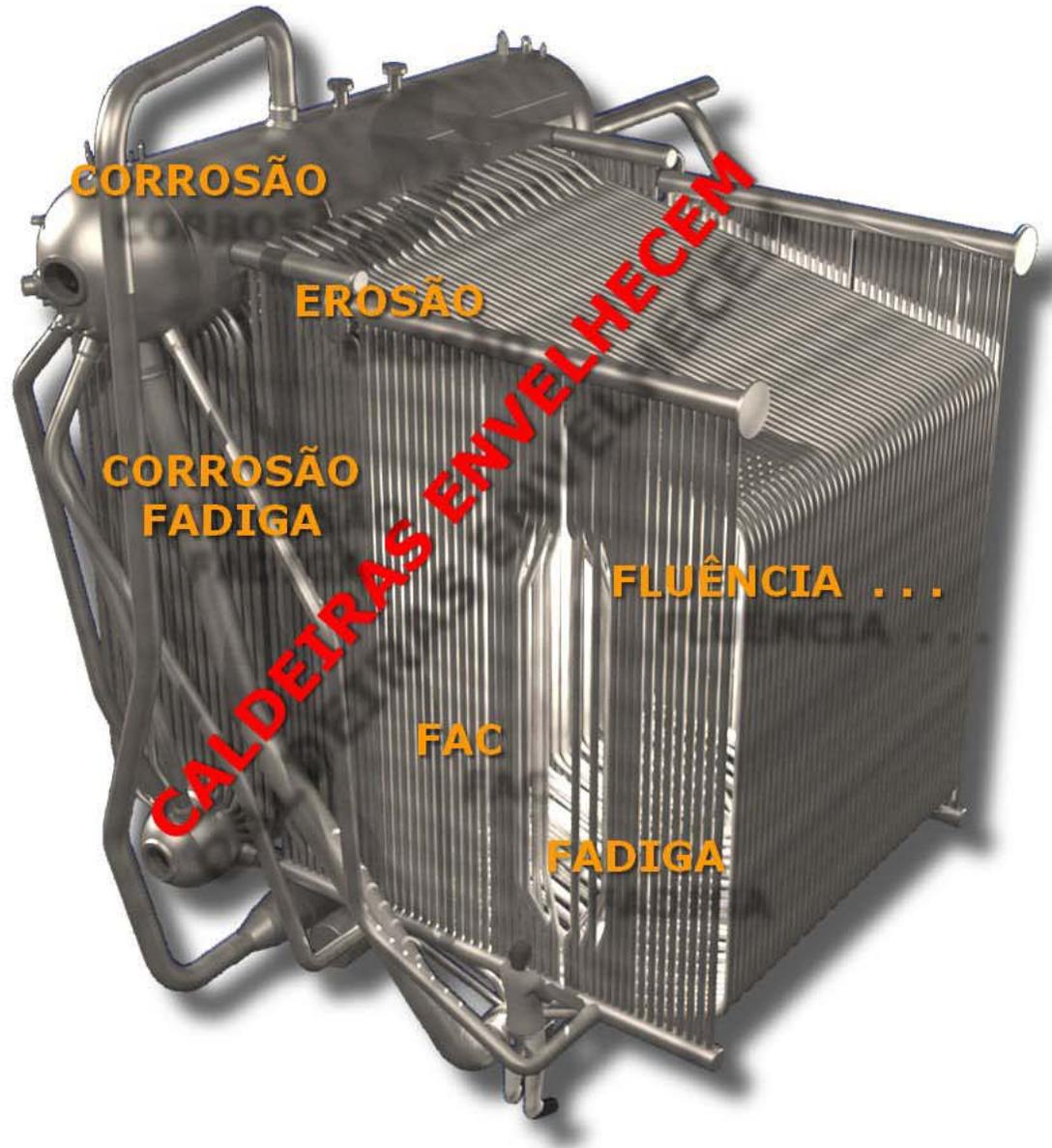




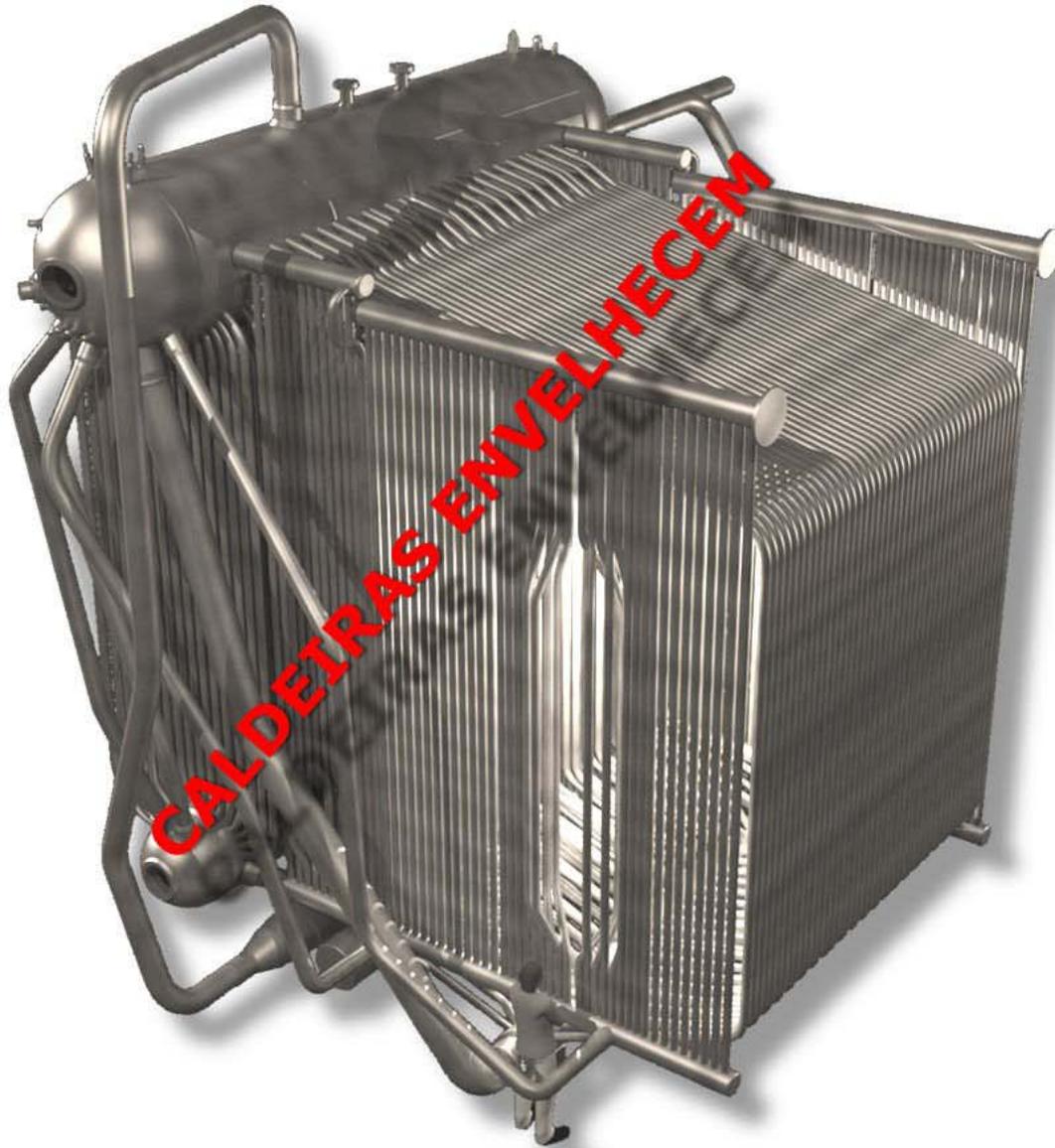
FÓRUM INTEGRIDADE DE EQUIPAMENTOS QUE TRABALHAM EM ALTA TEMPERATURA

AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE CALDEIRAS DE GRANDE PORTE

TITO FERNANDO DA SILVEIRA
contato@tsec.com.br



Danos acumulados
são uma consequência  inevitável da
da operação da caldeira.



CARACTERÍSTICAS DO PROCEDIMENTO

- (i) Uso intensivo do julgamento de engenharia a cargo do profissional que o utiliza.
- (ii) O procedimento explicita as razões que sustentam a elaboração de Planos de Inspeção que, de outra forma, permaneceriam obscuras e dificilmente acessíveis à análise crítica independente.
- (iii) A aplicação do procedimento sistematiza o tratamento das informações relevantes para a inspeção e para a **avaliação de integridade estrutural**.



FUNDAMENTOS DA GESTÃO DE INTEGRIDADE

A Norma Regulamentadora NR-13 (2014) refere-se à gestão de integridade estrutural e à avaliação de integridade nos seguintes termos:

13.1.1 Esta Norma Regulamentadora estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão e suas tubulações de interligação nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores.

13.4.4.7 No máximo, ao completar 25 (vinte e cinco) anos de uso, na sua inspeção subsequente, as caldeiras devem ser submetidas a uma avaliação de integridade com maior abrangência para determinar a sua vida remanescente e novos prazos máximos para inspeção, caso ainda estejam em condições de uso.

Integridade estrutural - conjunto de propriedades e características físicas necessárias para que um equipamento ou item desempenhe com segurança e eficiência as funções para as quais foi projetado.

Avaliação ou inspeção de integridade - conjunto de estratégias e técnicas utilizadas na avaliação detalhada da condição física de um equipamento.

DEFINIÇÕES VAGAS

A NR-13 atribui ao Profissional Habilitado a definição das atividades requeridas para a avaliação de integridade, seja em método, seja em alcance.

No presente não se observa consenso na comunidade industrial sobre o tratamento requerido pela avaliação de integridade de caldeiras de grande porte.



FUNDAMENTOS DA GESTÃO DE INTEGRIDADE

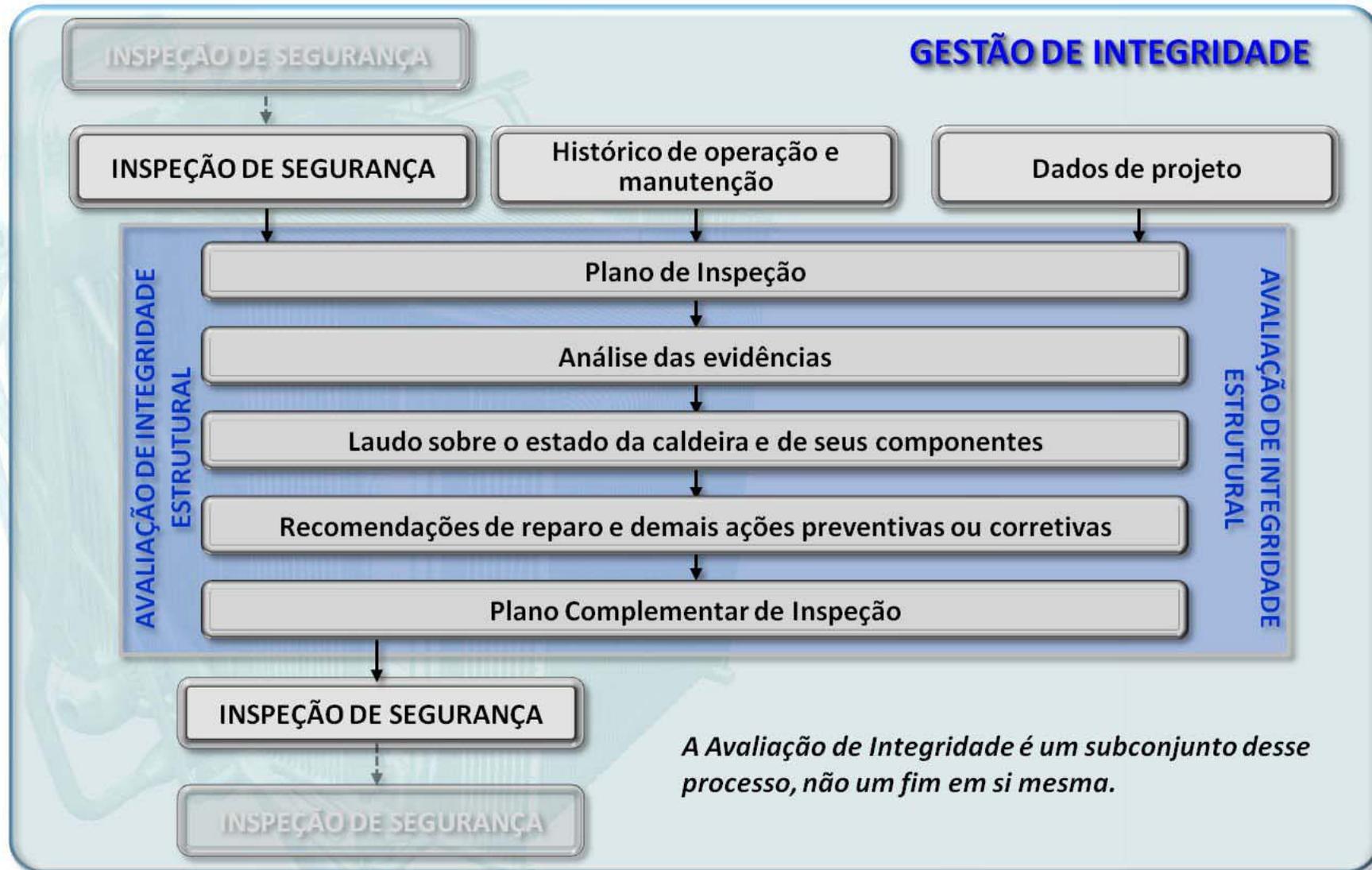
Ampliando-se as definições da NR-13, entende-se por **Avaliação de Integridade** a análise de engenharia empreendida em certo momento da vida de um equipamento, tubulação ou sistema destinado a cumprir pelo menos um dos seguintes objetivos:

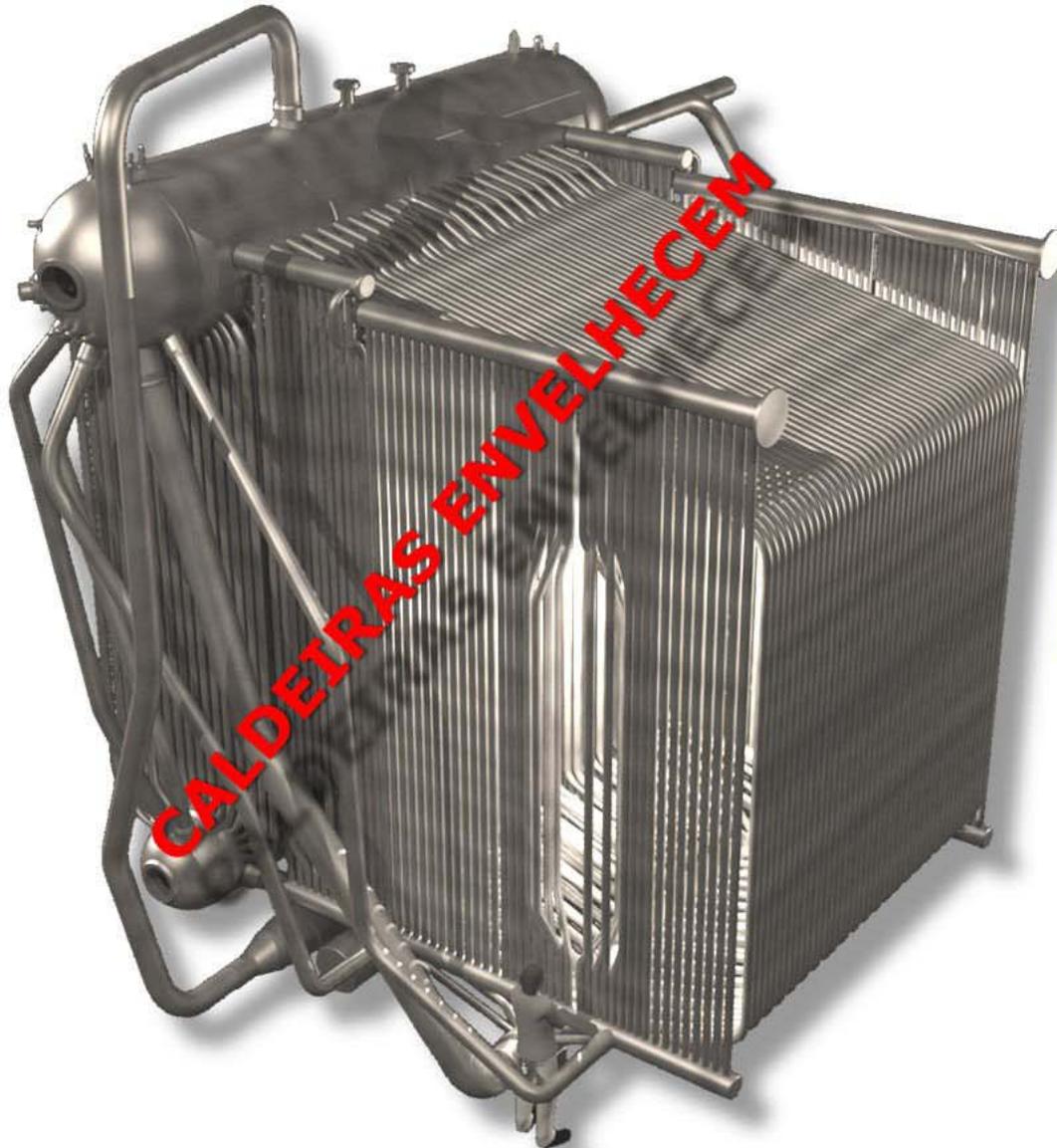
- (i) verificar se permanece atendida a adequação ao uso;
- (ii) estimar a vida remanescente ou garantir uma fração da vida remanescente durante a qual o risco permaneça aceitável; e
- (iii) definir eventuais intervenções corretivas ou preventivas de manutenção capazes de aperfeiçoar a adequação ao uso.

Dentro de um contexto mais amplo, uma Avaliação de Integridade pode ser entendida como parte de um processo composto por sucessivas inspeções, avaliações de integridade e intervenções de manutenção preventiva ou corretiva com o objetivo de acompanhar, monitorar, conservar e, se possível, aperfeiçoar a adequação ao uso de um equipamento, tubulação ou sistema.

Esse processo contínuo, no qual cada ação alimenta as ações subsequentes, chama-se **Gestão de Integridade**.







GESTÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Requisitos:

- 1 – eficácia das atividades de inspeção;
- 2 – conclusividade da avaliação de integridade;
- 3 – planejamento de meios e recursos para as atividades de manutenção com suficiente antecedência;
- 4 – uso racional dos recursos disponíveis, concentrando-os nos itens mais críticos.

Identificação dos mecanismos de dano

Aplicação da Inspeção Baseada em Risco 



DEFINIÇÃO DE RISCO: [1 de 3]

De modo geral, define-se o risco associado a uma eventual falha decorrente da atuação de certo mecanismo de dano como o produto $[CoF \times PoF]$, onde CoF é a consequência da falha e PoF é a probabilidade de sua ocorrência.

O risco indexado a um componente é a soma dos riscos das diversas falhas a que se encontra potencialmente exposto.

Generalizando, o risco de um sistema constituído por diversos componentes é a soma de seus riscos individuais.

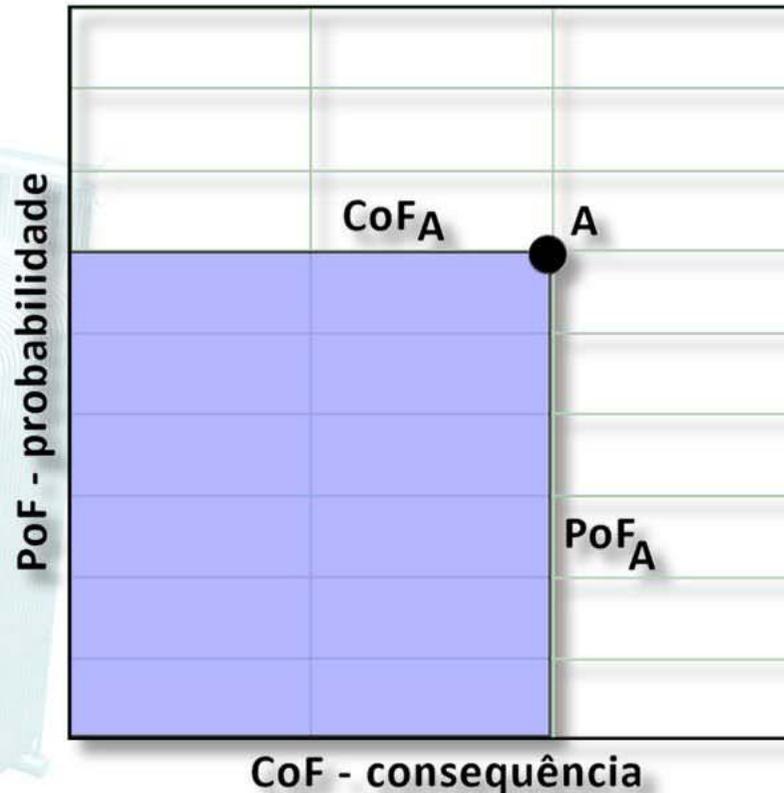


Diagrama geral de risco $CoF \times PoF$. O risco A associado à falha A corresponde à área delimitada nesse diagrama pela probabilidade de falha PoF_A e pela consequência CoF_A atribuídas a essa falha.





DEFINIÇÃO DE RISCO: [2 de 3]

A operação de qualquer sistema envolve certo risco. Esse risco deve ser mantido em nível aceitável.

Se nenhuma medida for aplicada, o risco de um sistema sempre aumenta ao longo da vida de operação, na medida em que seus componentes acumulam danos decorrentes de causas naturais ou promovidos por desvios operacionais e/ou por acidentes.

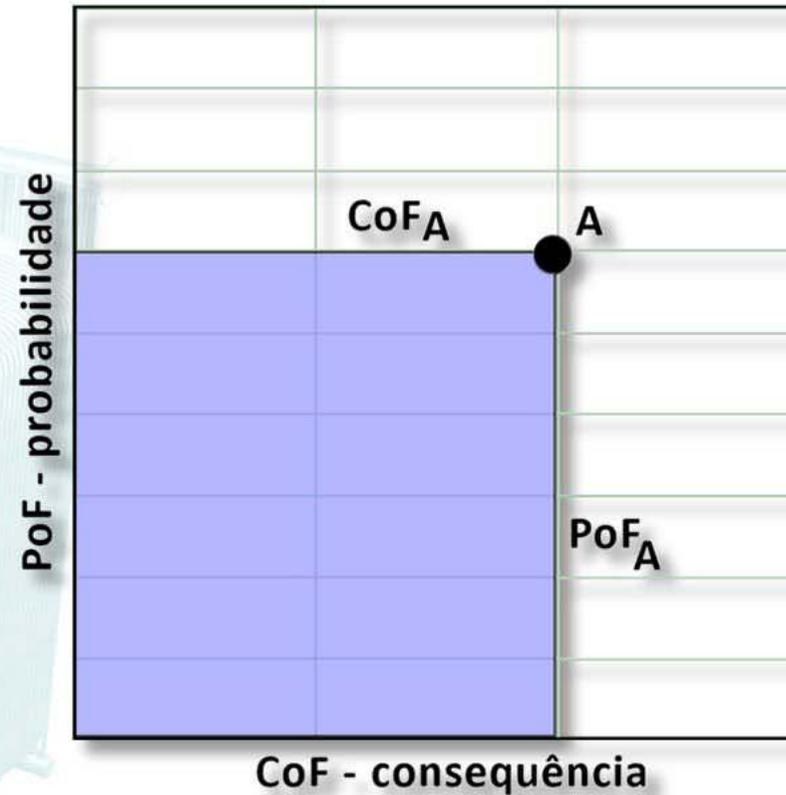


Diagrama geral de risco CoF x PoF. O risco A associado à falha A corresponde à área delimitada nesse diagrama pela probabilidade de falha PoF_A e pela consequência CoF_A atribuídas a essa falha.





DEFINIÇÃO DE RISCO: [3 de 3]

A moderação do risco de determinada falha demanda reduzir pelo menos uma de suas parcelas, seja a CoF ou a PoF.

Em instalações em serviço, existe pouca liberdade para a mitigação da CoF e a moderação do risco centra-se no tratamento da PoF.

A PoF pode ser reduzida mediante inspeção para identificar com a devida antecedência acumulação de dano capaz de propiciar determinada falha e mediante intervenção de manutenção de modo a eliminar ou controlar os efeitos do dano.

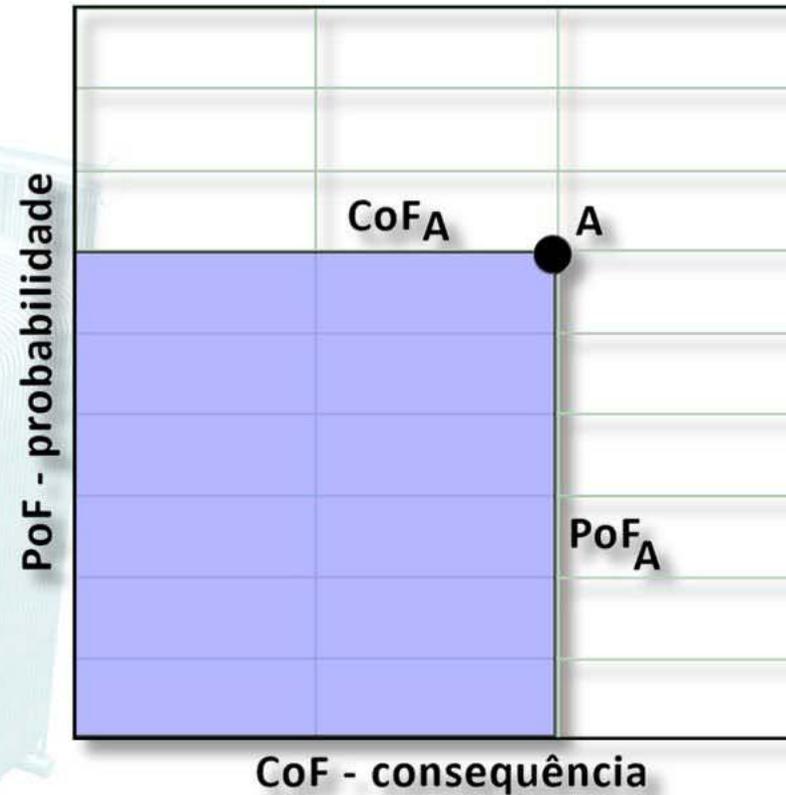
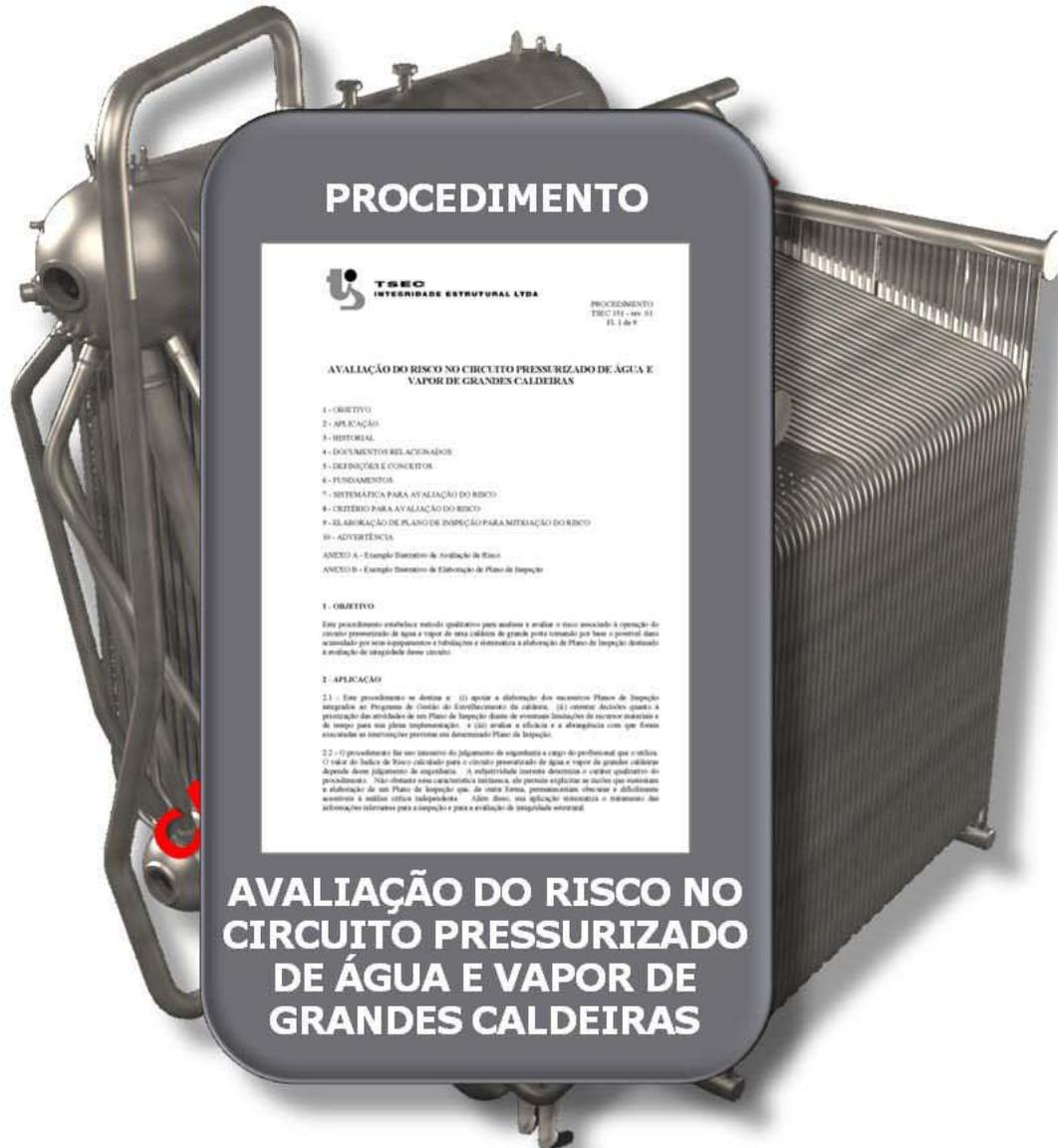


Diagrama geral de risco CoF x PoF. O risco A associado à falha A corresponde à área delimitada nesse diagrama pela probabilidade de falha PoF_A e pela consequência CoF_A atribuídas a essa falha.



OBJETIVO GERAL DO PROCEDIMENTO

Estabelecer método qualitativo para avaliar o risco associado à operação do circuito pressurizado de água e vapor de uma caldeira de grande porte tomando por base o possível dano acumulado por seus equipamentos e tubulações.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(i) Apoiar a elaboração de sucessivos Planos de Inspeção integrados à Gestão de Integridade de uma caldeira de grande porte;

(ii) Orientar decisões quanto à priorização das atividades de um Plano de Inspeção diante de eventuais limitações de recursos materiais e de tempo para sua plena implementação.



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:

PROCEDIMENTO

AVALIAÇÃO DO RISCO NO CIRCUITO PRESSURIZADO DE ÁGUA E VAPOR DE GRANDES CALDEIRAS

AValiação do Risco no Circuito Pressurizado de Água e Vapor de Grandes Caldeiras

Etapa I - Identificação dos equipamentos e tubulações de interesse	⊕
Etapa II - Análise de informações	⊕
Etapa III - Definição dos objetos para avaliação do risco	⊕
Etapa IV - Identificação das ameaças de falha	⊕
Etapa V - Avaliação dos Índices de Risco	⊕
Etapa VI - Relatório de avaliação do risco	⊕

AVANÇAR



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa III – Definição dos objetos para avaliação do risco:

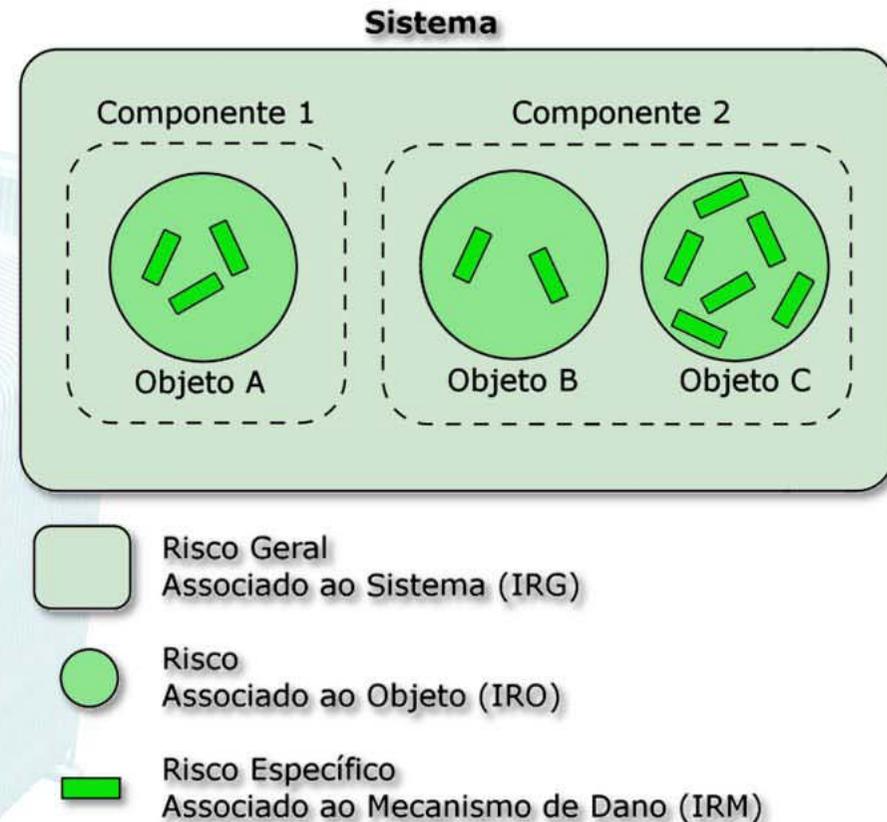
Natureza dos Riscos: [1 de 3]

Distingue-se o risco em três níveis, conforme ilustrado na Figura ao lado.

a) Risco Específico Associado ao Mecanismo de Dano (IRM):

É o risco unitário atribuído a cada falha capaz de se manifestar no circuito pressurizado de água e vapor em decorrência da atividade de mecanismos de dano.

Essa atividade pode se dar pela atuação individual de certo mecanismo, ou pela ação combinada em série ou em paralelo de distintos mecanismos, cabendo usualmente o controle principal da taxa de acumulação de dano a um deles.



Relação entre os diferentes níveis de risco, considerando um sistema composto por três objetos, dois dos quais pertencentes a um mesmo componente, com cada objeto exposto a certo número de mecanismos de dano capazes potencialmente de promover falha.



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa III – Definição dos objetos para avaliação do risco:

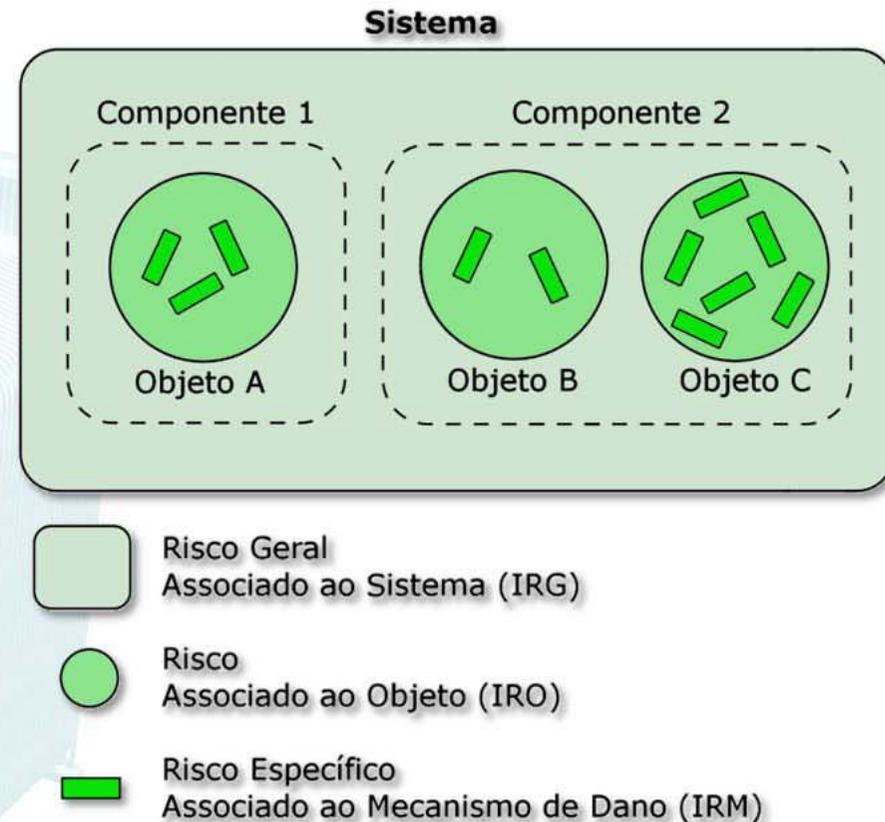
Natureza dos Riscos: [2 de 3]

Distingue-se o risco em três níveis, conforme ilustrado na Figura ao lado.

b) Risco Associado ao Objeto (IRO):

É o risco individual de cada objeto em se subdivide o circuito pressurizado de água e vapor, seja ele equipamento, tubulação, partes específicas dos mesmos ou agrupamentos de componentes análogos.

O valor do IRO - Índice de Risco do Objeto - resulta da soma dos IRMs calculados para cada mecanismo de dano potencialmente capaz de promover falha no objeto específico.



Relação entre os diferentes níveis de risco, considerando um sistema composto por três objetos, dois dos quais pertencentes a um mesmo componente, com cada objeto exposto a certo número de mecanismos de dano capazes potencialmente de promover falha.



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa III – Definição dos objetos para avaliação do risco:

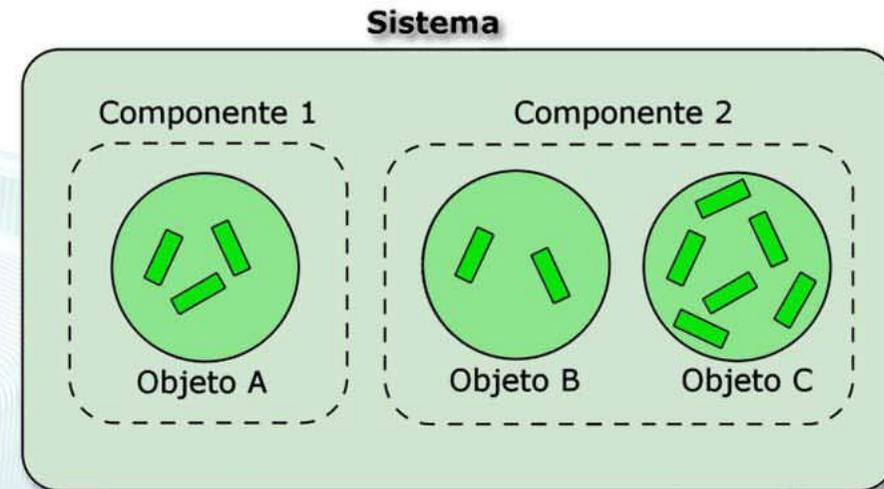
Natureza dos Riscos: [3 de 3]

Distingue-se o risco em três níveis, conforme ilustrado na Figura ao lado.

c) Risco Geral Associado ao Sistema (IRG):

No caso presente, é o risco associado ao circuito pressurizado de água e vapor como um todo.

O IRG é a soma dos IROs correspondentes aos objetos desse sistema, sejam esses objetos equipamentos, tubulações, partes específicas dos mesmos ou agrupamentos de componentes análogos.

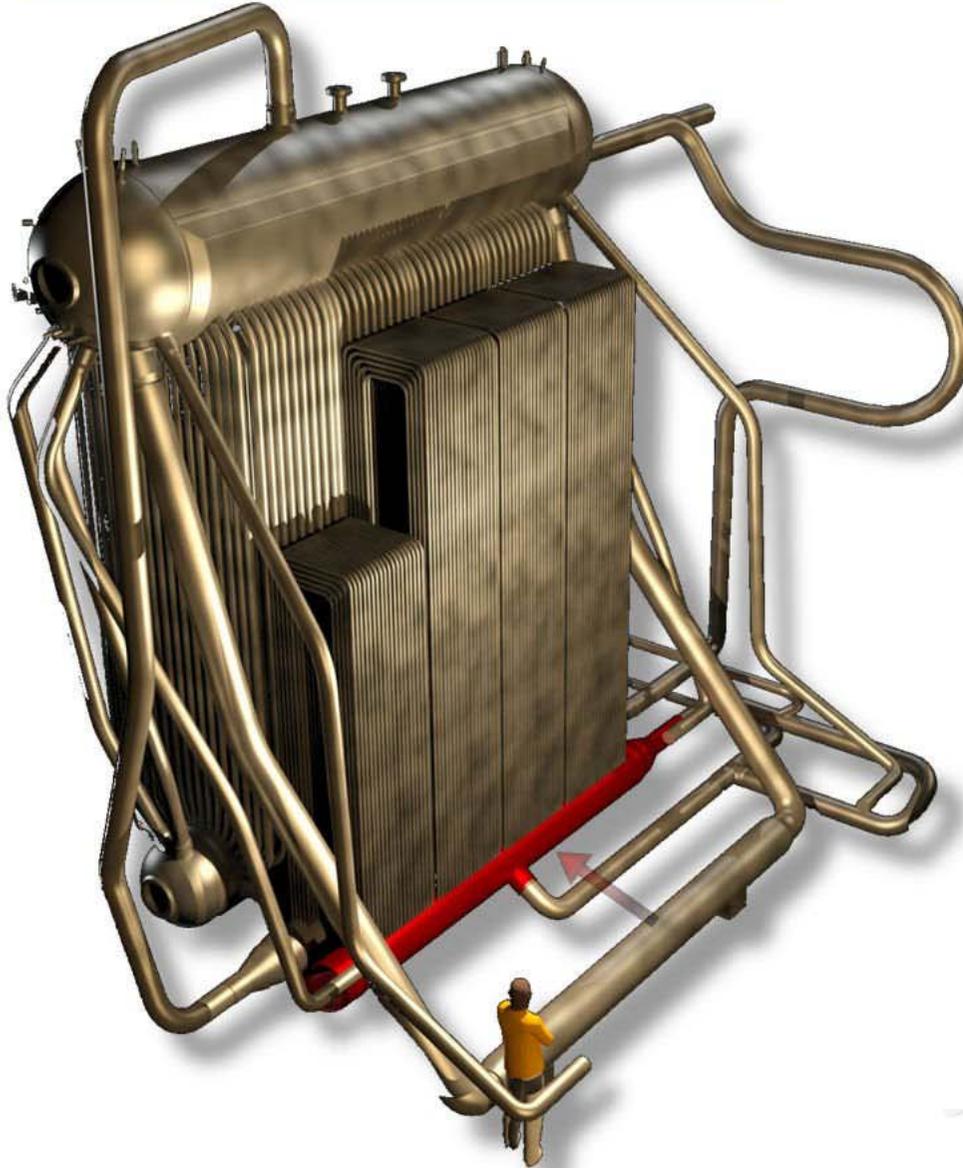


-  Risco Geral Associado ao Sistema (IRG)
-  Risco Associado ao Objeto (IRO)
-  Risco Específico Associado ao Mecanismo de Dano (IRM)

Relação entre os diferentes níveis de risco, considerando um sistema composto por três objetos, dois dos quais pertencentes a um mesmo componente, com cada objeto exposto a certo número de mecanismos de dano capazes potencialmente de promover falha.



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa IV – Identificação das ameaças de falha

Coletor de saída do superaquecedor secundário:

- **Fluência**
localização: faces do tê disposto no centro do coletor e nas três juntas soldadas desse tê, com destaque para a junta entre o tê e a linha principal de vapor.
- **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**
localização: três juntas soldadas do tê situado no centro do coletor.
- **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**
localização: ligação entre furos dos bocais dos tubos dos painéis.
- **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**
localização: superfície externa, junto dos apoios e na solda entre costado e end caps planos, se existirem.



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa V – Avaliação dos Índices de Risco:

Critérios Para Avaliação do Índice de Risco do Mecanismo (IRM): [1 de 2]

Aplicando-se a definição de risco, tem-se:

$$\text{IRM} = \text{CoF} \times \text{PoF} \times \text{Fi}$$

Onde:

CoF é a consequência da falha;

PoF é a probabilidade de ocorrência;

Fi é o fator de intensificação da probabilidade de ocorrência.

A CoF e a PoF são indicadores de natureza geral que, em princípio, delineiam o perfil do circuito pressurizado de água e vapor, mas que não consideram informações específicas dos objetos da avaliação de risco. Por sua vez, o indicador Fi particulariza a avaliação de risco para cada manifestação de dano potencialmente ativa nos objetos selecionados do sistema de interesse.

O critério de classificação da CoF considera a possibilidade de dano físico aos operadores e demais circunstâncias eventuais, assim como a perda de produção resultante do tempo de indisponibilidade da caldeira para reparo da falha e dos danos indiretos decorrentes.

O critério de classificação da PoF leva em conta a frequência em geral atribuída a falhas semelhantes em equipamentos ou tubulações similares.



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa V – Avaliação dos Índices de Risco:

Critérios Para Avaliação do Índice de Risco do Mecanismo (IRM): [2 de 2]

Aplicando-se a definição de risco, tem-se:

CoF - Consequência da Falha

PoF - Probabilidade de Ocorrência

Fi - Fator de Intensificação da Probabilidade



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa V – Avaliação dos Índices de Risco:

Critérios Para Avaliação do Índice de Risco do Mecanismo (IRM): [2 de 2]

Aplicando-se a definição de risco, tem-se:

CoF - Consequência da Falha

PoF - Probabilidade de Ocorrência

Fi - Fator de Intensificação da Probabilidade

CoF - Consequência da Falha		
Escala		Valor
Consequência baixa	L	1
Consequência moderada	M	2
Consequência alta	N	5

PERDA DE PRODUÇÃO	além de 15 dias			
		ESCALA N		
	de 10 a 15 dias	ESCALA M		
	até 5 dias	ESCALA L		
		remota	pouco relevante	significativa
POSSIBILIDADE DE DANO A PESSOA				





APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa V – Avaliação dos Índices de Risco:

CrITÉRIOS Para Avaliação do Índice de Risco do Mecanismo (IRM): [2 de 2]

Aplicando-se a definição de risco, tem-se:

CoF - Consequência da Falha

PoF - Probabilidade de Ocorrência

Fi - Fator de Intensificação da Probabilidade

PoF - Probabilidade de Ocorrência			
Escala		Valor	Propriedades gerais
Probabilidade baixa	R	1	Raríssimos casos documentados na literatura
Probabilidade moderada	S	2	Poucos casos documentados na literatura
Probabilidade alta	T	3	Ref. frequentes na literatura



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa V – Avaliação dos Índices de Risco:

Critérios Para Avaliação do Índice de Risco do Mecanismo (IRM): [2 de 2]

Aplicando-se a definição de risco, tem-se:

CoF - Consequência da Falha

PoF - Probabilidade de Ocorrência

Fi - Fator de Intensificação da Probabilidade

O indicador Fi considera as informações individualizadas disponíveis sobre o histórico de inspeção de cada componente.

Fi - Fator de Intensificação		
Valor de Ref.	Propriedades Específicas do Objeto	Valor
α	(i) histórico de inspeções eficazes <u>e</u> (ii) inexistência de registro de dano acumulado que ameace a integridade.	1
β	(i) histórico de inspeções de baixa eficácia em relação aos mecanismos de dano potencialmente ativos <u>ou</u> (ii) presença de dano acumulado moderado sob acompanhamento mediante inspeção.	2
γ	(i) estado de acumulação de dano desconhecido <u>ou</u> (ii) ameaça significativa de falha decorrente de dano acumulado.	4

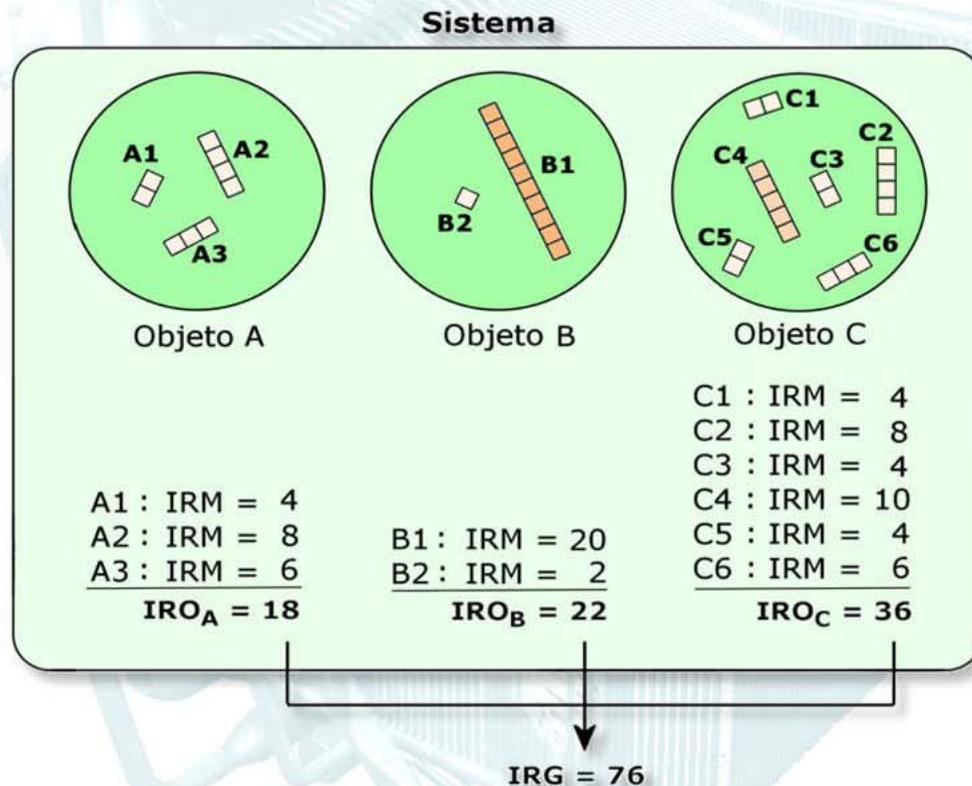


APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:



Etapa V – Avaliação dos Índices de Risco:

Aplicação dos Índices de Risco:



T (3)	γ (4)			
	β (2)	A3		
	α (1)		C6	
S (2)	γ (4)			
	β (2)	C3	A2	B1
	α (1)		C5	C4
R (1)	γ (4)	A1	C2	
	β (2)		C1	
	α (1)		B2	
		L (1)	M (2)	N (5)

PoF - probabilidade

CoF - consequência

IRM = CoF x Pof x Fi

Exemplo de análise do impacto específico dos valores dos IRMs estabelecidos para três objetos. Note-se que, embora o objeto B possua o maior IRM individual (B1), o IRO associado ao objeto B é significativamente inferior ao IRO associado ao objeto C.



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:

Etapa VI – Relatório de Avaliação do Risco: [1 de 4]

2015

• Linha principal de vapor	52,0
• Tubulão superior	44,0
• Coletor de saída do superaquecedor terciário	38,0
• Linhas de alimentação dos sopradores de fuligem	36,0
• Linhas de alimentação de água nos dessuperaquecedores	36,0
• Coletor de saída do superaquecedor secundário	68,0
• Linha do dessuperaquecedor secundário ao superaquecedor terciário	34,0
• Coletor de entrada do superaquecedor terciário	32,0
•
• Linha entre o dessuperaquecedor primário e o superaquecedor secundário	28,0
• Coletor de entrada do superaquecedor primário	24,0
• Dessuperaquecedor secundário	26,0
• Dessuperaquecedor primário	26,0
• Coletor de entrada do superaquecedor secundário	22,0
• Linha do superaquecedor secundário ao dessuperaquecedor secundário	10,0
• Linha entre o economizador I e o economizador II	6,0
• Tubos de descida do steam screen	6,0
• Tubos de subida do steam screen	6,0
• Linha do superaquecedor primário ao dessuperaquecedor primário	6,0

IRG 840,0



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:

Etapa VI – Relatório de Avaliação do Risco: [2 de 4]

Coletor de saída do superaquecedor secundário:

2015 

- **Fluência:**

localização: faces do tê disposto no centro do coletor e nas três juntas soldadas desse tê, com destaque para a junta entre o tê e a linha principal de vapor.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
N	R	Y	5 x 1 x 4 = 20

- **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**

localização: três juntas soldadas do tê situado no centro do coletor.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
N	R	Y	5 x 1 x 4 = 20

- **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**

localização: ligação entre furos dos bocais dos tubos dos painéis.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
N	R	Y	5 x 1 x 4 = 20

- **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**

localização: superfície externa, junto dos apoios e na solda entre costado e end caps planos, se existirem.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
M	R	Y	2 x 1 x 4 = 8

IRO – RISCO ASSOCIADO AO OBJETO: 68



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:

Etapa VI – Relatório de Avaliação do Risco: [3 de 4]

Coletor de saída do superaquecedor secundário:

2016

• **Fluência:**

localização: faces do tê disposto no centro do coletor e nas três juntas soldadas desse tê, com destaque para a junta entre o tê e a linha principal de vapor.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
N	R	Y	5 x 1 x 2 = 10

• **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**

localização: três juntas soldadas do tê situado no centro do coletor.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
N	R	Y	5 x 1 x 2 = 10

• **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**

localização: ligação entre furos dos bocais dos tubos dos painéis.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
N	R	Y	5 x 1 x 2 = 10

• **Corrosão/fadiga ou fadiga de baixo ciclo**

localização: superfície externa, junto dos apoios e na solda entre costado e end caps planos, se existirem.

cof	pof	Fi	IRM = cof x pof x Fi
M	R	Y	2 x 1 x 2 = 4

IRO – RISCO ASSOCIADO AO OBJETO: 34



APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO TSEC 151:

Etapa VI – Relatório de Avaliação do Risco: [4 de 4]

	<u>2015</u>	<u>2016</u>
• Linha principal de vapor	52,0	30,0
• Tubulão superior	44,0	20,0
• Coletor de saída do superaquecedor terciário	38,0	32,0
• Linhas de alimentação dos sopradores de fuligem	36,0	36,0
• Linhas de alimentação de água nos dessuperaquecedores	36,0	36,0
• Coletor de saída do superaquecedor secundário	68,0	34,0
• Linha do dessuperaquecedor secundário ao superaquecedor terciário	34,0	34,0
• Coletor de entrada do superaquecedor terciário	32,0	32,0
• ...		
• Linha entre o dessuperaquecedor primário e o superaquecedor secundário	28,0	20,0
• Coletor de entrada do superaquecedor primário	24,0	18,0
• Dessuperaquecedor secundário	26,0	20,0
• Dessuperaquecedor primário	26,0	26,0
• Coletor de entrada do superaquecedor secundário	22,0	20,0
• Linha do superaquecedor secundário ao dessuperaquecedor secundário	10,0	10,0
• Linha entre o economizador I e o economizador II	6,0	6,0
• Tubos de descida do steam screen	6,0	6,0
• Tubos de subida do steam screen	6,0	6,0
• Linha do superaquecedor primário ao dessuperaquecedor primário	6,0	6,0

IRG 840,0 IRG 732,0



APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE RISCO

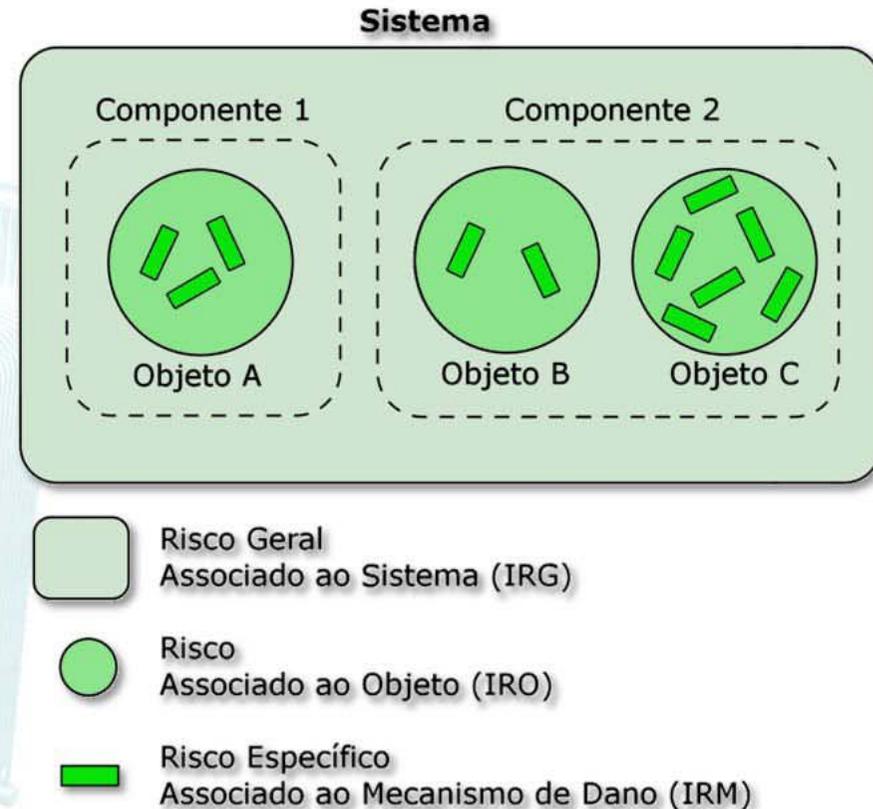
a) Impacto dos IRMs na priorização de atividades:

O desconhecimento sobre o estado de acumulação de dano associado a algum mecanismo passível de atuação em determinado objeto justifica atribuir um valor alto ao índice F_i , do que resulta o aumento do respectivo IRM.

Um valor elevado de IRM justifica a priorização de atividades específicas na inspeção subsequente, ainda que o IRO atribuído ao objeto em questão não seja particularmente elevado.

b) Impacto dos IROs na priorização de atividades:

Um valor elevado de IRO, aponta para a necessidade de sua inclusão no Plano de Inspeção destinado a orientar as atividades da parada subsequente, ainda que nenhum de seus IRMs seja individualmente elevado.





APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE RISCO

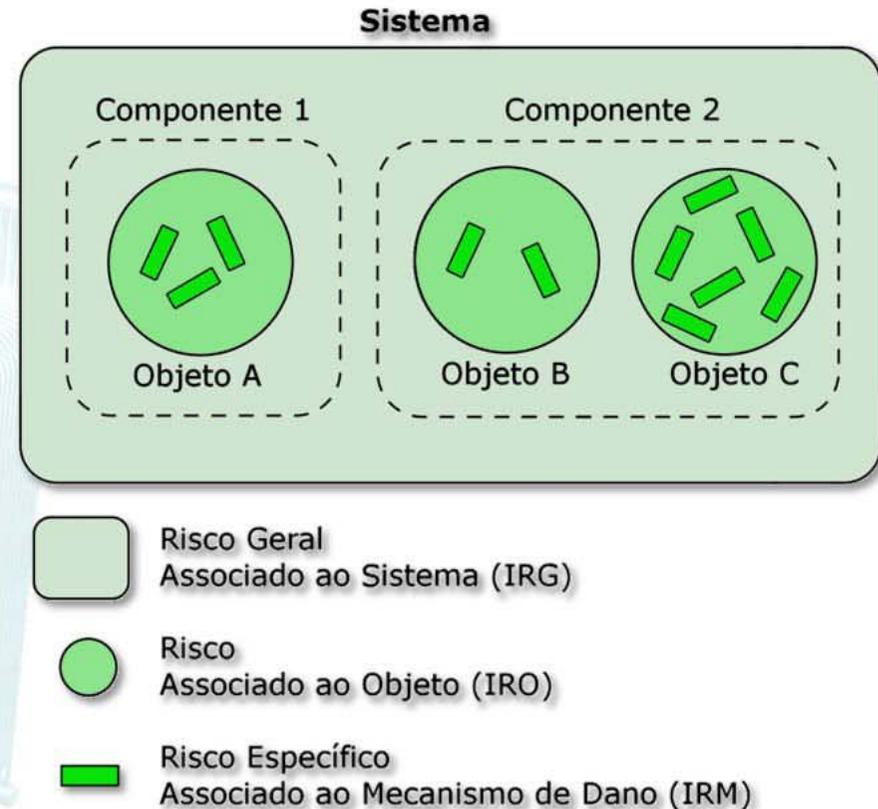
c) Evolução dos valores dos índices IRM e IRO:

Uma vez que um objeto seja inspecionado, as novas informações adquiridas sobre seu estado de dano acumulado redefinem o valor atribuído ao índice Fi.

Uma redução será tanto maior quanto mais eficazes forem os métodos de inspeção, os procedimentos efetivamente aplicados em campo e quanto maior for a extensão da área amostral coberta pelas inspeções.

d) Variação do IRG ao longo de ciclos de inspeção:

A variação do IRG - Índice de Risco Geral - ao longo de ciclos sucessivos de inspeção é um indicativo da amplitude e da eficácia com que essa inspeção foi conduzida.





CONCLUSÕES

- A metodologia ora tratada se destina a avaliar o risco associado à operação de caldeiras de grande porte tomando por base o possível dano acumulado por seus equipamentos e tubulações.
- O procedimento explicita as razões que sustentam a elaboração de Planos de Inspeção que, de outra forma, permaneceriam obscuras e dificilmente acessíveis à análise crítica independente, favorecendo um uso mais efetivo dos recursos disponíveis.
- O planejamento de cada ciclo de inspeção a partir da análise detalhada dos índices de risco ora apresentados requer análise de engenharia criteriosa e uso intensivo do julgamento e da experiência dos profissionais responsáveis.
- Entende-se essa metodologia como parte de um processo maior de Gestão de Integridade, que deve ser orientado para acompanhar, monitorar, conservar e, se possível, aperfeiçoar a adequação ao uso da caldeira através de ações integradas e contínuas.