

Engenharia de Manutenção (EF 302000)

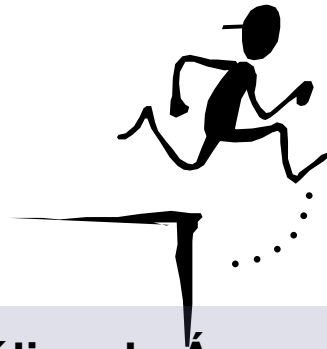
Prof. Dr. Marcelo Sucena, PhD

marcelosucena@gmail.com

<http://www.marcelosucena.com.br>

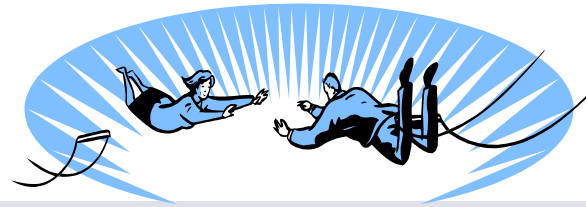


ÁRVORE DE FALHAS



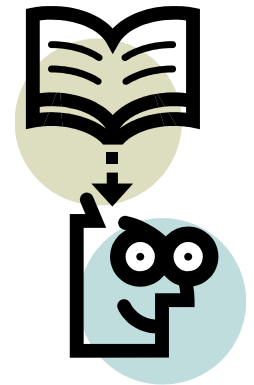
O Método de Análise da Árvore de Falhas (*Failure Tree Analysis - FTA*) foi desenvolvido por volta de 1960, por W.A.Watson, da Bell Laboratories e aperfeiçoada pela Boeing Corporation.

Consiste em um **processo lógico** e **dedutivo** que, partindo de um evento indesejado e predefinido (EVENTO TOPO), busca-se as possíveis causas de tal evento (pensamento reverso).



Visa **melhorar a confiabilidade** de produtos e de processos por intermédio da análise sistemática de possíveis falhas e suas consequências, orientando na adoção de medidas corretivas ou preventivas.

A elaboração da Árvore de Falhas trás uma série de **OUTROS** benefícios, tais como o aumento do domínio das características técnicas dos equipamentos que compõem o sistema, a identificação da sequência das falhas críticas e a melhor interação entre os integrantes das equipes de projeto, operação e manutenção. **Ou seja, CONHECIMENTO!**





É aplicável tanto para a análise de um **projeto** quanto para sistemas que já estão em **operação**.

Pode ser utilizada para avaliação **qualitativa** (determinação das falhas básicas) e **quantitativa** (cálculo da probabilidade de ocorrência do evento).

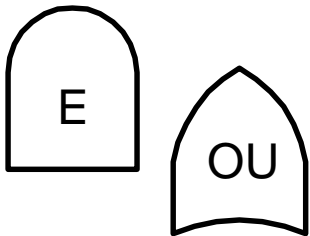


Pode ser desenvolvida em **diferentes níveis de complexidade**.

É de **interpretação simples** por pessoas distantes do assunto sob análise.



É uma ferramenta de **fácil aprendizado** pois utiliza **símbolos** para caracterizar os diversos eventos e auxilia na determinação da causa de falhas e verifica a ligação entre as causas.


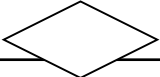

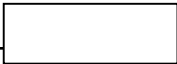


Os eventos interagem para produzir outros eventos, que são relacionados através de operadores lógicos simples (AND, OR etc.).






É uma técnica *top-down*, pois deve-se partir de eventos gerais para eventos mais específicos.




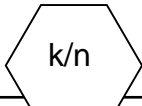
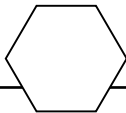
Símbolos

<p>Evento básico</p> 	<p>Um evento básico corresponde tipicamente a um evento de falha de um componente ou a um erro humano, para o qual, de um modo geral, o analista dispõe de dados básicos de falhas (taxa de falhas, tempo médio de reparo etc). Representa o final do processo de análise dedutiva, formando, assim, a base da FT.</p>
<p>Evento não-desenvolvido</p> 	<p>É utilizado quando o evento é de consequência insuficiente ou informação relevante não está disponível. Um evento não desenvolvido é um evento para o qual o analista não tem interesse em continuar o processo dedutivo, seja porque as causas do evento decorrem de falhas de componentes situados fora da fronteira definida para a análise, ou porque aquele evento já foi analisado em uma FT à parte.</p>
<p>Evento externo</p> 	<p>Significa um evento que é normalmente esperado que ocorra como por exemplo uma mudança de fase num sistema dinâmico; portanto, o símbolo mostra eventos que não são falhas.</p>
<p>Evento intermediário</p> 	<p>Ocorrem porque uma ou mais causas antecedentes agem através das portas lógicas.</p>

Símbolos

<p>Transferência para dentro</p> 	<p>Indica que a árvore será desenvolvida posteriormente no correspondente símbolo de transferência para fora. Transfere para...</p>
<p>Transferência para fora</p> 	<p>Indica que esta parte da árvore deverá ser anexada ao correspondente símbolo de transferência para dentro. Recebe de...</p>
<p>Porta Lógica OU</p> 	<p>Evento de saída que ocorre somente <u>se um ou mais dos eventos de entrada ocorrem</u>.</p>
<p>Porta Lógica OU exclusivo</p> 	<p>É uma derivação da porta OU, especial, onde o evento de saída ocorre somente <u>se exatamente um dos eventos de entrada ocorre</u>.</p>
<p>Porta Lógica E</p> 	<p>O evento de saída ocorre somente <u>se todos os eventos de entrada ocorrem</u>.</p>

Símbolos

<p>Porta Lógica E Prioridade</p> 	<p>O evento de saída ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrem, numa sequência ordenada especificada que normalmente é geralmente mostrada dentro de uma elipse desenhada do lado direito da porta.</p>
<p>Porta Lógica K de n</p> 	<p>É uma porta lógica cuja saída ocorre se de n entradas pelo menos k ocorrem; o caso 1 de n se torna um OU e n de n se torna um E.</p>
<p>Porta Lógica Inibidora (Condicional)</p> 	<p>A saída ocorre quando uma entrada única atende a alguma condição (entrada condicional) que é geralmente colocada numa elipse do lado direito da porta inibidora.</p>

➤ Tanto a FMEA quanto a Árvore de Falhas são métodos para previsão de falhas em processos e produtos;

➤ Tanto a FMEA quanto a Árvore de Falhas podem ser utilizados para analisar problemas existentes;

➤ A Árvore de Falhas pode subsidiar a FMEA;



➤ Cada falha básica da Árvore de Falhas pode ser um item da FMEA, facilitando a avaliação dos efeitos e da causa da falha.

Melhor para ...	Árvore de Falhas	FMEA
Analisar falhas Múltiplas	X	
Analisar Falhas Isoladas		X
Evitar a Análise de Falhas não Críticas	X	
Identificar os Eventos de Alto Nível Causado por Eventos de Nível mais Baixo	X	
Ter uma Abrangência Maior ao Analisar a Falha		X
Ter Menos Restrições e ser mais Fácil de Seguir	X	
Identificar Influências Externas	X	
Identificar Características Críticas		X
Prover um Formato para Validação dos Planos		X
Análise Quantitativa	X	

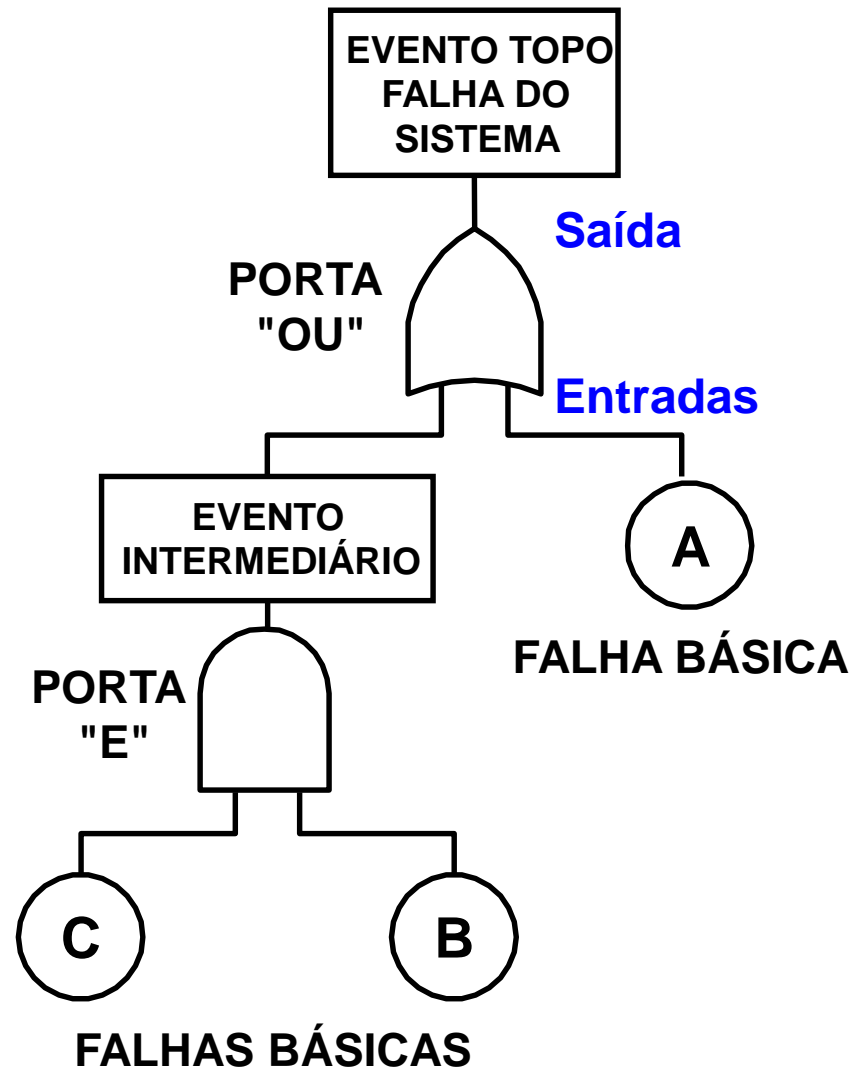
Fonte: Lafraia (2001)

Melhor para ...	Árvore de Falhas	FMEA
Não há Necessidade de se Garantir que a Falha de Cada Componente seja Analisada		X
Informação é limitada às Características do Sistema e as suas Funções Básicas	X	
Informações de Projeto Detalhadas em Desenhos e Especificações		X
Avaliar as Alternativas de Projeto	X	
Avaliar Redundâncias	X	
Avaliar a Integridade do Projeto, incluindo: detecção de falhas e <i>failure-safe</i>		X
Análises Dedutivas de Cima para Baixo	X	
Análise Indutivas de Baixo para Cima		X

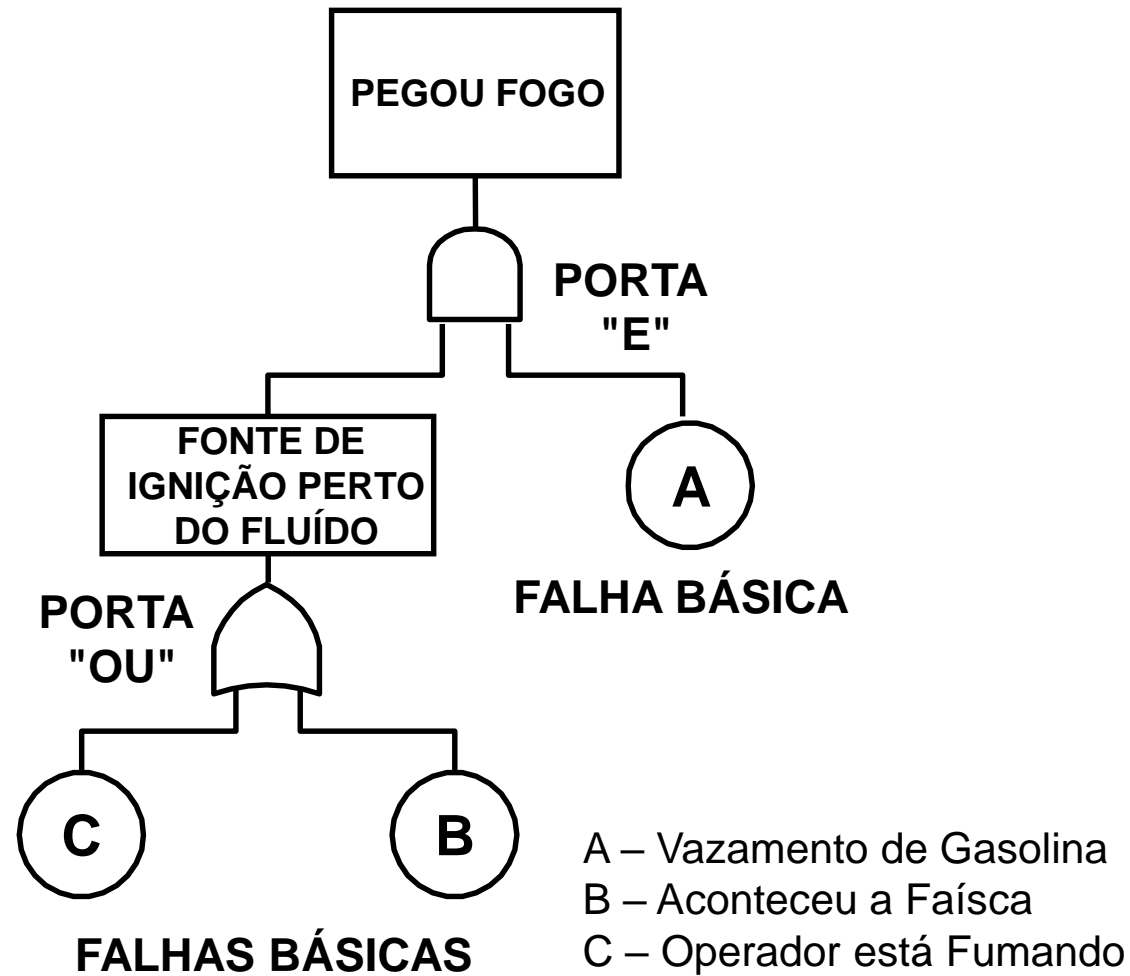
Fonte: Lafraia (2001)



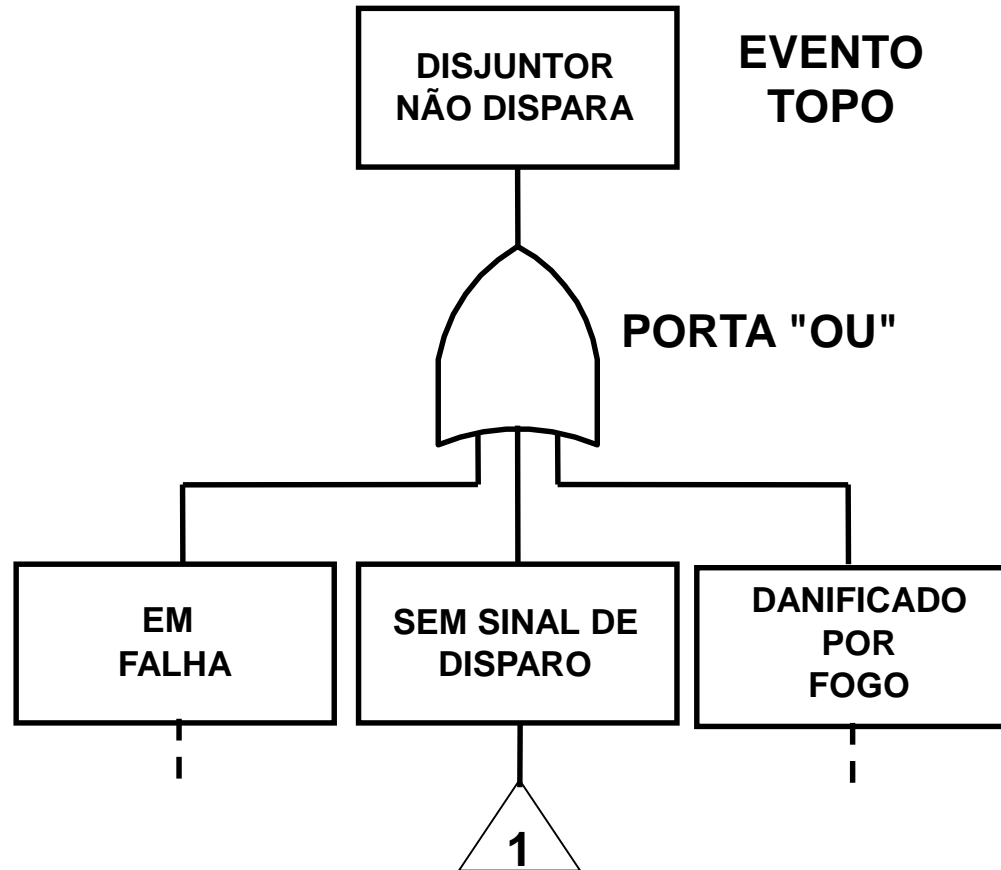
EXEMPLO



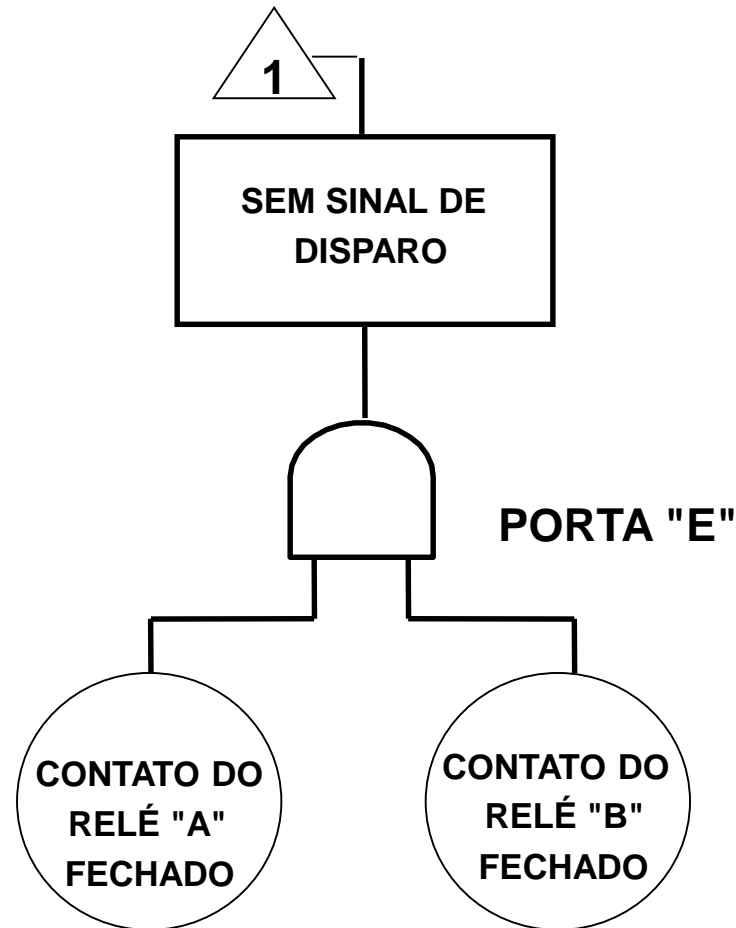
EXEMPLO



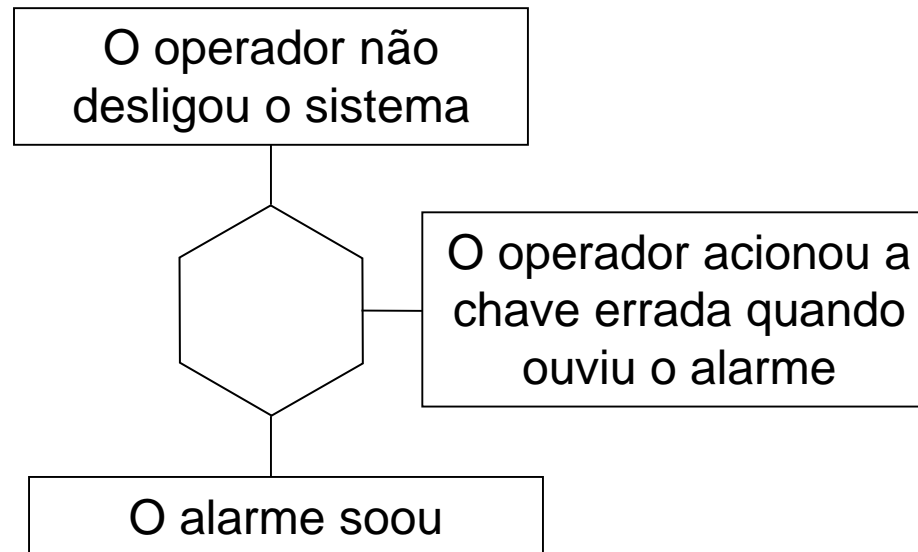
EXEMPLO



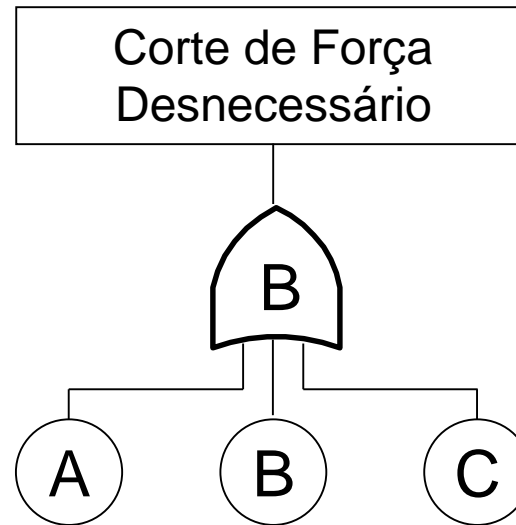
EXEMPLO



EXEMPLO



EXEMPLO



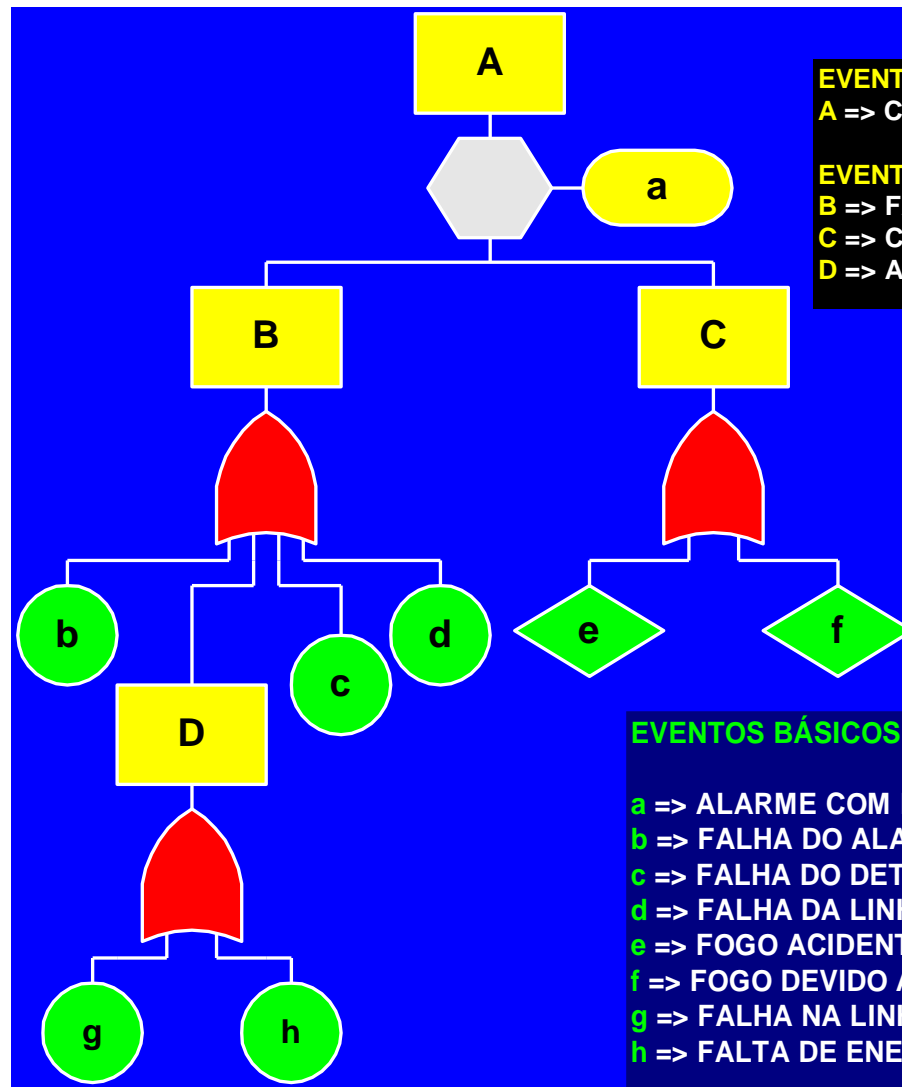
A – Monitor 1 gera o sinal errado.

B – Idem Monitor 2.

C – Idem Monitor 3.

O evento de saída ocorre se o evento B ocorrer.

EXEMPLO



EVENTO SUPERIOR:
A => CASA INCENDIANDO (ALARME NÃO OPEROU)

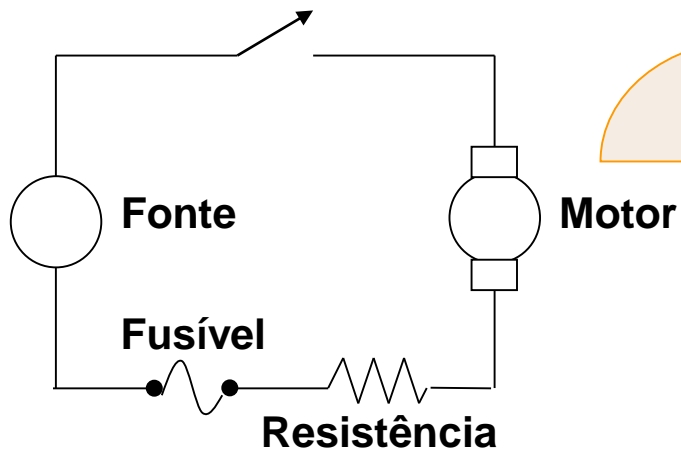
EVENTOS INTERMEDIÁRIOS:
B => FALHA DO ALARME
C => CASA INCENDIANDO
D => ALARME DESENERGIZADO

EVENTOS BÁSICOS:

a => ALARME COM FALHA ANTES DO INCÊNDIO
b => FALHA DO ALARME
c => FALHA DO DETETOR
d => FALHA DA LINHA DE SENSORES
e => FOGO ACIDENTAL DEVIDO A FALHA DE EQUIPAMENTOS
f => FOGO DEVIDO A ERRO HUMANO
g => FALHA NA LINHA DE ENERGIA
h => FALTA DE ENERGIA DA CONCESSIONÁRIA

Fonte: Seixas (2001)

EXEMPLO



Falha topo: Motor falha ao dar a partida

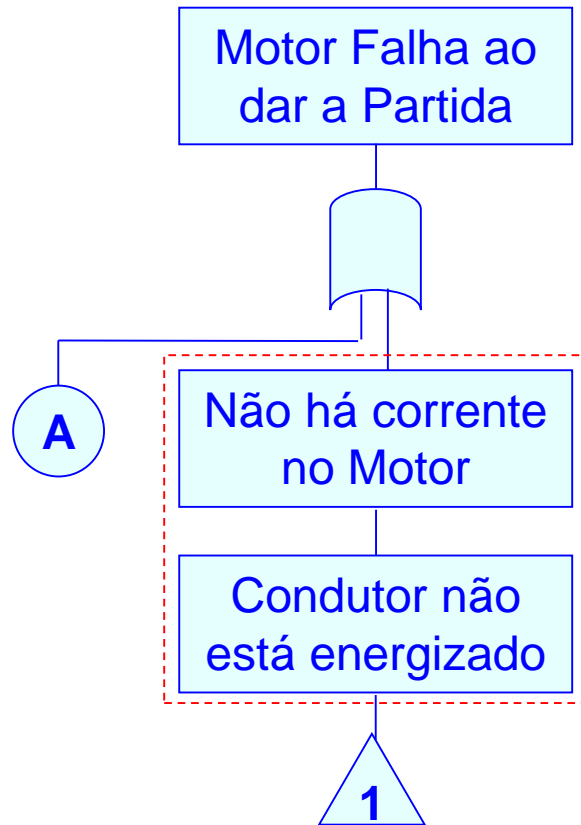
A construção de uma Árvore de Falhas é um misto de arte e de ciência.

Professor Apostalikis *apud* Scapin (1999)

Considerando que diferentes especialistas podem elaborar árvore de falhas diferentes, para um mesmo sistema, pode-se observar a solução a seguir.

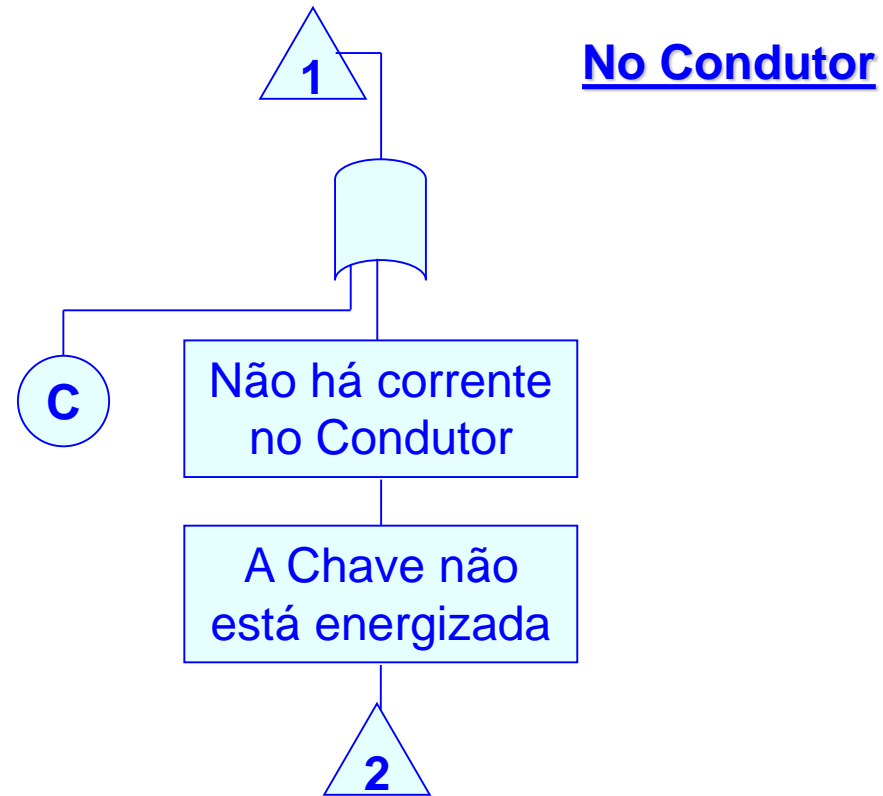
EXEMPLO
Primeira Versão

No Motor



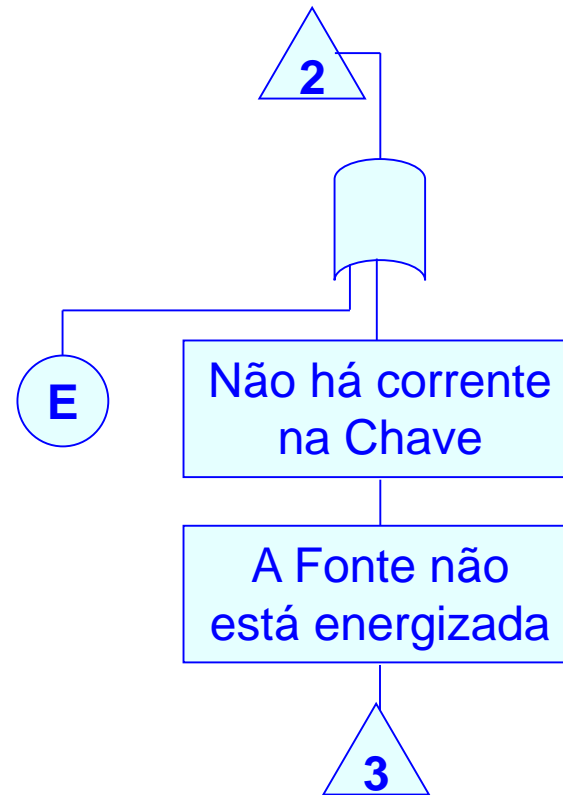
O desdobramento serve para explicar melhor o evento da falha. Não interferem no cálculo da confiabilidade.

A – Falha básica no motor

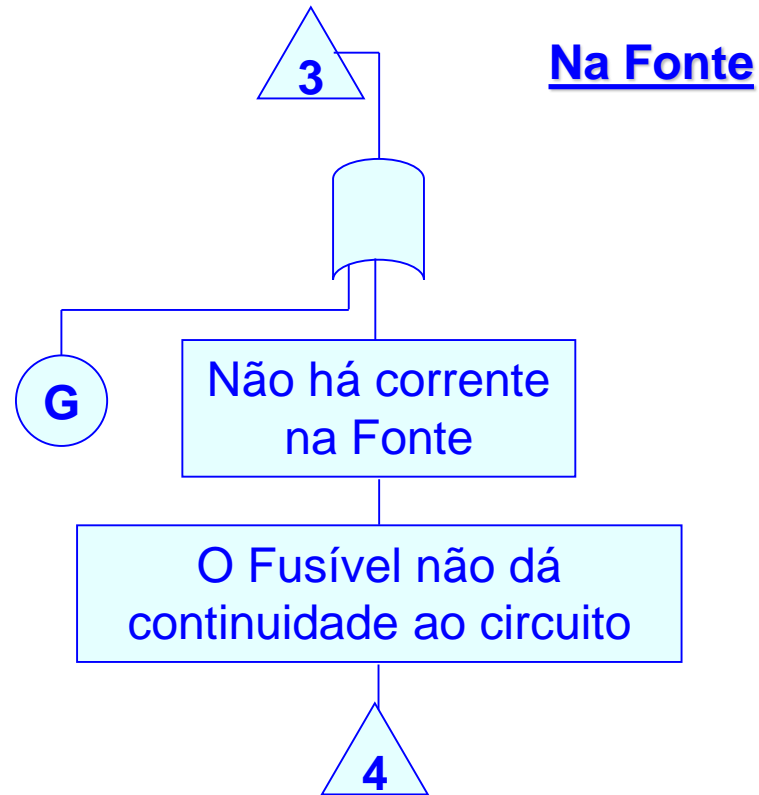


C – Falha básica no Condutor

Na Chave

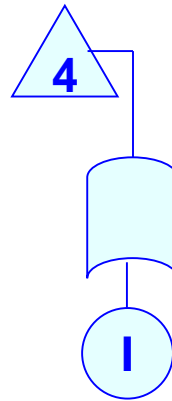


E – Falha básica na Chave



G – Falha básica na Fonte

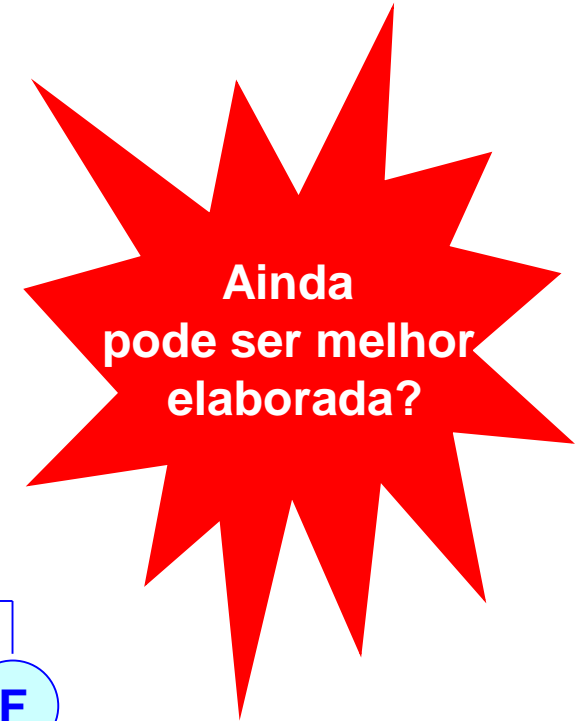
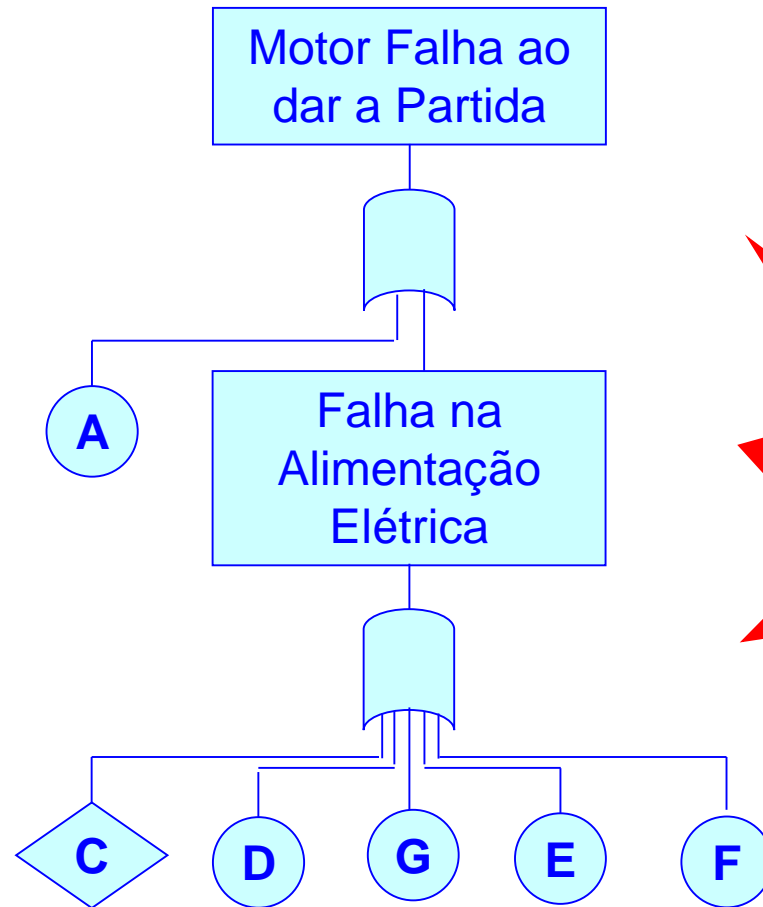
No Fusível



I – Falha básica no Fusível

EXEMPLO

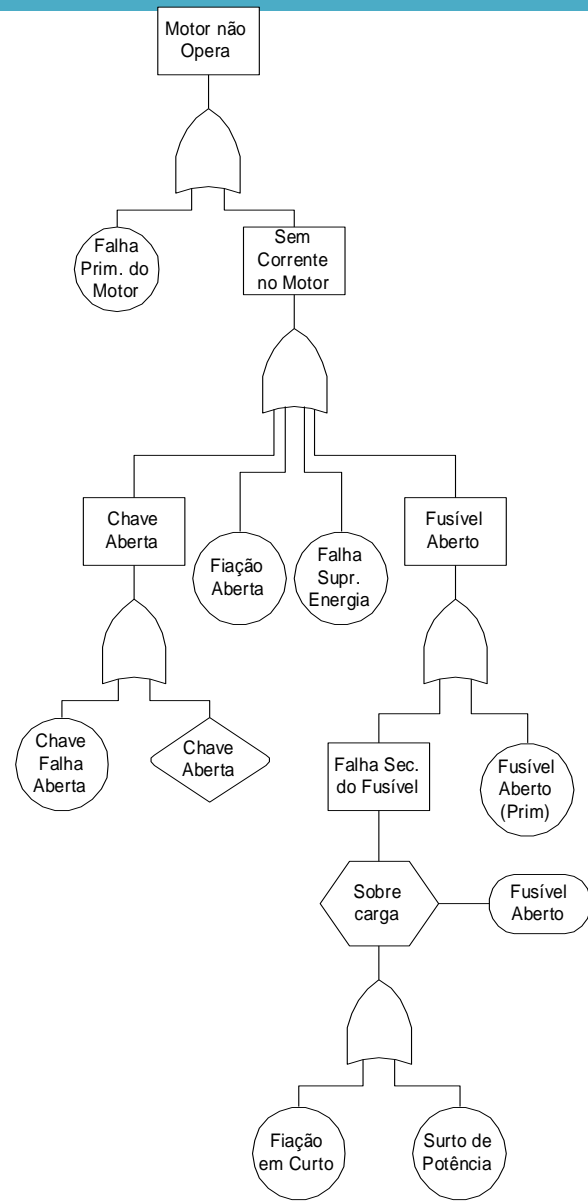
Segunda Versão



- A** – Falha básica no motor
C – Fonte não fornece energia **D** – Fusível queimado
E – Resistência aberta **F** – Fiação interrompida **G** - Chave aberta

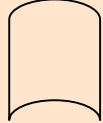
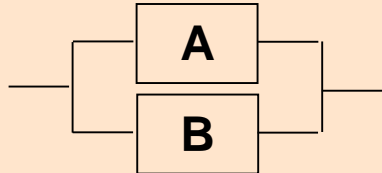

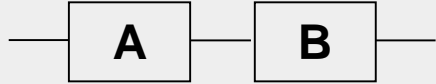

EXEMPLO

Terceira Versão



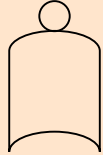
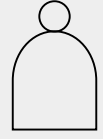
Fonte: Seixas (2001)

Regras da Álgebra de Boole

Tipo de Porta	Forma Algébrica para as saídas A e B	Processamento		Resultado
		A	B	
OR 	$A + B$ 	0	0	0 (F)
		0	1	1 (V)
		1	0	1 (V)
		1	1	1 (V)
AND 	$A \cdot B$ 	0	0	0 (F)
		0	1	0 (F)
		1	0	0 (F)
		1	1	1 (V)
NOT 	A'	0		1 (V)
		1		0 (F)

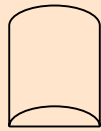
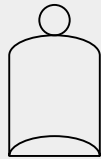
0 – Falha 1 – Não Falha

Regras da Álgebra de Boole

Tipo de Porta	Forma Algébrica para as saídas A e B	Processamento		Resultado
		A	B	
NOR 	$(A + B)'$	0	0	1 (V)
		0	1	0 (F)
		1	0	0 (F)
		1	1	0 (F)
NAND 	$(A \cdot B)'$	0	0	1 (V)
		0	1	1 (V)
		1	0	1 (V)
		1	1	0 (F)

0 – Falha 1 – Não Falha

Regras da Álgebra de Boole

Tipo de Porta	Forma Algébrica para as saídas A e B	Processamento		Resultado
		A	B	
XOR 	$(A + B) \cdot (A \cdot B)'$ $= A \oplus B$ OU Exclusivo	0	0	0 (F)
		0	1	1 (V)
		1	0	1 (V)
		1	1	0 (F)
XNOR 	$((A + B) \cdot (A \cdot B))''$	0	0	1 (V)
		0	1	0 (F)
		1	0	0 (F)
		1	1	1 (V)

0 – Falha 1 – Não Falha

Propriedades da Álgebra de Boole

1 - Lei Comutativa:

$$X.Y = Y.X$$

$$X+Y = Y+X$$

2 - Lei Associativa:

$$X(Y.Z) = (X.Y)Z$$

$$X+(Y+Z) = (X+Y)+Z$$

3 - Lei Idempotente:

$$X.X = X$$

$$X+X = X$$

4 - Lei de Absorção:

$$X(X+Y) = X$$

$$X+X.Y = X$$

Propriedades da Álgebra de Boole

5 - Lei Distributiva:

$$X(Y+Z) = X.Y+X.Z$$

$$(X+Y) \cdot (X+Z) = X+Y \cdot Z$$

6 - Complementar:

$$X \cdot \bar{X} = 0$$

$$X + \bar{X} = 1$$

7 - Teorema de "De Morgan":

$$\overline{X \cdot Y} = \bar{X} + \bar{Y}$$

$$\overline{X + Y} = \bar{X} \cdot \bar{Y}$$

8 - De uso frequente:

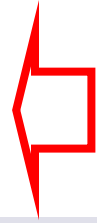
$$X + \bar{X} \cdot Y = X + Y$$

$$\bar{X}(X + \bar{Y}) = \bar{X} \cdot \bar{Y}$$

Procedimento para a Análise por Árvore de Falhas



Fonte:
Adaptado de Seixas (2001)



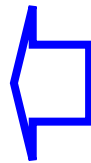
Definir o Sistema

- ✓ **Caracterizar o sistema e definir as suas funções;**
- ✓ **Avaliar a operação do sistema (controles, interfaces etc.);**
- ✓ **Identificar os procedimentos operacionais do sistema;**
- ✓ **Identificar os procedimentos de teste e de manutenção do sistema;**
- ✓ **Analisar as especificações técnicas (limites operacionais, necessidade de monitoração etc.) dos componentes do sistema.**



Definir o Evento Topo

- ✓ **Geralmente está relacionado com alguma situação crítica;**
- ✓ **Deve-se preocupar com a sua seleção:**
 - **Não pode ser muito geral, pois a análise pode se tornar dispersa (pouco valor prático) e**
 - **Não pode ser muito específico, pois a análise pode não fornecer uma visão suficientemente ampla do problema.**



Construir a Árvore

✓ **Determinar o Evento Topo;**



✓ **Determinar os Fatores Contribuintes;**



✓ **Elaboração da Diagramação Lógica;**



✓ **Determinação das Falhas Básicas;**



✓ **Simplificação Booleana;**

✓ **Aplicação dos Dados Quantitativos;**

✓ **Determinação da Probabilidade de Ocorrência.**



Validar a Árvore de Falhas

O objetivo da validação da árvore de falhas é avaliar a precisão e a veracidade das suas informações.

Geralmente é efetuada por um analista que não tenha participado da sua elaboração.

A determinação dos cortes mínimos viabiliza a análise qualitativa da árvore de falhas

Denomina-se “corte” de uma árvore de falhas a um conjunto de falhas básicas cuja a ocorrência implica na ocorrência do evento topo.

Denomina-se “corte mínimo” quando o corte não puder ser reduzido sem perder a sua condição de corte. Os cortes mínimos são os pontos fracos do sistema sob análise.

Algoritmo para Determinar os Conjuntos de Corte Mínimo

Algoritmo de Vesely-Fussel

Foi desenvolvido por Jerry Fussel e Willian Vesely e pode ser utilizado para eventos não repetidos.

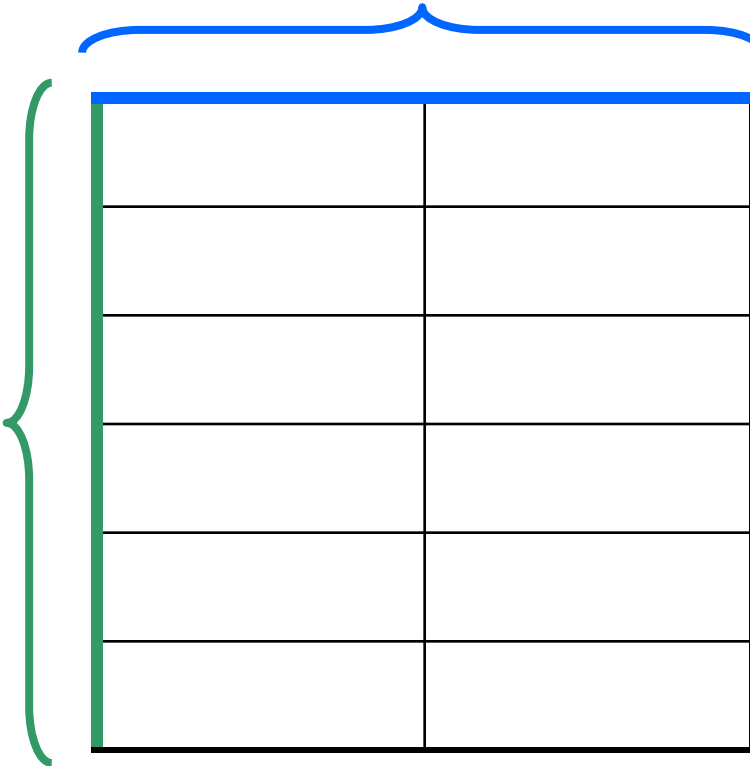
- ✓ Parte-se da primeira porta antes do evento topo;
- ✓ Para Portas tipo “E” aumenta-se o “**tamanho**” de um corte mínimo e para Portas tipo “OU” aumenta-se a “**quantidade**” de um corte mínimo;
- ✓ Deve-se substituir cada porta pelas suas entradas até que todas as portas tenham sido substituídas.

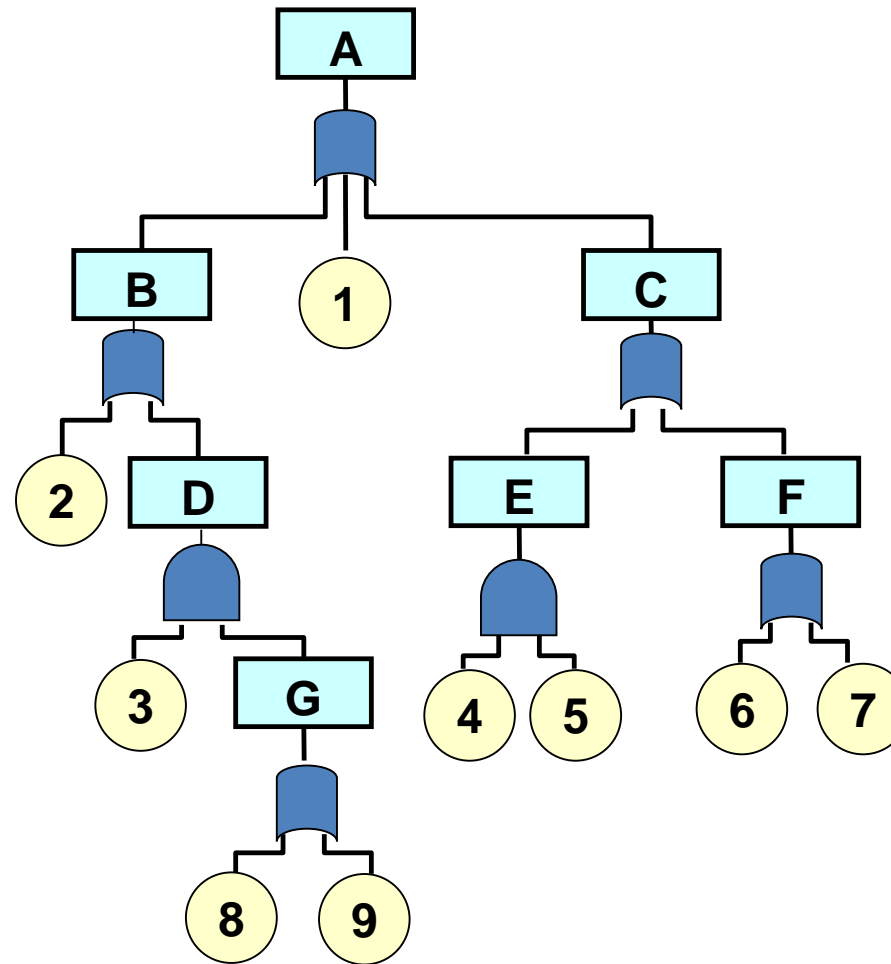
Colunas

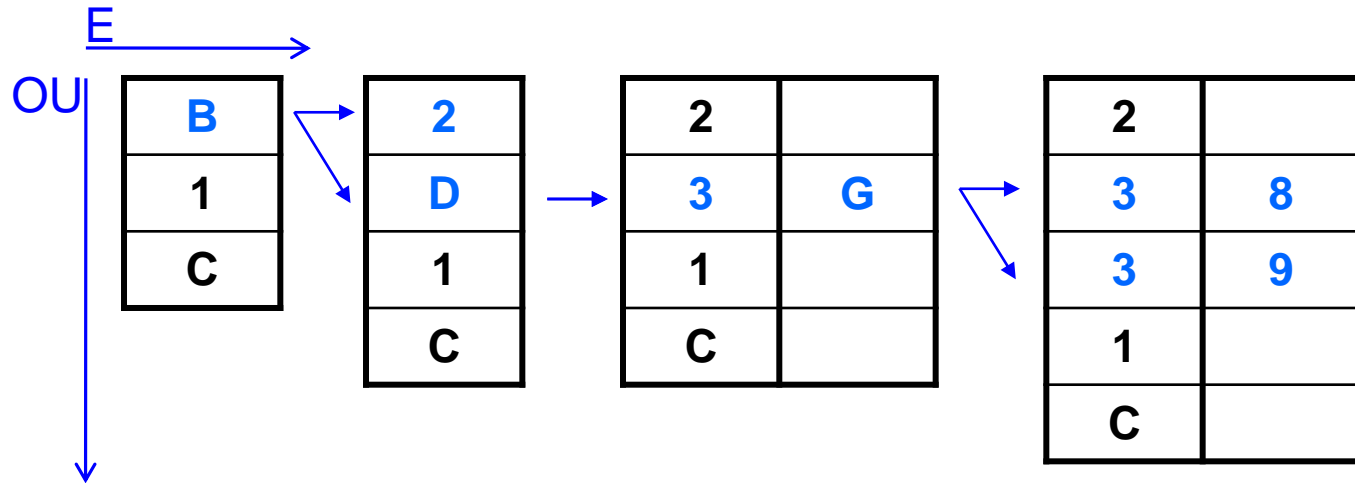
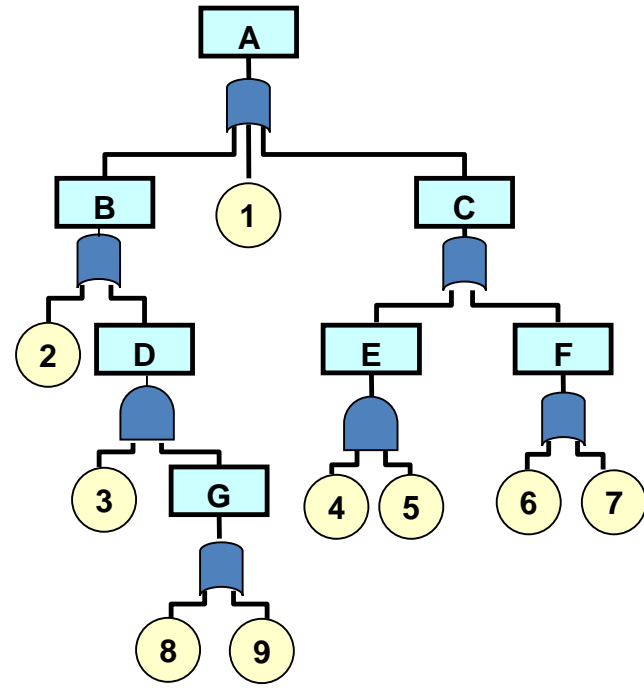
Ordem do corte: aumenta com a porta "E".

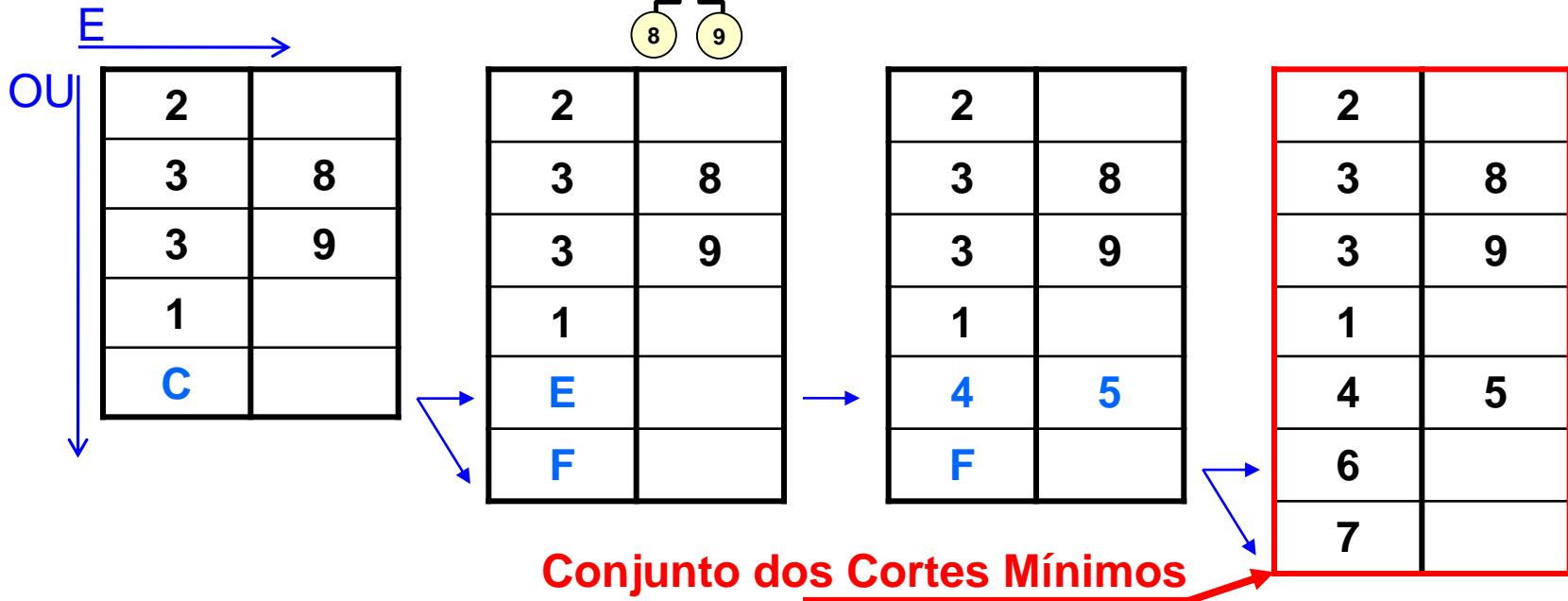
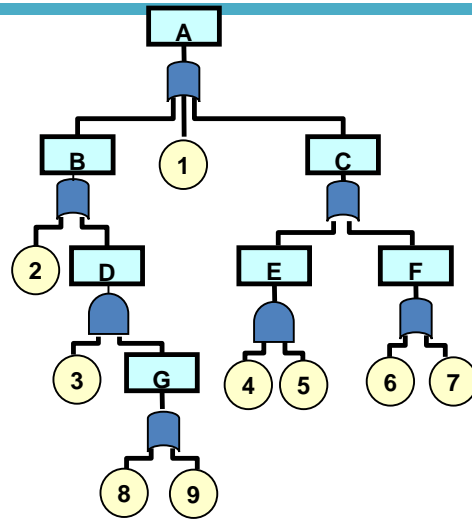
Linhas

Quantidade de Cortes: aumenta com a porta "OU".





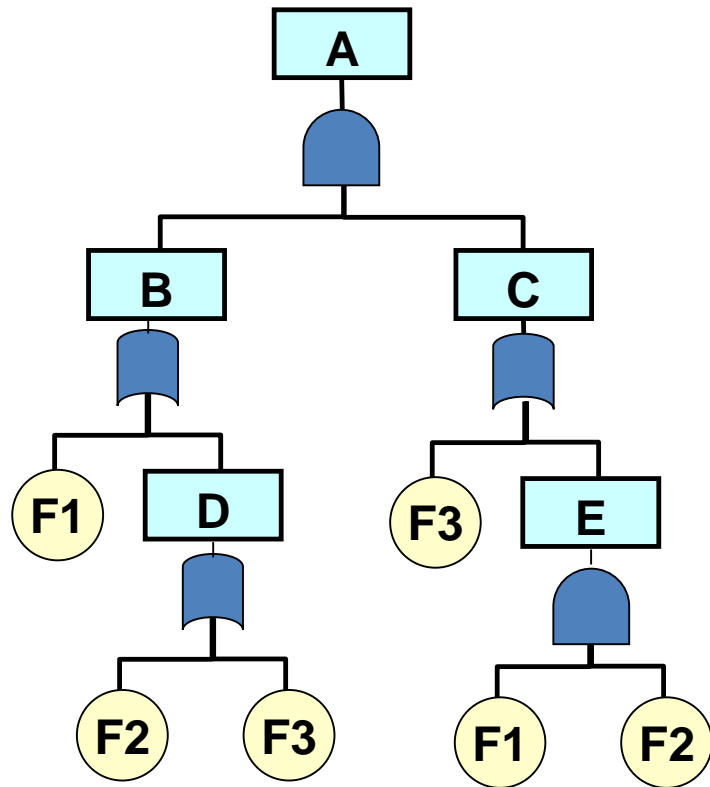




4 cortes mínimos de 1ª ordem e 3 de 2ª ordem.

A análise quantitativa pode ser efetuada independentemente da análise qualitativa.

Considerar-se-á na análise quantitativa, as taxas de falha e de reparo como constantes (Falhas Aleatórias).



Análise Top-Down

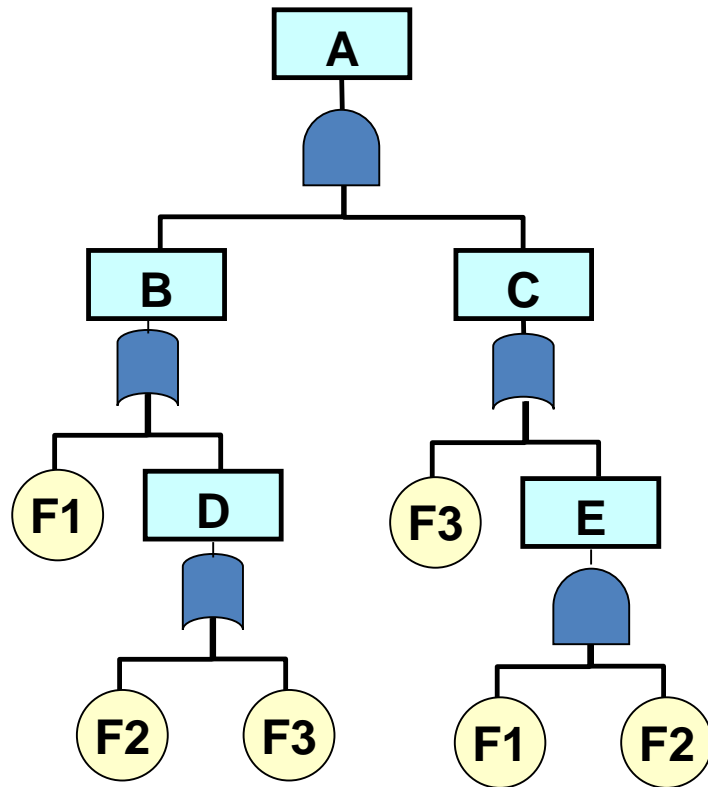
$$A = B.C$$

$$B = F1 + D$$

$$D = F2 + F3;$$

$$C = F3 + E$$

$$E = F1.F2$$



$$A = (F1 + D) \cdot (F3 + E)$$

$$A = F1 \cdot F3 + F1 \cdot E + D \cdot F3 + D \cdot E$$

Lei Distributiva

$$A = F1 \cdot F3 + F1 \cdot (F1 \cdot F2) + (F2 + F3) \cdot F3 + (F2 + F3) \cdot (F1 \cdot F2)$$

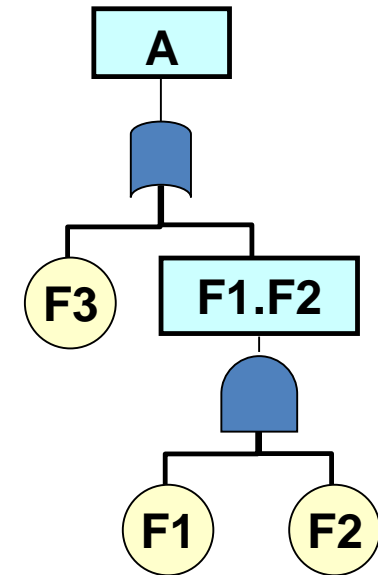
$$A = F1 \cdot F3 + F1 \cdot F1 \cdot F2 + F2 \cdot F3 + F3 \cdot F3 + F2 \cdot F2 \cdot F1 + F3 \cdot F1 \cdot F2$$

Lei Idempotente

$$A = F1.F3 + F1.F1.F2 + F2.F3 + F3.F3 + F2.F2.F1 + F3.F1.F2$$

$$A = F1.F3 + F1.F2 + F2.F3 + F3 + F2.F1 + F3.F1.F2$$

De acordo com a Lei de Absorção ($X+X.Y = X$):
 $F1.F3 + F2.F3 + F3 + F3.F1.F2 = F3$. Sendo assim: $A = F3 + F1.F2$



Para Porta Lógica E

$$P(O) = \prod_{i=1}^n P(E_i)$$

Para Porta Lógica OU

$$P(O) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(E_i))$$

Obrigado!

*LABFER - Laboratório para Ensino e Pesquisa de Engenharia
Ferroviária no Estado do Rio de Janeiro*

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha. CEP: 22.290-270 Rio de
Janeiro – RJ. Telefone: (21) 3820-4199. www.ime.eb.br

