

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE

Antes da definição das metodologias utilizadas para a quantificação da disponibilidade do sistema, é importante a revisão de alguns conceitos, como sistema, subsistema, confiabilidade, disponibilidade e sistemas reparáveis.

Um sistema é um conjunto de subsistemas que por sua vez é um conjunto de componentes. Pode-se citar como exemplo o caso em estudo, no qual o sistema a ser estudado é o sistema de produção de argônio, sendo o conjunto de vários subsistemas, como o subsistema “purificação de argônio” que possui como componentes “remoção de oxigênio” e “remoção de nitrogênio”. Vale ressaltar que devido ao nível de detalhe que se tem dos dados disponíveis, não foi possível se chegar ao nível de componente em todos os subsistemas do sistema estudado.

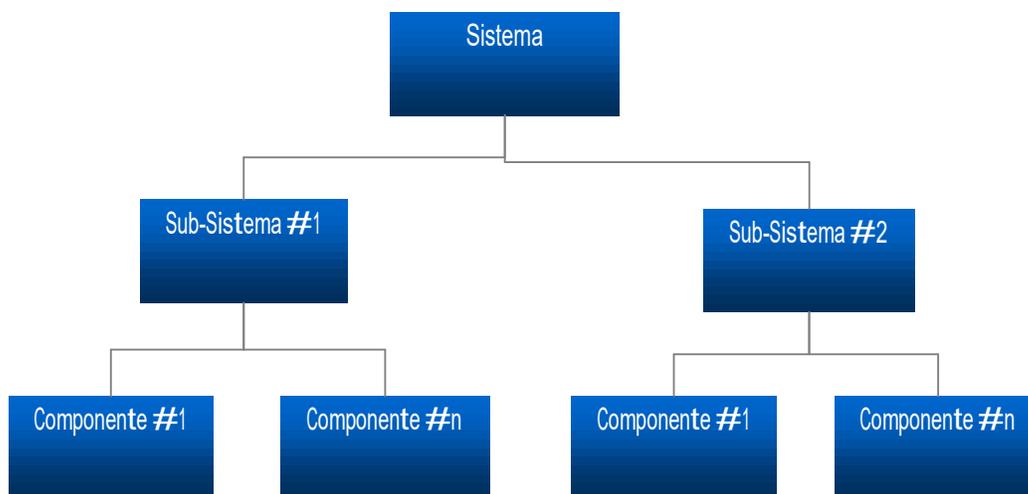


Figura 2.1 – Hierarquização de um sistema.

Fonte: O autor

Segundo Droggett (2002a), “confiabilidade é a probabilidade que um sistema irá realizar uma determinada função por um dado período de tempo sob condições operacionais específicas”. A disponibilidade de um sistema, ainda segundo Droggett (2002a), pode ser definida como “a probabilidade que um sistema está operacional (realizando a sua função) em um dado instante quando utilizado sob condições específicas”.

A diferença entre confiabilidade de um sistema e sua disponibilidade está no fato de que a confiabilidade mede a probabilidade do sistema operar satisfatoriamente de um tempo referencial “0” até um determinado tempo “t”, enquanto a disponibilidade nos diz a probabilidade do sistema estar operando em um dado instante, levando em conta o tempo em que o equipamento está operante e o tempo em que está não-operante.

---

Pode-se considerar um sistema reparável aquele em que havendo a ocorrência de uma falha, um reparo pode ser feito e assim o sistema volta ao estado operacional, sem a necessidade de substituição do mesmo. A partir desta definição pode-se notar que a maioria dos equipamentos que hoje se utilizam são sistemas reparáveis, como automóveis, em que no caso de uma falha, basta levá-lo à oficina para ser reparado e então voltar a funcionar. Vale ressaltar que nem sempre é vantajoso se realizar um reparo, devido a esse custo poder ser maior do que o bem novo, como por exemplo, nunca se fala em consertar um CD-ROM cuja unidade ótica está com defeito, devido ao custo da unidade ser praticamente igual ao custo de um CD-ROM novo.

A diferença entre um sistema reparável e um sistema não-reparável está no fato de que enquanto para um sistema reparável, várias falhas podem ocorrer (sofrendo reparos e voltando para o estado operacional), num sistema não-reparável apenas uma falha pode ocorrer.

## **2.2 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS**

Segundo Drogue (2002b), “um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias que descrevem a evolução no tempo de algum processo (físico, químico, biológico, etc)”. Em outras palavras, é uma função  $X(t)$ , com  $t \in T$ , que associa a cada índice  $t$  uma variável aleatória. No contexto da confiabilidade, o índice  $t$  representa o tempo e a variável aleatória  $X(t)$  representa o estado do processo no instante  $t$ .

Há dois tipos de processos estocásticos, o de tempo discreto e o de tempo contínuo. Um processo estocástico é dito ser de tempo discreto quando o conjunto  $T$  é um conjunto contável, quando o conjunto  $T$  é um intervalo do conjunto dos números reais  $\mathfrak{R}$ , então o processo é dito contínuo.

Um exemplo de processo estocástico é a seqüência dos resultados que se obtém ao lançar uma moeda diversas vezes, neste caso, se trata de um processo estocástico de tempo discreto.

A seguir, serão descritos os processos estocásticos utilizados na modelagem e análise dos dados que representam as falhas no sistema considerado.

### **2.2.1 PROCESSOS DE CONTAGEM**

Um processo estocástico é um processo de contagem se representa o número de eventos ocorridos até um certo tempo  $t$ . Se  $N(t)$  é a variável aleatória que descreve este processo, e as seguintes condições são satisfeitas, conforme Ross (2000):

- (1)  $N(t) \geq 0$ ;
- (2)  $N(t)$  assume valores inteiros;

- 
- (3) Se existe  $s < t$ , então  $N(s) \leq N(t)$ ;
  - (4) Para  $s < t$ ,  $N(t) - N(s)$  é igual ao número de eventos que ocorreu no intervalo  $(s,t]$ , então pode-se dizer que o processo é um processo de contagem.

Um processo de contagem possui dois tipos de incrementos: incrementos independentes e incrementos estacionários. O processo contém incrementos independentes se o número de eventos que ocorre em intervalos de tempo disjuntos são independentes, e contém incrementos estacionários se a distribuição do número de eventos que ocorre em qualquer intervalo de tempo depende apenas do comprimento do intervalo de tempo, segundo Ross (2000). De acordo com as definições acima, conclui-se que um processo de contagem pode ter incrementos independentes ou incrementos estacionários ou os dois tipos.

### 2.2.2 PROCESSO DE POISSON

Quando se quer estudar eventos que se distribuem aleatoriamente de acordo com uma intensidade constante  $\lambda$ , deve-se utilizar a distribuição de Poisson. Pode-se definir a intensidade  $\lambda$  como um número de eventos ocorridos num determinado espaço ou tempo, conforme Droguett (2002b), como por exemplo, o número de falhas ocorridas num equipamento por ano (falhas/ano), o número de balas que conseguiram trespassar um colete “a prova de balas”, entre outros.

Uma variável aleatória possui uma distribuição seguindo uma Poisson se tem a distribuição de probabilidade representada pela equação 2.1, conforme Droguett (2002a):

$$P(x) = \frac{\rho^x e^{-\rho}}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

onde  $\rho$  é a média da distribuição, e é dada pela equação 2.2:

$$\rho = \lambda t \quad (2.2)$$

#### 2.2.2.1 PROCESSO HOMOGENEO DE POISSON

Um processo de contagem é um processo homogêneo de Poisson (HPP) com  $[N(t), t \geq 0]$  se as seguintes condições são satisfeitas, segundo Rigdon (2000):

- (1)  $N(0) = 0$ ;
- (2) O processo tem incrementos estacionários e independentes;
- (3)  $P[N(h) = 1] = \lambda \cdot h + o(h)$ ;

$P[N(h) \geq 2] = o(h)$ , onde  $o(h)$  é definido a partir da função  $f(\cdot)$  da forma representada na equação 2.3:

---


$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h)}{h} = 0 \quad (2.3)$$

Ou seja, a probabilidade de existirem duas ou mais falhas em um quando o tempo tende para 0 é zero.

A partir das condições necessárias para se ter um HPP, conclui-se que essa modelagem é adequada com dados que sejam independentes e se distribuam de acordo com a distribuição exponencial.

É importante ressaltar que o número de eventos em um intervalo de comprimento  $t$  de um HPP é distribuído por uma Poisson com média  $\lambda t$ , ou seja, para todo  $s, t \geq 0$ , tem-se (equação 2.4):

$$P\{N(t+s) - N(s) = n\} = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}, \text{ com } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.4)$$

### 2.2.2.2 PROCESSO NÃO-HOMOGÊNEO DE POISSON

A diferença básica entre um HPP e um processo não-homogêneo de Poisson (NHPP) é que enquanto um HPP possui uma taxa de falha constante, um modelo NHPP possui uma função intensidade  $\lambda(t)$  com  $t \geq 0$  e deve satisfazer as seguintes condições, segundo Rigdon (2000):

- (1)  $N(0) = 0$ ;
- (2) O processo possui incrementos independentes;
- (3)  $P[N(t+h) - N(t) \geq 2] = o(h)$
- (4)  $P[N(t+h) - N(t) = 1] = \lambda(t) \cdot h + o(h)$

Tal processo também segue uma distribuição Poisson, mas com média representada pela equação 2.5:

$$m(t) = \int_0^t \lambda(y) dy \quad (2.5)$$

### 2.2.3 PROCESSOS DE MARKOV

A análise markoviana é uma ferramenta que permite modelar o comportamento da confiabilidade e disponibilidade de um sistema, utilizando um diagrama que consiste nos estados possíveis em que um sistema pode se encontrar e suas transições. Tais transições representam as taxas de falha e reparo dos componentes ou subsistemas.

A característica principal de um processo de Markov está na propriedade markoviana, ou falta de memória, que diz que o estado em que o sistema se encontra em dado momento só depende do estado imediatamente anterior que este ocupava, ou ainda, que o próximo estado

que o sistema irá ocupar só depende do estado em que ele se encontra neste momento. Segundo Droguett (2002b), a expressão probabilística da falta de memória segue na equação 2.6:

$$P[X(t+v) = j | X(t) = i, X(u) = x(u)] = P[X(t+v) = j | X(t) = i], \quad (2.6)$$

para todo  $x(u)$ ,  $0 \leq u < t$ .

Onde  $P[X(t) = j]$  significa a probabilidade do sistema estar no estado  $j$ , no instante  $t$ . As probabilidades condicionais  $P[X(t) = j]$  são as probabilidades de transição do processo de Markov, quando tais probabilidades não dependem do tempo “ $t$ ”, mas apenas do intervalo de tempo “ $v$ ”, as probabilidades são chamadas de estacionárias, sendo pela equação 2.7:

$$P[X(t+v) = j | X(t) = i] = P_j(v), \quad (2.7)$$

para  $t, v > 0$ , e  $i, j = 0, 1, 2, \dots, n$ .

Como as probabilidades estacionárias não variam com o tempo, as taxas de transição são constantes, o que permite a utilização da distribuição exponencial para a modelagem dessas taxas.

Em resumo, se a variável aleatória  $X(t)$  é o estado em que o sistema se encontra no tempo  $t$ , e se tal variável segue a propriedade markoviana, então se conclui que o processo estocástico é um processo de Markov.

### 2.2.3.1 PROBABILIDADES E TAXAS DE TRANSIÇÃO

Segundo Droguett (2002b), as probabilidades de transição devem obedecer a três condições:

$$(1) P_{ij}(t) \geq 0; t > 0;$$

$$(2) \sum_{j=0}^n P_{ij}(t) = 1; t > 0;$$

$$(3) P_{ij}(t+v) = \sum_{k=0}^n P_{ik}(t) \cdot P_{kj}(v); t, v > 0,$$

As taxas de transição são dadas pela equação 2.8:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[X(t+\Delta t) = j | X(t) = i]}{\Delta t} \quad (2.8)$$

Como já foi dito, a taxa de transição  $\lambda$  é constante, logo, o tempo em que o sistema passa num mesmo estado  $i$  até passar para um estado  $j$  segue uma distribuição exponencial com parâmetro  $\lambda_{ij}$ .

---

### 2.2.3.2 CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE DE UMA CADEIA DE MARKOV

A confiabilidade de uma cadeia de Markov pode ser definida como a probabilidade do sistema não deixar o subconjunto dos estados operacionais durante um certo intervalo de tempo, segundo Droguett (2002b). Podendo ser calculada como segue na equação 2.9:

$$R(t) = \sum_{k \in D} P_k(t); \quad (2.9)$$

onde, D é o subconjunto de todos os estados em que o sistema se encontra em operação.

A disponibilidade instantânea do sistema possui a mesma expressão da confiabilidade, porém um significado diferente. Como já foi dito, um sistema está disponível quando se encontra operando em um dado instante de tempo t, logo a disponibilidade instantânea de uma cadeia de Markov é a probabilidade de o sistema estar em qualquer estado operacional no instante t.

Segue um exemplo para ilustrar o encontro das expressões da disponibilidade e confiabilidade. Tem-se um sistema com 2 estados, disponível e indisponível, o sistema falha se o componente falhar, e está operando quando este sofre um reparo ou não falha. A figura 2.2 mostra a cadeia de Markov para este exemplo:

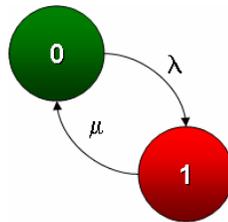


Figura 2.2 – Cadeia de Markov com 2 estados.  
Fonte: O autor

Onde  $\lambda$  é a taxa de falha do componente e  $\mu$  é a taxa de reparo. O estado 0 representa que o sistema está operando e o 1, o sistema não está operando.

A probabilidade deste sistema se encontrar no determinado estado 0 no instante  $t + \Delta t$ , pode ser traduzida como a probabilidade do sistema estar no estado 0 no instante t, subtraída da probabilidade de ele passar para outro estado no instante  $\Delta t$ , equação 2.10:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) + P_1(t)\Delta t\mu - P_0(t)\Delta t\lambda \quad (2.10)$$

Pode-se empregar o mesmo raciocínio para encontrar a probabilidade do sistema se encontrar no estado 1, ou seja, equação 2.11:

$$P_1(t + \Delta t) = P_1(t) + P_0(t)\Delta t\lambda - P_1(t)\Delta t\mu \quad (2.11)$$

Dividindo todos os membros por  $\Delta t$ , tem-se as equações 2.12 e 2.13:

$$\frac{P_0(t+\Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = P_1(t)\mu - P_0(t)\lambda \quad (2.12)$$

$$\frac{P_1(t+\Delta t) - P_1(t)}{\Delta t} = P_0(t)\lambda - P_1(t)\mu \quad (2.13)$$

Aplicando-se o limite com  $\Delta t$  tendendo para 0, as equações diferenciais são encontradas, e aplicando a transformada de Laplace para cada equação, tem-se o seguinte sistema de equações 2.14 e 2.15:

$$sP_0^*(s) - 1 = P_1^*(s)\mu - P_0^*(s)\lambda \quad (2.14)$$

$$sP_1^*(s) = P_0^*(s)\lambda - P_1^*(s)\mu \quad (2.15)$$

Resolvendo este sistema, tem-se a equação 2.16, (2.16)

$$P_0^*(s) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{\lambda + \mu + s} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{s}$$

aplicando a transformada inversa de Laplace, tem-se a expressão representada pela equação 2.17:

$$P_0(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2.17)$$

Como a disponibilidade de um sistema é a probabilidade do mesmo estar operando no instante  $t$ , pode-se dizer que esta expressão é a disponibilidade instantânea do sistema.

## 2.2.4 TESTE DE HIPÓTESES PARA MODELOS HPP E NHPP

### 2.2.4.1 TESTES DE TENDÊNCIA

Testes de hipóteses são usados com o intuito de definir se uma amostra segue algum modelo. A definição das hipóteses a serem usadas depende do tipo de informação que se quer extrair dos dados, como por exemplo, querer testar se os dados seguem os modelos HPP ou NHPP. A proposição das hipóteses é feita em cima dos dois modelos, ou seja, pode-se querer testar se a base de dados rejeita ou não um modelo HPP (sendo esta a hipótese inicial, também chamada de hipótese nula), sendo a resposta negativa, conclui-se que há evidências o suficiente para a rejeição da hipótese nula em favor da hipótese contrária ou alternativa. Para testar estas hipóteses, são utilizados os testes de tendência, no caso, o teste de Laplace e o teste MIL-HDBK-189, conforme Crowder (1991).

---

#### 2.2.4.1.1 TESTE DE LAPLACE

O teste de Laplace trabalha com a tendência para modelagem via HPP ou NHPP. A estatística do teste de Laplace segue uma distribuição Normal padrão para o caso da não-rejeição da hipótese nula. Nesse caso, o teste usa como hipótese nula que os dados tendem para um modelo HPP, enquanto que a hipótese alternativa afirma que os dados tendem para um modelo NHPP. A estatística do teste é representada pela equação 2.18, conforme Crowder (1991):

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n t_i - \frac{1}{2} n t_0}{t_0(n/12)^{1/2}} \quad (2.18)$$

Quando o valor de  $|U|$  assume valores acima do intervalo de confiança de uma distribuição normal, com média e desvio padrão da amostra, então se rejeita a hipótese nula em favor da alternativa.

#### 2.2.4.1.2 TESTE MIL-HDBK-189

O teste MIL-HDBK-189, difere apenas do teste de Laplace no fato de que sua estatística segue uma distribuição diferente da de Laplace. Ela segue uma distribuição qui-quadrado com “2n” graus de liberdade sendo representada pela equação 2.19 (CROWDER, 1991) :

$$V = 2 \sum_{i=1}^n \log\left(\frac{t_i}{t_0}\right) \quad (2.19)$$

Quando se fala em tempo entre falhas, o “n” se torna “n-1”, e substitui-se  $t_0$  por  $t_n$  e V segue uma distribuição qui-quadrado com “2(n-1)” graus de liberdade. Assim como no teste de Laplace, as considerações das hipóteses são as mesmas.

#### 2.2.4.2 TESTES DE ADERÊNCIA

O número total de eventos de um processo de Poisson segue uma distribuição Poisson, mas isso não significa que os dados necessariamente deverão seguir uma Poisson. É importante ressaltar que apesar de  $N(t)$  ser uma variável discreta, a variável  $t$  é contínua e conseqüentemente pode seguir qualquer distribuição contínua. Sendo assim, é necessária a aplicação de um novo teste de hipóteses em relação à amostra para definir qual é a distribuição mais adequada, para isso pode-se utilizar os testes de aderência.

##### 2.2.4.2.1 TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

O teste de Kolmogorov-Smirnov é usado para determinar se duas distribuições de probabilidade subjacentes diferem uma da outra ou se uma das distribuições de probabilidade

---

subjacentes difere da distribuição em hipótese, em qualquer dos casos com base em amostras finitas (BARBETTA, et al, 2004).

A partir dos dados, estimam-se os parâmetros da distribuição desejada e o “p-valor” é calculado para avaliar a rejeição ou não dos dados à distribuição desejada. Segundo Barbetta (2004), “p-valor, ou probabilidade de significância, é a probabilidade da estatística do teste em questão acusar um resultado tão ou mais distante do esperado (para distribuições de referência simétrica e de testes bilaterais. Em outros casos, essa distância seria em apenas uma direção), como o resultado na amostra particular observada, supondo como a hipótese verdadeira”. O cálculo do p-valor auxilia de acordo com sua análise em relação ao nível de significância desejado, ou seja, o p-valor que se encontrar mais distante do nível de significância será considerado o mais relevante na aceitação do teste. Ainda em relação ao p-valor, existe a possibilidade de a estatística do teste desejado indicar um caminho enquanto que seu p-valor pode indicar outro. Nesse caso, leva-se em consideração a indicação do p-valor.

---

### 3. O PROCESSO DE SEPARAÇÃO DO AR

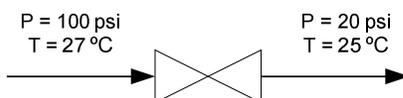
#### 3.1 HISTÓRICO

A história da separação do ar está intimamente ligada à produção de frio. A palavra criogenia significa literalmente, a produção de frio gelado. Entretanto, hoje, é utilizada como um sinônimo de baixas temperaturas. O National Bureau of Standards (NBS), dos EUA, define como criogênicas as temperaturas abaixo de  $-150^{\circ}\text{C}$ .

Em dezembro de 1877, o físico francês Cailletet conseguiu liquefazer o oxigênio, através de uma expansão brusca do gás, de 300 atm para 1 atm, utilizando um tubo capilar que o continha a uma temperatura abaixo de seu ponto crítico. A compressão se obteve através de uma bomba que injetava água por cima de mercúrio, fechando uma proveta que continha o gás. Cailletet observou no interior da proveta, convenientemente refrigerada, uma névoa formada por gotas de oxigênio líquido. Com uma diferença de 20 dias, Pictet, um físico suíço, também conseguiu liquefazer o oxigênio, utilizando um outro dispositivo engenhoso. Porém, como Cailletet, não conseguiu retirar da proveta as gotas de oxigênio líquido, que se evaporavam.

Somente em 1883, que os físicos poloneses Wroblewski e Olszewski, publicaram um primeiro estudo sobre o oxigênio e nitrogênio líquido, que haviam conseguido conservar, durante certo tempo, em um vaso aberto.

O desenvolvimento industrial da liquefação do ar, entretanto, só foi começar 12 anos depois, em 1894, quando Carl Von Linde, sendo patrocinado por uma cervejaria irlandesa, conseguiu pôr em prática o efeito Joule-Thompson (ver figura 3.1). Em seu experimento, o gás era comprimido e depois expandido por uma válvula, diminuindo sua pressão e consequentemente a temperatura, o ar então mais frio era usado como uma corrente para resfriar o ar comprimido, resfriando-o mais ainda. Esse ciclo era feito até que se conseguisse liquefazer o ar através da reutilização do mesmo já resfriado. Este processo levava dias até que a temperatura de ebulição do ar líquido fosse alcançada.



Válvula de Expansão

Figura 3.1 - Efeito Joule-Thompson.

Fonte: O autor.

O fracionamento do ar foi obtido na virada do século, mas não se conseguiu uma pureza para o oxigênio maior que 50%. Em 1902, o filho de Carl von Linde, Friedrich,

---

produziu oxigênio e nitrogênio puros, usando a retificação do ar, através de colunas de retificação.

As colunas de retificação usadas inicialmente eram do tipo simples, e apenas produziam oxigênio puro e o nitrogênio com um percentual alto de oxigênio, o que não significa uma boa recuperação deste. Em 1910, foi desenvolvida a coluna dupla de separação do ar, sendo este método o modo mais eficiente de separação do ar e o mais utilizado até hoje.

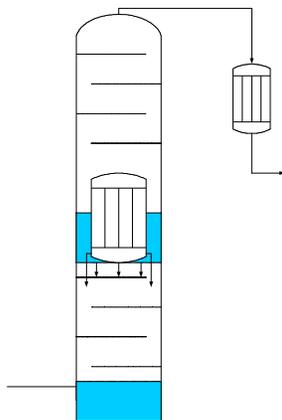


Figura 3.2 – Coluna dupla de separação do ar.  
Fonte: O autor.

No Brasil, em 1912 foi instalada a primeira planta de produção de oxigênio, porém a primeira planta de separação de ar foi montada apenas em 1974 segundo Chronicle 1879 – 1890 (2006).

### 3.2 O PROCESSO DE SEPARAÇÃO DO AR

Através da observação do processo, pode-se resumir a separação do ar em seus 3 constituintes de maior concentração como segue:

A separação do ar é possível devido às diferenças de densidade e pontos de ebulição de seus componentes, a tabela 3.1 fornece os pontos de ebulição de cada componente em diferentes pressões:

Tabela 3.1 – Tabela de temperaturas de ebulição para dada pressão dos componentes.

Fonte: White Martins Gases Ind. do Nordeste LTDA..

	1 bar	1,55 bar (Coluna Superior)	6,2 bar (Coluna Inferior)
Oxigênio	-183,0 °C	-178,6 °C	-162,3 °C
Argônio	-185,9 °C	-181,6 °C	-164,4 °C
Nitrogênio	-195,8 °C	-191,9 °C	-176,4 °C

As pressões indicadas na tabela 3.1 são a atmosférica e outras duas que são as encontradas nas colunas de destilação estudadas. É importante observar que a temperatura de

---

ebulição do nitrogênio a 6,2 bar é maior que a do oxigênio a 1,55 bar, podendo o oxigênio ser usado para condensar o nitrogênio. Isto acontece nas colunas superior e inferior, onde o nitrogênio (na forma gás) do topo da coluna inferior é condensado pela evaporação parcial do oxigênio (líquido) do fundo da coluna superior.

O processo se inicia com o ar sendo filtrado mecanicamente por uma casa de filtros para a retenção de partículas sólidas.

O ar então é comprimido num compressor de 4 estágios, sendo resfriado em cada um por meio de trocadores de calor, seguindo para um sistema de pré-resfriamento, onde a maior parte da umidade presente é condensada e drenada (pois o ar sai a uma temperatura aproximada de 4°C).

Após esta etapa o ar segue para os pré-purificadores, que são vasos contendo uma “peneira molecular” que devido a forças físicas retêm a umidade, o dióxido de carbono e hidrocarbonetos presentes no ar. Existem dois vasos semelhantes, trabalhando em paralelo, ou seja, enquanto um opera o outro regenera.

O motivo principal pelo qual a umidade e o dióxido de carbono devem ser removidos do ar de processo, é que estes compostos possuem pontos de solidificação muito acima das temperaturas criogênicas, podendo causar o entupimento das linhas de passagem de gás, ou até mesmo o rompimento das mesmas. Há ainda que se ter um cuidado especial com os hidrocarbonetos pois em determinada fase do processo, pois se tem oxigênio líquido, muito concentrado, e qualquer contato com hidrocarbonetos pode ocasionar uma explosão.

O ar, depois da remoção dos contaminantes, é resfriado a poucos graus da saturação em trocadores de calor de múltiplos passes, seguindo então para a coluna inferior.

Antes do prosseguimento, se torna importante entender o funcionamento de uma coluna de destilação.

Uma coluna é dotada de várias bandejas perfuradas, que servem como meio de troca de calor entre os fluidos. Sobre cada bandeja é encontrada uma certa quantidade de mistura de líquido + vapor saturada. Estas bandejas são dimensionadas de forma que o fluxo de vapor que entra abaixo da bandeja seja suficiente para evitar o gotejamento do líquido.

A coluna então funciona da seguinte maneira, uma massa de líquido entra no topo da coluna e vai descendo pelos pratos, enquanto uma massa de vapor entra abaixo da coluna e vai subindo pelos furos dos pratos, entrando em contato com o líquido existente. Com a troca de calor, parte do vapor se condensa e se transforma em líquido, misturando-se ao já existente, e parte sai pelo topo da coluna.

No processo de separação do ar, são utilizadas duas colunas de destilação, com pressões diferentes, sendo a inferior com pressão maior (6,2 bar) que a superior (1,55 bar).

Entre essas duas colunas há um equipamento chamado de condensador principal, que funciona como um trocador de calor, e que tem uma importante função, explicada mais a frente.

O ar, depois da remoção de água e dióxido de carbono, é resfriado a poucos graus da saturação através de uma turbina de expansão, sendo introduzido no fundo da coluna inferior. Nitrogênio líquido entra pelo topo da coluna inferior, vindo do condensador principal, e descendo pelas bandejas da coluna. Quando entram em contato, o vapor vai se enriquecendo em nitrogênio à medida que sobe na coluna, enquanto o líquido que se acumula no fundo vai se tornando rico em oxigênio. Depois o nitrogênio parte para ser condensado no condensador principal (contra a evaporação de oxigênio líquido). O nitrogênio que sai do condensador principal é usado como refluxo na coluna inferior e parte é sub-resfriado por nitrogênio gasoso e introduzido como refluxo no topo da coluna superior. O restante do nitrogênio e praticamente todo o oxigênio se acumula na coluna inferior como produto de fundo, formando uma mistura denominada “kettle”.

O “kettle”, após ser sub-resfriado por produtos gasosos é usado para condensar argônio no topo da coluna de argônio cru antes de ser enviado à coluna superior para recuperação do oxigênio.

O oxigênio produto é retirado abaixo do primeiro prato da coluna superior. A pureza do oxigênio produto é 99,5%, tendo o argônio como principal impureza. No topo da coluna superior é retirado o nitrogênio com alta pureza. Uma corrente de nitrogênio retirada da coluna superior é denominada de “waste”, e é usada na regeneração dos vasos pré-purificadores. O argônio é retirado no meio da coluna superior, com cerca de 10-13% de pureza, contendo oxigênio e nitrogênio em concentrações elevadas. Na figura 3.3, pode-se enxergar um fluxograma simplificado do processo.

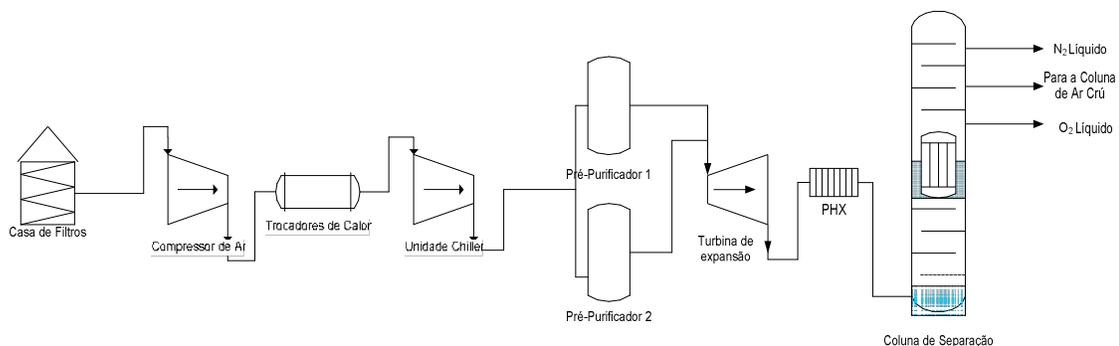


Figura 3.3 – Fluxograma da liquefação de gases do ar.  
Fonte: O autor.

---

### 3.3 A SEPARAÇÃO DO ARGÔNIO

Como o sistema a ser estudado é o sistema de produção de argônio, é necessária uma explicação melhor do funcionamento deste sistema, e seus constituintes.

Após a separação do oxigênio e nitrogênio, uma corrente de ar com aproximadamente 10% de argônio e o restante de nitrogênio e oxigênio entra na coluna de argônio cru. Oxigênio líquido é “jogado” na parte de cima da coluna para condensar o oxigênio presente na corrente de ar que entra (sendo o oxigênio drenado pelo fundo da coluna). Uma mistura pobre em  $O_2$  sai então por cima da coluna e passa por um trocador com “kettle” líquido (chama-se “kettle” uma mistura de todos os componentes na forma líquida, ou seja, tudo o que não se conseguiu alcançar a pureza desejada) condensando ainda mais  $O_2$ , que segue para um separador que retira o condensado, levando-o ao topo da coluna de argônio cru.

A corrente de ar (a aproximadamente  $-150\text{ }^\circ\text{C}$ ) segue para um trocador chamado “core”, que serve como economizador (pois o ar que entra frio, troca calor com uma corrente posterior “quente”), saindo a aproximadamente  $27\text{ }^\circ\text{C}$ . Sendo succionada por um compressor, chamado de “compressor nash”.

Depois de aquecida pelo “core”, a corrente de ar é succionada pelo “nash” e jogada no forno catalítico, onde hidrogênio é injetado para a combustão de todo o oxigênio que ainda resta na corrente de ar, seguindo para um trocador de calor com água que condensa a água e depois para dois separadores para a drenagem da mesma.

A corrente de ar que retorna para o “core” para ser resfriado antes de entrar na coluna de argônio rico, saindo com  $-145^\circ\text{C}$ .

A corrente de ar ( $N_2+Ar$ ) segue para a coluna de argônio rico, entrando no condensador de argônio, o qual fica imerso em uma “piscina” de argônio líquido fazendo com que o argônio na fase gás e parte de  $N_2$  condensem, sendo jogados para dentro da coluna. Os componentes que não condensaram ( $H_2$  e  $N_2$ ) voltam para a sucção do compressor “nash”, para diminuir a perda de  $H_2$ , que é um produto relativamente caro.

O que ocorre na coluna de argônio rico é semelhante à coluna de argônio cru, sendo que é o argônio que condensa, no trocador de nitrogênio líquido, sendo posteriormente drenado pelo fundo da coluna para os tanques de estocagem. O nitrogênio gás é retornado para o processo, para ser utilizado em outras aplicações. Na figura 3.4 pode-se observar o processo pelo fluxograma.

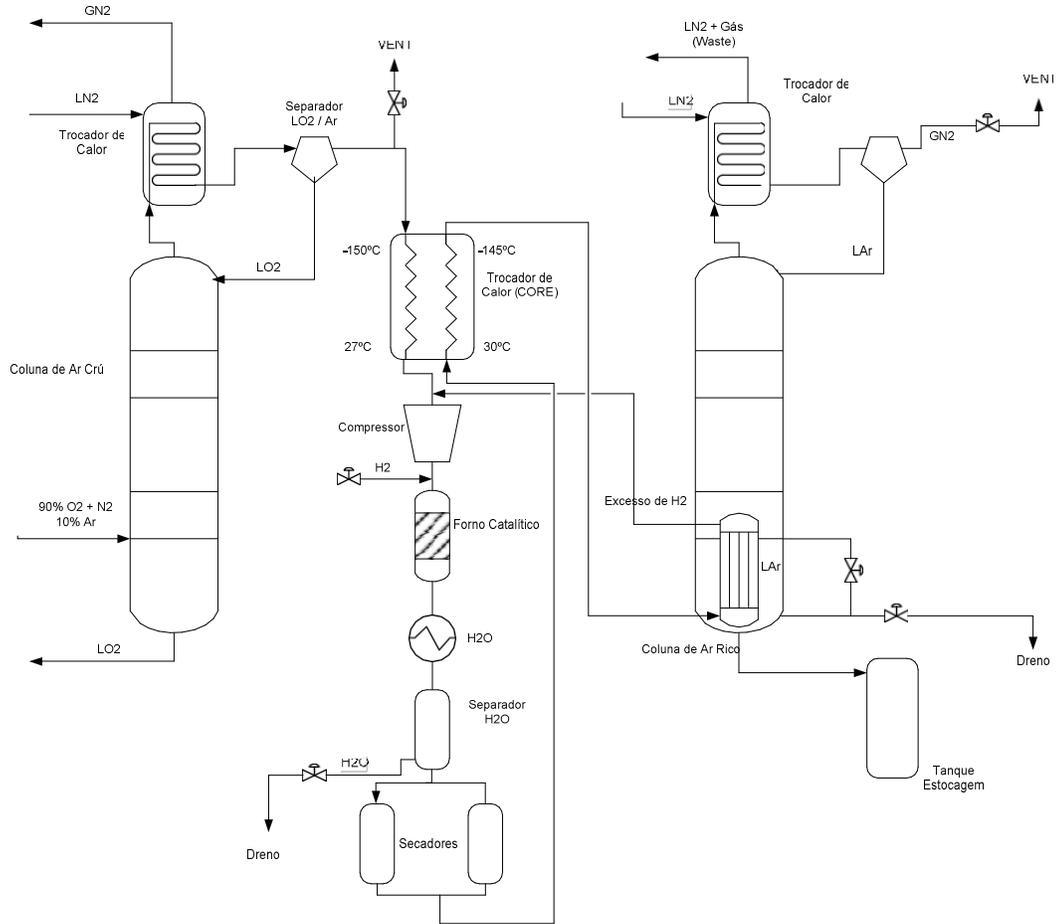


Figura 3.4 – Fluxograma da separação do argônio.  
 Fonte: O autor.

---

## **4. MODELAGEM E ANÁLISE DOS DADOS**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Os dados considerados para análise foram coletados em campo num período de 5 anos, e dizem respeito às falhas que ocorreram nos equipamentos constituintes do sistema de produção de argônio de uma empresa que trabalha no ramo de separação criogênica do ar, localizada no município de Cabo de Santo Agostinho, no estado de Pernambuco. Estes dados são válidos apenas para plantas que possuam equipamentos e processo semelhantes a esta planta.

As paradas foram registradas numa planilha eletrônica já existente na empresa, cujos campos continham: data da parada, hora inicial, hora final, motivo da parada e classificação. A data da parada é preenchida com o dia, mês e ano em que a parada ocorreu. A hora de início fornece a hora em que o sistema parou, a hora final fornece a hora em que o sistema voltou a produzir argônio. Vale salientar que esse período de tempo decorrido entre a hora inicial e final compreende: a hora em que o sistema parou, o tempo em que a equipe de manutenção levou para diagnosticar o problema, e o tempo efetivo de reparo. O motivo da parada contém a descrição do que ocorreu para a parada do sistema, e a classificação contém códigos internos da empresa para a classificação das paradas.

O processo de separação do ar é constituído de inúmeros equipamentos, porém devido à forma como as informações foram disponibilizadas, tornou-se necessária a classificação do sistema por subsistemas para que a análise se tornasse viável.

Os subsistemas foram definidos da seguinte forma::

- Rede Elétrica: este subsistema está constituído de todas as causas de falha externas ao sistema cujo controle ou minimização foge do escopo da empresa, como por exemplo, uma variação de tensão de energia elétrica fornecida pela concessionária;
- Filtragem / Compressão: além de ser uma das etapas do processo de separação do ar, a filtragem e a compressão do ar compõem um subsistema. É composto dos compressores necessários para o aumento da pressão do ar, sendo eles, o compressor de ar, o “compressor feed”, o compressor de reciclo, entre outros;
- Instrumentação: este subsistema é composto de todos os equipamentos necessários à monitoração e controle da produção, fazendo parte o PLC, analisadores e válvulas;
- Pré-Resfriamento: com a função de resfriar o ar, o pré-resfriamento é realizado por um equipamento chamado “chiller” que além de resfriar, retira umidade do ar devido à condensação. A falha desse subsistema acarretará na saturação dos pré-purificadores;

- Pré-Purificação: o subsistema de pré-purificação realiza a remoção de contaminantes presentes no ar se utilizando dos pré-purificadores. Caso haja um mau funcionamento desse subsistema, ocorrerão falhas no processo, podendo até ser catastróficas (caso não haja a remoção de hidrocarbonetos);
- Liquefação do ar: como o próprio nome já diz, esse subsistema é composto dos equipamentos que liquefazem o ar. É composto pelo condensador principal, turbinas e as colunas de destilação. A falha deste subsistema seria a falha de qualquer um de seus componentes;
- Purificação do argônio: este subsistema, como será o alvo do estudo, será subdividido em dois subsistemas, que são:
  - Remoção de O<sub>2</sub>: o sistema de remoção de O<sub>2</sub> é responsável pela retirada completa de O<sub>2</sub> na corrente de argônio + nitrogênio, sendo composto de todos os equipamentos desde a coluna de argônio cru até os vasos separadores. A falha neste subsistema pode levar à contaminação do produto com O<sub>2</sub>.
  - Remoção de N<sub>2</sub>: o sistema de remoção de N<sub>2</sub> é responsável pela retirada completa de N<sub>2</sub> na corrente de argônio, fazendo parte deste processo todos os equipamentos que estão depois dos vasos. O mau funcionamento desse subsistema, o que significa vazamento ou presença indesejada de N<sub>2</sub> na coluna de argônio rico, acarreta na falha do subsistema e conseqüentemente do sistema devido à contaminação do argônio com N<sub>2</sub>.

Como pode se perceber, a falha de qualquer subsistema acarreta na falha do sistema, ou seja, todos os subsistemas estão ligados em série e logo não há redundância no sistema. Na figura 4.1 é representado o diagrama de blocos do sistema em estudo, o qual fornece uma panorâmica de como o sistema está sendo tratado:

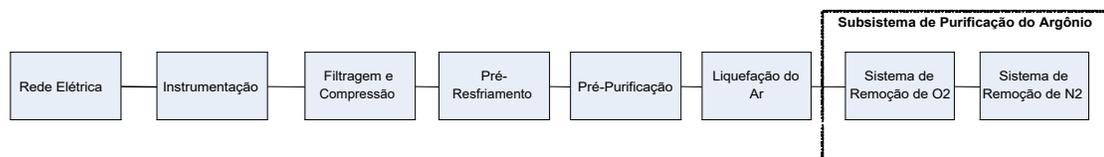


Figura 4.1 – Diagrama de blocos para o sistema em estudo.

Fonte: O autor.

A tabela 4.1 mostra os componentes que constituem cada subsistema, que serviram para classificar os subsistemas apenas, já que os dados são praticamente pontuais.

O sistema analisado é um sistema reparável, já que se pode ter um reparo no sistema caso ocorra uma falha e este volta a funcionar. Para que a análise da disponibilidade do sistema seja possível, primeiramente é necessário encontrar dados de falha e descobrir à qual distribuição de probabilidade elas se adequam.

Tabela 4.1 – Subsistemas definidos e respectivos componentes.

Fonte: O autor.

<b>Subsistema</b>	<b>Componentes</b>
<b>Rede elétrica</b>	Causa Externa Problema Elétrico
<b>Filtragem/Compressão</b>	Compressor de Ar Compressor de Reciclo Compressor FEED CP-104 CP-106 CP-107
<b>Instrumentação</b>	Estocagem PLC Outros
<b>Liquefação do Ar</b>	Liquefador Turbinas
<b>Pré-Purificação</b>	Pré-Purificadores
<b>Pré-Resfriamento</b>	Água Refrigeração Resfriador Chiller
<b>Sistema de Remoção de N2</b>	Coluna de Ar Rico Condensador Ar Rico
<b>Sistema de Remoção de O2</b>	Coluna de Ar Cru Compressor NASH CORE Estação de H2 Forno Catalítico Instabilidade Processo Secadores Trocador de Placas

A partir das descrições das paradas, as falhas podem ser classificadas por subsistema, e a partir daí é possível calcular o MTBF (tempo médio entre falhas) para se encontrar uma variável para cada subsistema.

## 4.2 APLICAÇÃO DOS TESTES

Definidos os subsistemas, parte-se para a análise de disponibilidade do sistema apresentado, já que o mesmo é reparável. Sendo assim, o primeiro passo é encontrar os tempos entre as falhas com a finalidade de estimar uma variável para cada subsistema e continuar a análise, utilizando para isso, testes de hipóteses.

### 4.2.1 RESULTADOS DOS TESTES

Na realização dos testes, a seguinte hipótese nula deve ser formulada: as variáveis podem ser modeladas por um processo homogêneo de Poisson (HPP); contra a seguinte hipótese alternativa: as variáveis podem ser modeladas a partir de um processo não-homogêneo de Poisson (NHPP). Para se validar a hipótese para um dado subsistema, é preciso testá-la de acordo com os dados fornecidos e então verificar sua tendência para cada uma dessas hipóteses.

Os testes de Laplace e o MIL-HDBK-189 foram aplicados a cada subsistema, sendo os resultados obtidos representados na tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Teste de Laplace e MIL-HDBK-189.

Fonte: O autor.

Subsistema	Teste de Laplace*	Hipótese apontada	Teste MIL-HDBK-189	Hipótese apontada
Rede Elétrica	11,7369	Alternativa	171,5892	Alternativa
Instrumentação	5,55493	Alternativa	36,45251	Nula
Filtragem e Compressão	12,736	Alternativa	251,956	Alternativa
Pré-resfriamento	3,67427	Alternativa	15,34403	Nula
Pré-purificação	4,38182	Alternativa	28,23354	Nula
Liquefação	9,02149	Alternativa	15,34403	Alternativa
Remoção de N2	6,53199	Alternativa	58,16634	Alternativa
Remoção de O2	23,6234	Alternativa	983,8864	Alternativa

Pode-se observar da tabela 4.2, que em alguns casos há uma divergência de resultados, ou seja, enquanto o teste de Laplace indica que todos os subsistemas seguem um modelo NHPP, o MIL-HDBK-189 indica, para três subsistemas, a tendência para um modelo HPP. Para que essa dualidade seja contornada, o p-valor deve ser calculado de acordo com cada um dos testes. A tabela 4.3 mostra os resultados para os p-valores:

Tabela 4.3 – Cálculo do p-valor para cada um dos testes.

Fonte: O autor.

Subsistemas	Teste de Laplace	Hipótese apontada	Teste MIL-HDBK-189	Hipótese apontada
Rede Elétrica	0,163655	Nula	2,27E-16	Alternativa
Instrumentação	0,172701	Nula	0,167311	Nula
Filtragem e Compressão	0,273371	Nula	4,95E-26	Alternativa
Pré-resfriamento	0,230647	Nula	0,710097	Nula
Pré-purificação	0,187991	Nula	0,117178	Nula
Liquefação	0,28172	Nula	5,00E-13	Alternativa
Remoção de N2	0,228835	Nula	4,21E-06	Alternativa
Remoção de O2	0,256226	Nula	2,40E-107	Alternativa

Pode-se então concluir que há fortes evidências para o uso de um modelo HPP, porém a verificação de quais distribuições de probabilidade se adequam aos dados precisa ser feita. Para encontrar tais distribuições, deve-se aplicar o teste de Kolmogorov-Smirnov, com diversas distribuições conhecidas. Na tabela 4.4 pode-se observar o resultado.

Apesar dos tempos entre falhas dos subsistemas encontrados poderem seguir ou a distribuição normal ou a distribuição exponencial, é sabido que tempos entre falhas não podem ser negativos, logo, opta-se por utilizar a distribuição exponencial. Já que o p-valor também indicou a distribuição exponencial como adequada para esses dados, assume-se que estes seguem a exponencial. A partir deste ponto, chega-se à conclusão de que é possível modelar o sistema via uma cadeia de Markov.

Tabela 4.4 – Teste de Kolmogorov-Smirnov e o p-valor correspondente.

Fonte: O autor.

Subsistemas	Distribuição Adequada	P-valor
Rede Elétrica	Exponencial	0,844
Instrumentação	Exponencial	0,086
Filtragem e Compressão	Exponencial	0,922
Pré-resfriamento	Exponencial	0,645
Pré-purificação	Normal	0,235
Liquefação	Exponencial	0,923
Remoção de N2	Exponencial	0,467
Remoção de O2	Exponencial	0,117

### 4.3 MODELAGEM DO SISTEMA

Quando as distribuições adequadas para cada subsistema são encontradas, pode-se encontrar a disponibilidade e indisponibilidade para o sistema em estudo.

Como o sistema em estudo é modelado por um processo homogêneo de Poisson, a propriedade , representada pela equação 4.1, é fundamental para a modelagem da cadeia de Markov:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t] \geq 2)}{\Delta t} = 0 \quad (4.1)$$

Ou seja, apenas um subsistema pode falhar por vez, precisando ser reparado, para que haja outra falha, em qualquer dos subsistemas.

Segundo Droggett (2002b), a taxa de falha do sistema de um componente pode ser encontrada pela equação 4.2:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (4.2)$$

Onde MTTF é o tempo médio até a falha. Como o sistema em estudo é um sistema reparável, trabalha-se com o tempo entre falhas (MTBF), logo, a taxa de falha e a taxa de reparo podem ser obtidas através das equações 4.3 e 4.4:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (4.3)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (4.4)$$

Através dos dados constantes nas planilhas, o MTBF e o MTTR podem ser obtidos, já que se tem a informação do dia a hora em que o sistema parou, com os respectivos motivos. Os seguintes valores para  $\lambda$  e  $\mu$  encontrados estão na tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Taxas de falha e reparo dos subsistemas.

Fonte: O autor.

Subsistemas	Taxa de falha ( $\lambda$ )	Taxa de reparo ( $\mu$ )
Rede Elétrica	0,001285	0,12397975
Instrumentação	0,000473	0,10965967
Filtragem e Compressão	0,001738	0,1082259
Pré-resfriamento	0,000406	0,079375579
Pré-purificação	0,000337746	0,08306275
Liquefação	0,000949	0,099081072
Remoção de N2	0,000532	0,176947653
Remoção de O2	0,005316	0,13865265

Como o sistema está em série, este estará em operação apenas quando todos os subsistemas estiverem operando. Conclui-se então a cadeia de Markov para o sistema em estudo terá 9 estados. A tabela 4.6 mostra os estados do sistema:

Tabela 4.6 – Estados da cadeia de Markov do sistema em estudo.

Fonte: O autor.

Estado	Rede Elétrica	Instrumentação	Filtragem e Compressão	Pré-resfriamento	Pré-purificação	Liquefação	Remoção de N2	Remoção de O2
0	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando
1	Falha	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando
2	Operando	Falha	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando
3	Operando	Operando	Falha	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando
4	Operando	Operando	Operando	Falha	Operando	Operando	Operando	Operando
5	Operando	Operando	Operando	Operando	Falha	Operando	Operando	Operando
6	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Falha	Operando	Operando
7	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Falha	Operando
8	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Operando	Falha

A partir deste quadro de estados, pode-se criar um diagrama de Markov representando os estados do sistema. Na figura 4.2, tem-se que o estado disponível do sistema é representado por um círculo verde, enquanto que os estados indisponíveis são representados por um círculo vermelho, as setas que saem de um estado ao outro representam as transições do sistema.

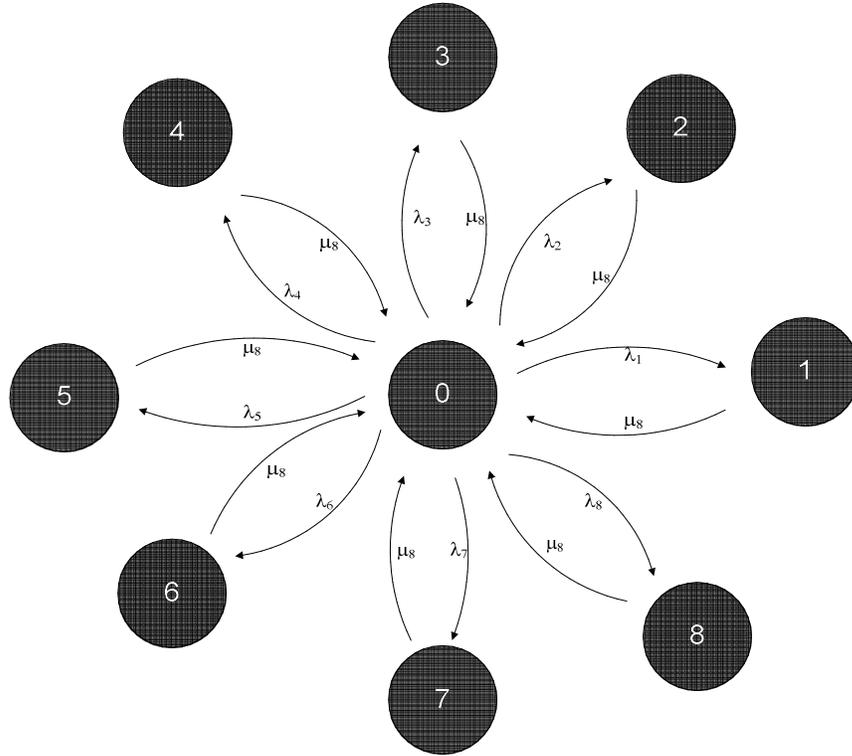


Figura 4.2 – Cadeia de Markov para o sistema de produção de argônio.  
Fonte: O autor.

Onde  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7,$  e  $\lambda_8$  representam as taxas de transição do estado 0 para os respectivos estados (falha), e  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7,$  e  $\mu_8$  representam as taxas de transição dos respectivos estados para o estado 0 (reparo).

As equações de estado para esta cadeia de Markov são pelas equações 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) + P_1(t)\Delta t\mu_1 + P_2(t)\Delta t\mu_2 + P_3(t)\Delta t\mu_3 + P_4(t)\Delta t\mu_4 + P_5(t)\Delta t\mu_5 + P_6(t)\Delta t\mu_6 + P_7(t)\Delta t\mu_7 + P_8(t)\Delta t\mu_8 - P_0(t)\Delta t\lambda_1 - P_0(t)\Delta t\lambda_2 - P_0(t)\Delta t\lambda_3 - P_0(t)\Delta t\lambda_4 - P_0(t)\Delta t\lambda_5 - P_0(t)\Delta t\lambda_6 - P_0(t)\Delta t\lambda_7 - P_0(t)\Delta t\lambda_8 \quad (4.5)$$

$$P_1(t + \Delta t) = P_1(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_1 - P_1(t)\Delta t\mu_1 \quad (4.6)$$

$$P_2(t + \Delta t) = P_2(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_2 - P_2(t)\Delta t\mu_2 \quad (4.7)$$

$$P_3(t + \Delta t) = P_3(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_3 - P_3(t)\Delta t\mu_3 \quad (4.8)$$

$$P_4(t + \Delta t) = P_4(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_4 - P_4(t)\Delta t\mu_4 \quad (4.9)$$

$$P_5(t + \Delta t) = P_5(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_5 - P_5(t)\Delta t\mu_5 \quad (4.10)$$

$$P_6(t + \Delta t) = P_6(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_6 - P_6(t)\Delta t\mu_6 \quad (4.11)$$

---


$$P_7(t + \Delta t) = P_7(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_7 - P_7(t)\Delta t\mu_7 \quad (4.12)$$

$$P_8(t + \Delta t) = P_8(t) + P_0(t)\Delta t\lambda_8 - P_8(t)\Delta t\mu_8 \quad (4.13)$$

Sendo assim, adotando a mesma metodologia usada no exemplo da seção 2.2.3.2 do capítulo 2, pode-se calcular a disponibilidade do sistema estudado, sendo esta representada pela probabilidade do mesmo se encontrar no estado 0 (equação 4.5). A tabela 4.7 mostra os valores da disponibilidade pelos respectivos tempos de missão:

*Tabela 4.7 – Disponibilidade do sistema em função do tempo em horas.*

*Fonte: O autor.*

Tempo (h)	A(t)
0	1,000000
20	0,923601
40	0,917901
60	0,917338
80	0,917272
100	0,917251
120	0,917252
140	0,917246
160	0,917246
180	0,917246
200	0,917246
220	0,917245
240	0,917245
260	0,917245
280	0,917245
300	0,917245
320	0,917245
340	0,917245
360	0,917245
380	0,917245
400	0,917245

Ou graficamente, pela figura 4.3:

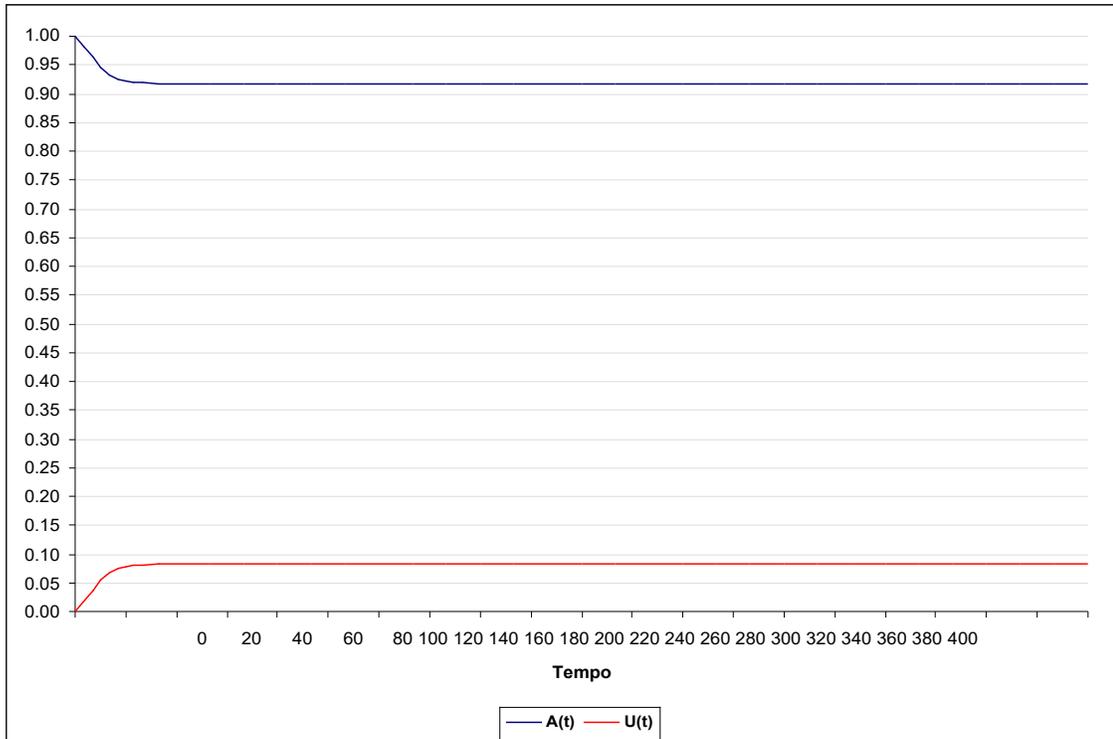


Figura 4.3 – Gráfico da disponibilidade versus tempo em horas.  
Fonte: O autor.

A evolução temporal da disponibilidade operacional é mostrada a partir da linha em azul na Figura 9. Conclui-se então que o sistema tem uma probabilidade de estar operando de 91,7245% em 220 horas de operação. A indisponibilidade pode ser analisada a partir da linha em vermelho e corresponde ao complementar da disponibilidade.

Com os resultados obtidos conclui-se que o sistema atinge o estado estacionário após as 220 horas, tendo uma disponibilidade de 91,7245%. Isso quer dizer que, após as 220 horas de operação o sistema terá sempre esta disponibilidade, pois atingiu o estado estacionário.

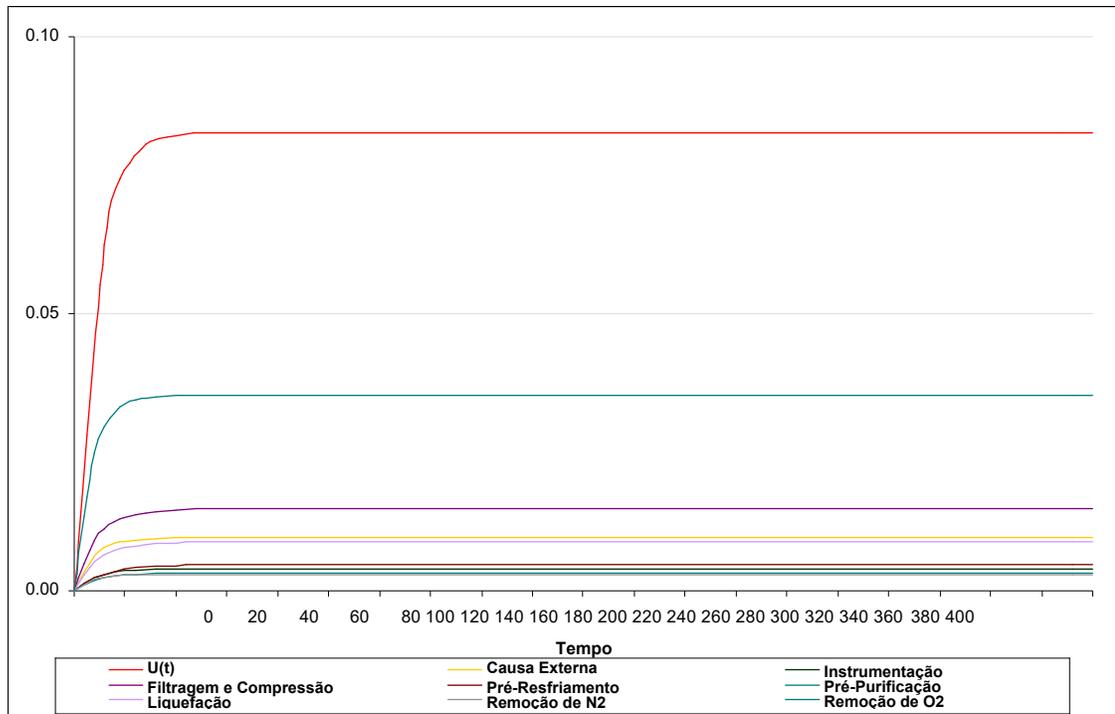


Figura 4.4 – Gráfico das probabilidades de falha de cada subsistema x sistema.

Fonte: O autor.

Na figura 4.54 pode-se ver as probabilidades de falha no tempo correspondente a cada subsistema estudado, comparadas à do sistema, com esta informação, pode-se classificar os subsistemas por criticidade, como mostra a tabela 4.8:

Tabela 4.8 – “Rankeamento” dos subsistemas.

Fonte: O autor.

Rank	Subsistema
1	Remoção de O <sub>2</sub>
2	Filtragem e Compressão
3	Rede Elétrica
4	Liquefação
5	Pré-Resfriamento
6	Instrumentação
7	Pré-Purificação
8	Remoção de N <sub>2</sub>

Com tal resultado afirma-se que a empresa precisa direcionar maiores esforços e investimentos em manutenção para os subsistemas que possuem uma probabilidade de falha maior, sendo eles em ordem crescente de probabilidade de falha: remoção de N<sub>2</sub>, pré-purificação, instrumentação, pré-resfriamento, Liquefação, rede elétrica, filtragem e compressão, remoção de O<sub>2</sub>.

Várias ações ainda podem ser feitas com o intuito de se aumentar ainda mais esta disponibilidade, tais como, diminuição do intervalo de tempo entre manutenções preventivas, aquisição de equipamentos redundantes ao sistema, revisão de procedimentos de manutenção,

---

entre outras. Mas isso requer investimento, o que nem sempre é bem visto aos olhos das empresas.

---

## 5. CONCLUSÃO

Neste estudo foi realizada uma análise da disponibilidade do sistema de produção de argônio numa planta de separação criogênica de gases do ar. Para isso foi avaliado detalhadamente todo o sistema de produção. Foram também discutidas as ferramentas que seriam utilizadas para analisar o problema em questão, havendo ainda um esforço na filtragem das informações do banco de dados da empresa.

Elevar a disponibilidade de argônio no mercado é uma ação geralmente bem aceita pelas empresas deste ramo, dependendo do custo envolvido. Algumas até optam por descartar oxigênio e nitrogênio líquidos (puros) quando há excesso de estoque destes só para produzir o argônio.

O subsistema de remoção de  $O_2$  deve ser tratado como o mais crítico, devendo haver uma política de manutenção mais forte com mais investimentos para os equipamentos que o compõe.

Melhorias no processo foram sugeridas, tais como, a possibilidade de haver redundância nos subsistemas mais críticos, um maior foco na manutenção preditiva e preventiva nos mesmos, bem como a revisão nos procedimentos e periodicidade dessas manutenções.

Apesar das dificuldades encontradas, como na filtragem dos dados, na realização dos testes e na modelagem do sistema, com a realização do trabalho, pôde-se enxergar como um conceito teórico, dotado de relativa empiricidade fornece resultados condizentes à realidade de um processo produtivo.

A análise foi feita a nível de subsistemas em virtude das informações que foram possíveis extrair dos dados apresentados. Deixa-se então como sugestão para trabalhos futuros a melhoria da base de dados coletados de forma a possibilitar uma modelagem mais realista do sistema podendo ser feita até o nível de equipamentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. *Estatística para cursos de engenharia e informática*. São Paulo: Atlas, 2004.
- BARROS, P. F. et al. *Parameterization of failure and repair rates via Learning Bayesian Belief Networks*. In: International Conference on Production Research, 3, 2006, Curitiba. Em avaliação.
- Chronicle 1879 - 1890*. Disponível em <[http://www.linde.com/international/web/linde/like35lindecom.nsf/docbyalias/page\\_ch\\_chronicle\\_18791890?open&NavParentID=F54E9180EF4D8E18C12570DE0038E139](http://www.linde.com/international/web/linde/like35lindecom.nsf/docbyalias/page_ch_chronicle_18791890?open&NavParentID=F54E9180EF4D8E18C12570DE0038E139)>. Acessado em 08 ago. 2006
- CROWDER, M. J. *Statistical analysis of reliability data*. London: Chapman & Hall. 1991.
- DROGUETT, E. L. *Análise da confiabilidade de componentes e sistemas reparáveis*. Apostila. 10. 2002a.
- DROGUETT, E. L. *Modelos de Markov em confiabilidade*. Apostila. 64 2002b.
- DROGUETT, E. L.; GROEN, F.; Mosleh, A. The combined use of data and expert estimates in populations variability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. EUA, 83. 311-321, mar. 2004
- DROGUETT, E. L.; JACINTO, C. M. C.; GARCIA, P. A. A.; MOURA, M. *Availability Assesment of Onshore Oil Fields*. In: ESREL, 2003, Portugal.
- Luftverflüssigungsanlage von Carl Linde*. Disponível em <<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/luft.htm>>. Acessado em 08 ago. 2006
- MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. *Reliability Engineering and Risk Analysis*. New York: Marcel Dekker Inc. 1999.
- RIGDON, S. E.; BASU, A. P. *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: Wiley, 2000.
- ROSS, S. M. *Introduction Probability Models*. 7. ed. New York: Wiley, 2000.

WHITE MARTINS GASES INDUSTRIAIS LTDA. *Manual para engenheiros do GOE*. Rio de Janeiro, 2000.

*White Martins - Portal*. Disponível em <<http://www.whitemartins.com.br>>. Acessado em 04 ago. 2006