

## ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS: UMA APLICAÇÃO SIMULADA

### RESUMO

*Este artigo objetiva mostrar uma aplicação simulada da técnica de análise de árvore de falhas na perda de produção de uma indústria.*

### ABSTRACT

*This article intends to present a simulated application of the fault tree analysis technique in the output loss of an industry.*

### INTRODUÇÃO

A análise das árvores de falhas é uma técnica que foi aplicada

com êxito em problemas bastante intrincados de segurança no campo aeroespacial. Esse êxito fez com que ganhasse aceitação não apenas dentro desse ramo de indústria, mas também junto ao Departamento de Defesa dos Estados Unidos, o qual tornou a análise uma exigência em seus contratos para projetos de novos mísseis e aeronaves.

A análise das árvores de falhas foi desenvolvida pelos Laboratórios Bell Telephone em 1962, a pedido da força Aérea Americana, para uso no sistema do míssil balístico intercontinental "MINUTEMAN". O pessoal de Bell, conhecedor da lógica Booleana em aplicações nos equipamentos de telecomunicação, adaptou tais

princípios para criar o novo método. Engenheiros e Matemáticos da Boeing Co. empenharam-se a fundo no desenvolvimento adicional desses procedimentos, e se tornaram os seus propositores mais destacados. A técnica foi então modificada de maneira que a simulação em computadores de alta velocidade se tornou uma realidade.

### 1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A análise de árvore de falhas é excelente para o estudo dos fatores que poderiam causar um evento indesejável (falha, risco crítico). O método pode ser desenvolvido através das

**Marcos Antonio  
Pinheiro Barbosa**

---

Eng. Eletricista, Prof.  
Adjunto da UNIFOR

Especialista em Sistemas  
de Distribuição de  
Energia Elétrica

seguintes etapas:

- a) Seleciona-se o evento indesejável, ou falha, cuja probabilidade de ocorrência deve ser determinada;
- b) São revisados todos os fatores intervenientes, como ambiente, dados de projeto, exigências do sistema, etc., determinando-se as condições, eventos particulares ou falhas que poderiam contribuir para a ocorrência do evento indesejado;
- c) É preparada uma "árvore", através da diagramação dos eventos contribuintes e falhas, de modo sistemático, que irá mostrar o inter-relacionamento entre os mesmos e em relação ao evento "topo" (em estudo). O processo se inicia com os eventos que poderiam diretamente causar tal fato, formando o "primeiro nível", à medida que se retrocede passo a passo, as combinações de eventos e falhas contribuintes irão sendo adicionadas. Os diagramas assim preparados são chamados "Árvores de Falha". O relacionamento entre os eventos é feito através de comportas lógicas, como veremos adiante;
- d) Através da Álgebra Booleana, são desenvolvidas expressões matemáticas adequadas, representando as "entradas" das árvores de falhas. Cada comporta lógica tem implícita uma operação matemática, e estas podem ser traduzidas em última análise por ações de adição ou multiplicação. A expressão é então simplificada o mais possível, através dos postulados da Álgebra Booleana;
- e) Determina-se a probabilidade de falha de cada componente, ou a probabilidade de ocorrência de cada condição ou evento, presente na equação simplificada. Esses dados podem ser obtidos de tabelas específicas, dados dos fabricantes, experiência anterior, comparação com equipamentos similares, ou ainda obtidos experimentalmente para o específico sistema em estudo;
- f) As probabilidades são aplicadas à expressão simplificada, calculando-se a probabilidade de ocorrência do evento indesejável investigado.

## 2. Corolários e proposições

Os corolários do uso das árvores de falhas podem ser:

- a) A determinação da sequência mais crítica ou

provável de eventos, dentre os "ramos" da árvore, que levam ao topo;

- b) A identificação de falhas singulares ou localizadas importantes no processo;
- c) O descobrimento de elementos sensores cujo desenvolvimento possa reduzir a probabilidade do contratempo em estudo.

Normalmente, encontram-se certas sequências de eventos centenas de vezes mais prováveis na indução do evento indesejado do que outras. Portanto, é relativamente fácil achar-se a principal combinação de eventos que precisa ser prevenida de modo a reduzir a probabilidade de ocorrência do evento em estudo (Evento-topo)

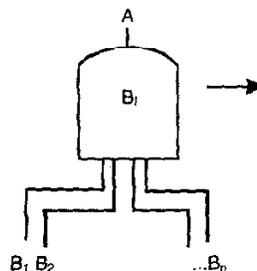
Para o uso da análise de árvores de falhas certas proposições devem ser assumidas. Elas envolvem as características de componentes, condições, ações ou eventos, assim:

- a) Os subsistemas, componentes e itens afins, podem apresentar apenas dois modos condicionais: ou operam com sucesso, ou falham totalmente. Não existe operação parcialmente bem sucedida;
- b) Cada item tem uma taxa de falha constante, que pressupõe uma distribuição exponencial;
- c) As falhas básicas são eventos independentes.

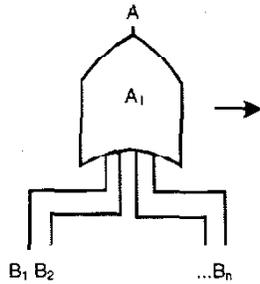
## 3) SIMBOLOGIA LÓGICA - COMPORTAS LÓGICAS

Apresentamos a seguir a simbologia utilizada na análise de árvore de falha; pode-se dizer que é universal, uma vez que há mínimas diferenças entre os diversos autores.

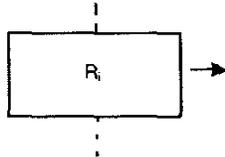
Módulo ou comporta AND (E). Relação lógica AND – A Output ou saída A existe apenas se todos os B1, B2, ... Bn existirem simultaneamente.



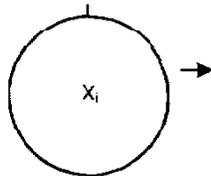
Módulo ou comporta OR (OU). Relação lógica inclusiva OR-A Output ou saída A existe, se qualquer dos B1, B2, ... Bn ou qualquer combinação dos mesmos existir.



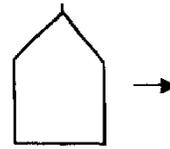
Identificação de um evento particular. Quando contido numa sequência, usualmente descreve a entrada ou saída de um módulo AND ou OR. Aplicada a um módulo, indica uma condição limitante ou restrição que deve ser satisfeita.



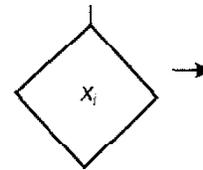
Um evento, usualmente um mau funcionamento, descrito em termos de conjunto ou componentes específicos. Falha primária de um ramo ou série.



Um evento que normalmente se espera que ocorra; usualmente um evento que ocorre sempre, a menos que se provoque uma falha.



Um evento "não desenvolvido", mas à causa de falta de informação ou de consequência suficiente. Também pode ser usado para indicar maior investigação a ser realizada, quando se puder dispor de informação adicional.



#### 4. APLICAÇÃO SIMULADA – ABORDAGEM QUALITATIVA

Apresentamos um exemplo simulado da aplicação da análise de árvores de falhas na forma qualitativa, a título de ilustração do encadeamento lógico realizado na técnica e do uso de comportas – diagrama 1. O evento indesejável selecionado é: PERDAS DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA.

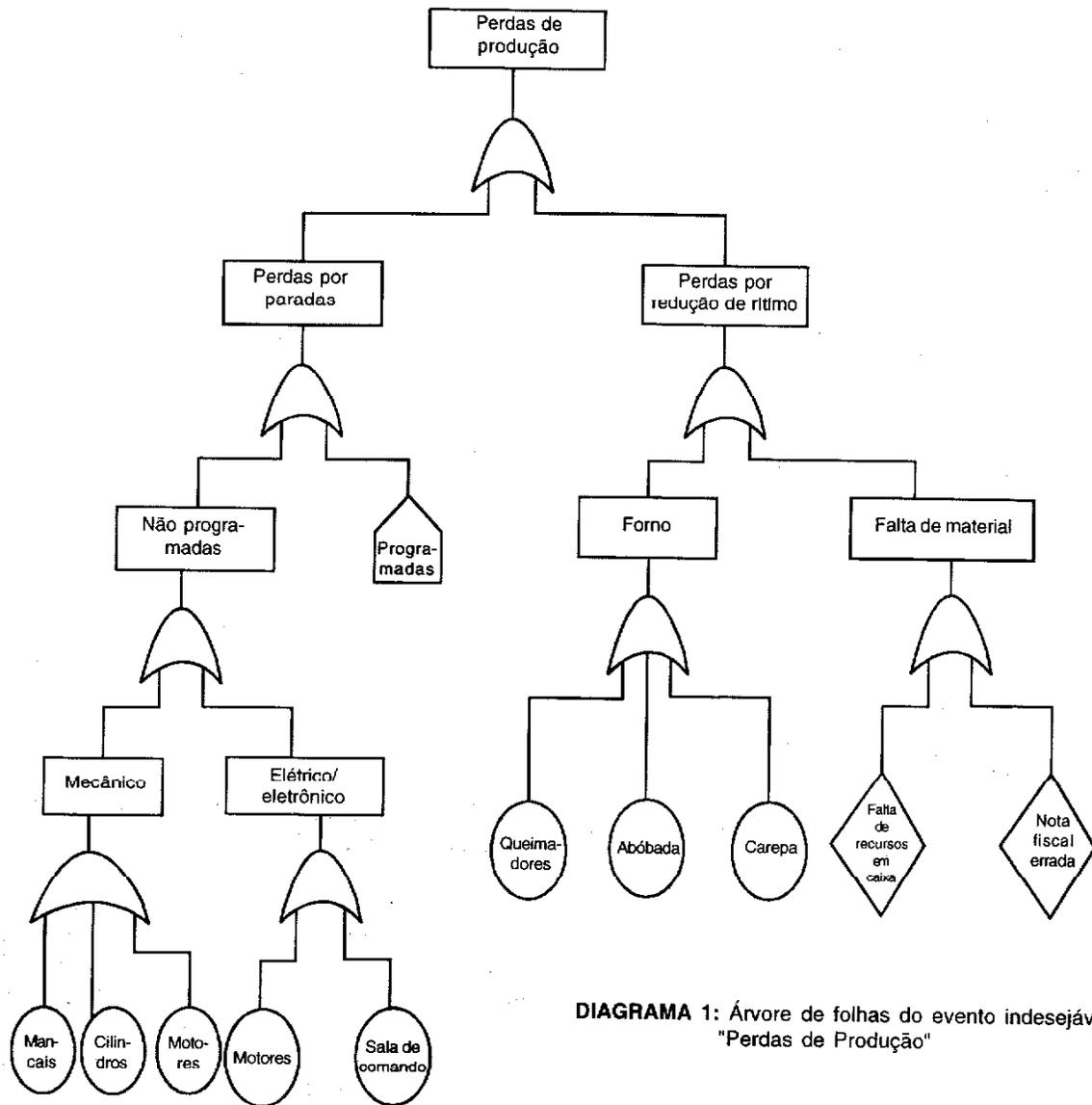


DIAGRAMA 1: Árvore de folhas do evento indesejável "Perdas de Produção"

Examinando a árvore, vemos que:

- O evento indesejável perdas de produção poderá sobreviver se houver paradas ou redução de ritmo de produção.
- As perdas de produção devido a redução de ritmo de trabalho sobrevirão se o forno falhar ou se houver falta de material.
- O forno falha se houver falha nos queimadores ou na abóbada ou na carepa.
- Haverá falta de material se houver falta de recursos em caixa ou nota fiscal errada.
- As perdas por paradas sobrevirão se houver paradas não programadas ou paradas programadas. Estas últimas são eventos que

normalmente se espera que ocorram, ou seja, são eventos que ocorrem sempre.

- As perdas por paradas não programadas ocorrem por falha mecânica ou por falha elétrica/eletrônica.
- A falha mecânica ocorre por falha nos mancais ou nos cilindros ou nos motores.
- A falha elétrica/eletrônica ocorre por falha nos motores ou na sala de comando.
- Os eventos falta de recursos em caixa e nota fiscal errada são eventos "não desenvolvidos" ou seja, são eventos que poderiam gerar outros ramos ou novas árvores completas.

## 5. ABORDAGEM QUANTITATIVA

O segundo nível de abordagem na análise de árvores de falhas é o de introdução dos cálculos para a determinação da probabilidade do evento em estudo (evento – topo). Como já foi notado na descrição do método, é preciso, após a diagramação da árvore, transformar suas aplicações lógicas em equações, e através da Álgebra Booleana, simplificar as expressões, introduzindo por fim os valores das probabilidades de ocorrência de cada evento específico, ou falha de componente.

Utilizando-se da árvore de falha do evento – topo, vejamos como poderíamos aplicar as equações, e com as possíveis simplificações, chegar até uma expressão final.

### NOTAÇÃO:

- As comportas ou serão representadas por variáveis  $A_j$ , e implicam numa ADIÇÃO das diversas entradas;
- As falhas primárias, e outros eventos “entrada” da árvore, serão representadas por variáveis  $X_j$ .

Feitas estas considerações vejamos a árvore de falhas – diagrama 2

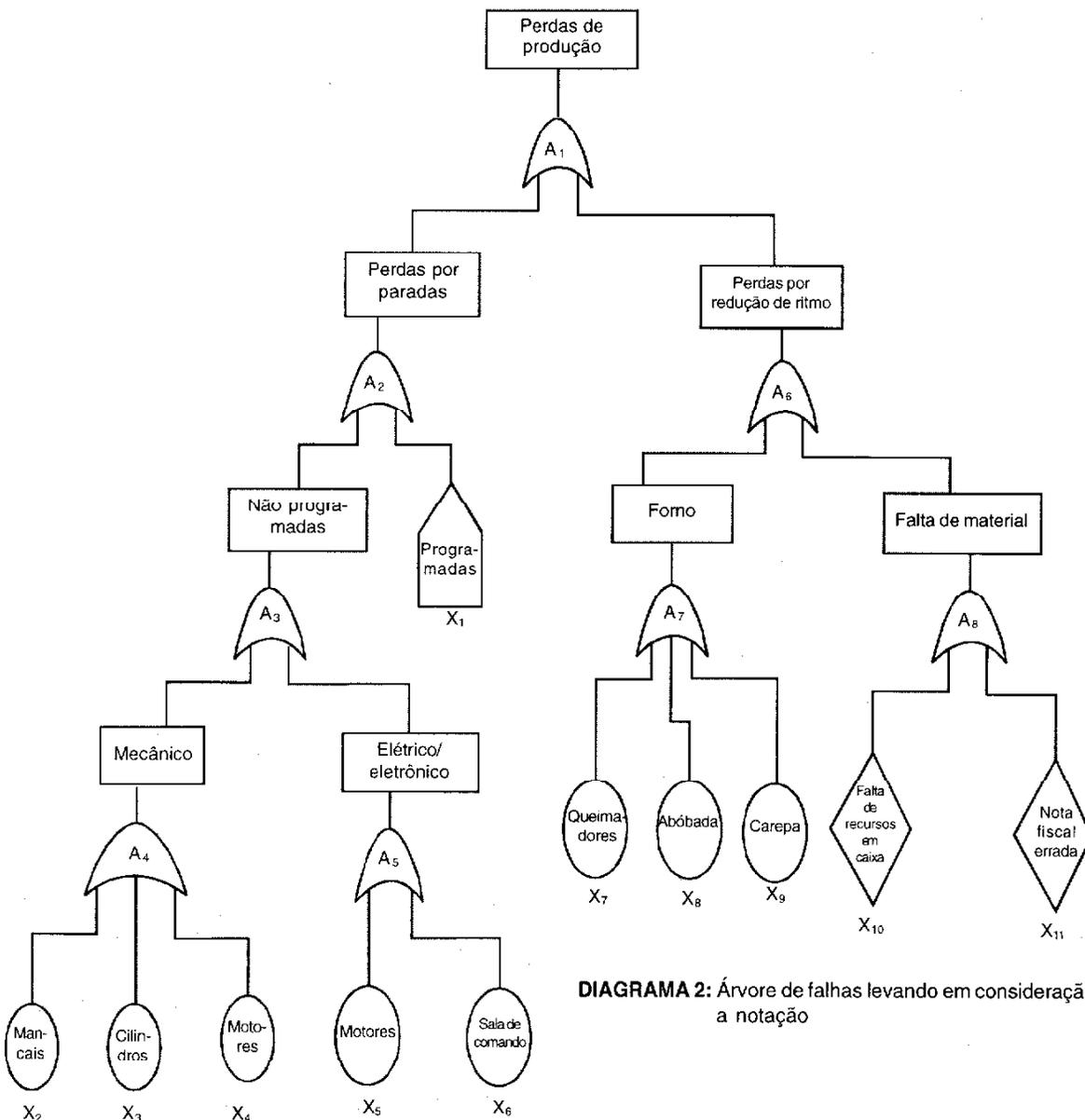


DIAGRAMA 2: Árvore de falhas levando em consideração a notação

$$\text{OBJETIVO} = A_1$$

$$A_1 = A_2 + A_6$$

$$A_2 = A_3 + X_1$$

$$A_3 = A_4 + A_5$$

$$A_4 = X_2 + X_3 + X_4$$

$$A_5 = X_5 + X_6$$

$$A_6 = A_7 + A_8$$

$$A_7 = X_7 + X_8 + X_9$$

$$A_8 = X_{10} + X_{11}$$

$$A_1 = A_3 + X_1 + A_6$$

$$A_1 = A_4 + A_5 + X_1 + A_7 + A_8$$

$$A_1 = X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_1 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11}$$

Ou seja

$$A_1 = X_1 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11}$$

Que é a expressão final. A partir da equação simplificada, pode-se traçar uma árvore de falhas simplificada como a que vemos no diagrama 3.

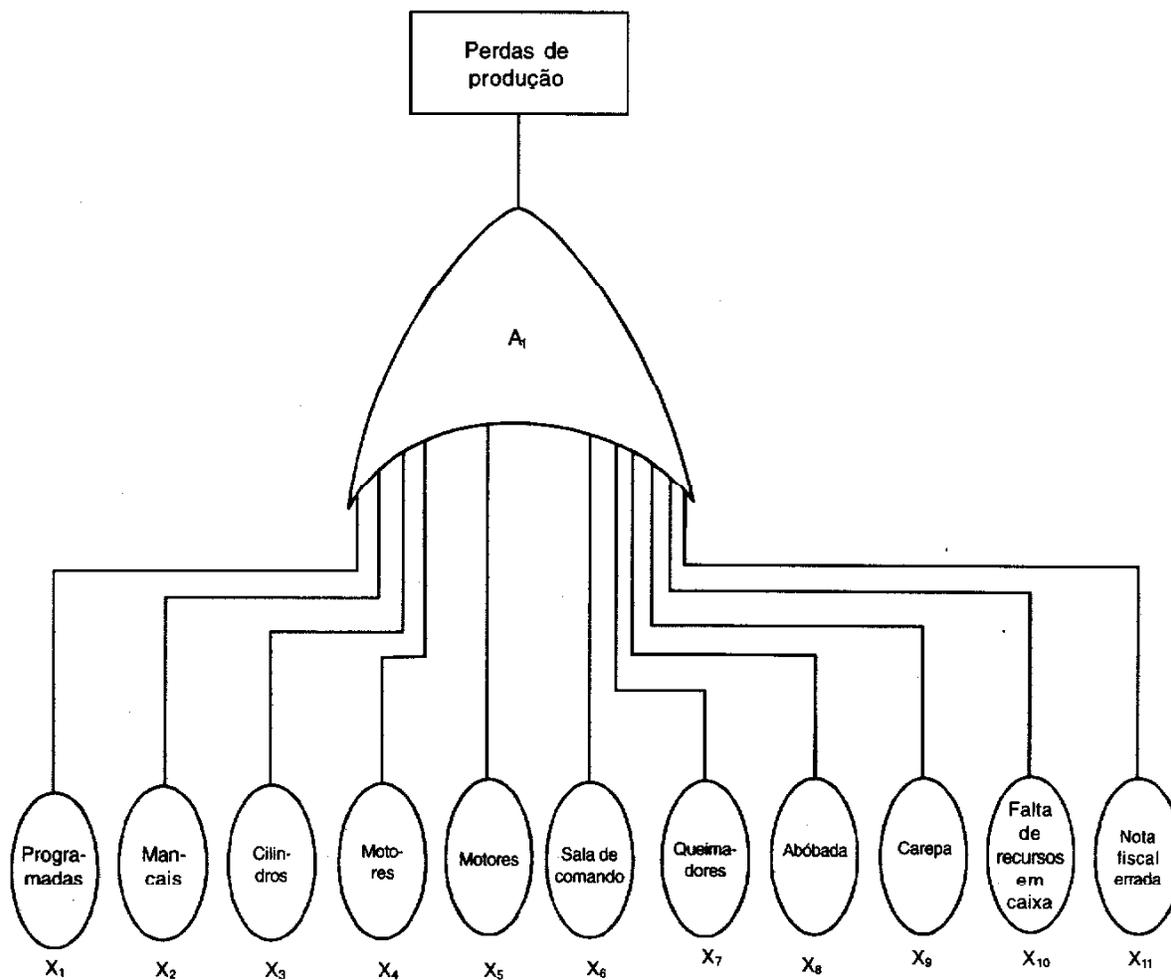


DIAGRAMA 3: Árvore de falhas simplificada

O valor numérico da probabilidade de ocorrência do evento indesejado “PERDAS DE PRODUÇÃO” é obtido da tabela a seguir,

construída a partir de valores assumidos para os Tempos Médios entre Falhas (TMEF), e todas as operações têm uma duração de 1000 horas.

Nº	COMPONENTE	TMEF	PROBABILIDADE	
			SUCESSO	FALHA
X <sub>1</sub>	PROGRAMADA	0,40 x 10 <sup>6</sup>	1,0000	0,0000
X <sub>2</sub>	MANCAIS	0,20 x 10 <sup>6</sup>	0,9975	0,0025
X <sub>3</sub>	CILINDROS	0,25 x 10 <sup>6</sup>	0,9960	0,0040
X <sub>4</sub>	MOTORES	0,30 x 10 <sup>6</sup>	0,9888	0,0112
X <sub>5</sub>	MOTORES	0,30 x 10 <sup>6</sup>	0,9888	0,0112
X <sub>6</sub>	SALA DE CONTROLE	0,35 x 10 <sup>6</sup>	0,9985	0,0015
X <sub>7</sub>	QUEIMADORES	0,15 x 10 <sup>6</sup>	0,9766	0,0234
X <sub>8</sub>	ABÓBADA	0,22 x 10 <sup>6</sup>	0,9785	0,0215
X <sub>9</sub>	CAREPA	0,33 x 10 <sup>6</sup>	0,9799	0,0201
X <sub>10</sub>	FALTA DE RECURSOS EM CAIXA	0,10 x 10 <sup>6</sup>	0,9998	0,0002
X <sub>11</sub>	NOTA FISCAL ERRADA	0,12 x 10 <sup>6</sup>	0,9955	0,0045

TMEF = tempo médio entre falhas (valores assumidos não reais; duração para todas as operações = 1000 horas)

$$A_1 = 0,0025 + 0,0040 + 0,0112 + 0,0112 + 0,0015 + 0,0234 + 0,0215 + 0,0201 + 0,0002 + 0,0045 \Rightarrow A_1 = 0,1001$$

Um aspecto importante ao usarmos a análise de árvores de falhas na abordagem quantitativa, é o cuidado na descrição dos eventos, de maneira a termos certeza de que podemos “vesti-los” com uma probabilidade adequada. A frase lógica deverá ter sujeito, verbo e complemento bem caracterizado; assim, ao dizermos. “O forno falha nos queimadores”, o complemento “nos queimadores” define um modo específico de falha. Por outro lado, se dissermos “o forno falha”, estaremos incluindo todos os modos de falha que levam aquela condição; são obviamente condições com valores probabilísticos diferentes.

## 6. CONCLUSÃO:

A análise de árvores de falhas encontra sua melhor aplicação quando há um complexo inter-relacionamento de recursos humanos, equipamentos, materiais e ambiente, pela maneira sistemática na qual os vários fatores podem ser apresentados. Trata-se, com efeito, de um modelo no qual dados probabilísticos podem ser aplicados a sequências lógicas.

A árvore de falhas leva ao analista um grande número de informações e conhecimento muito mais completo do sistema ou situação em estudo, propiciando-lhe uma visão bastante clara da questão e possibilidades imediatas de atuação, no sentido da correção de condições indesejadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BIRD Jr. Frank E. e LOFTUS, Robert. **Loss Control Management**. Loganville: Institute Press, 1976.
- BIRD Jr. Frank E. e GERMAIN, George L. **Damage Control**. Coatesville: AMA, 1976.
- BLAKE, Roland P. **Industrial Safety**. New York: Prentice – Hall, 1980
- GILMONE, Charles L. **Accident Prevention and Loss Control**. New York American Management Association, 1979.
- DE CICCIO, Francisco, M. G. A. F. e FANTAZZINI, Mário Luiz. **Prevenção e Controle de Perdas**. São paulo: Fundacentro, 1993.