 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

## SUMÁRIO

1.	OBJETIVO.....	1
2.	ÂMBITOS DE APLICAÇÃO.....	1
3.	DEFINIÇÕES.....	1
4.	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA.....	2
5.	RESPONSABILIDADES.....	2
6.	REGRAS BÁSICAS.....	2
7.	CONTROLE DE REGISTROS.....	8
8.	ANEXOS.....	8
9.	REGISTROS DE ALTERAÇÕES.....	41

## 1. OBJETIVO

Este documento técnico derivado do Relatório Técnico REM 2015-050, contém os principais conceitos como subsídios ao dimensionamento físico da quantidade de equipamentos de Subestações do Sistema Elétrico da CPFL, pertencentes a Reserva Técnica da Subtransmissão para atendimento emergencial, utilizando como base a Distribuição de Poisson, visando subsidiar as áreas de manutenção e investimentos da subtransmissão e a otimização dos recursos.

## 2. ÂMBITOS DE APLICAÇÃO


Engenharia, Gestão de Ativos, Operação do Sistema Elétrico e Operações de Subtransmissão, das empresas Distribuidoras do Grupo CPFL, denominadas neste documento como CPFL.

## 3. DEFINIÇÕES

Os equipamentos armazenados na Reserva Técnica da Subtransmissão a que se refere ao presente Relatório Técnico compreende os transformadores trifásicos e monofásicos, disjuntores, para raios, transformadores de corrente e transformadores de potencial, de diversas potências e tensões primárias nominais de 34,5 até 138 kV.

Os equipamentos que se encontram armazenados na Reserva Técnica da Subtransmissão são equipamentos “unitizados”.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	1 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
	Transmissão Poisson	

#### 4. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Não aplicável

#### 5. RESPONSABILIDADES

A Engenharia de Normas e Padrões das empresas distribuidoras do Grupo CPFL é a responsável pela publicação deste documento.

#### 6. REGRAS BÁSICAS

##### 6.1 Introdução

Para que a CPFL atenda as necessidades inerentes ao fornecimento de energia, com a qualidade exigida pelos clientes e em consonância com a legislação e requisitos dos órgãos reguladores é imprescindível que mantenha o fluxo de equipamentos do item 6, sem interrupção.

O dimensionamento da reserva técnica depende, em síntese, do tipo de equipamento (reparável: transformador de potência, reguladores de tensão, autotransformadores, etc. ou não reparável: para raios, transformadores de corrente e de potencial, etc.), dos tempos médios de reparos (quando reparável), das taxas de falhas durante este período e da margem de segurança (confiabilidade do processo) definida por filosofia da CPFL.

Não é objetivo do presente documento e seus anexos esgotar as imensas possibilidades e alternativas de estudos, análises e pesquisas desta natureza, disponível em uma grande variedade de literaturas dedicadas.


##### 6.2 Reserva Técnica

Basicamente, existem dois conceitos de reserva técnica das famílias de equipamentos disponíveis para subestações: reserva quente e reserva fria, como definido a seguir.

###### 6.2.1 - RESERVA QUENTE

Trata-se de uma quantidade de equipamentos instalados no sistema que funcionam esporadicamente ou ociosamente. No caso de transformadores, em geral, esta quantidade de equipamentos excedentes na subestação e,

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	2 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

consequentemente, no sistema como um todo está próxima dos 50% do total de transformadores instalados.

Apesar da grande flexibilidade operativa obtida e da redução drástica de indicadores, tais como o DEC, FEC, DIC e FIC tal critério implica em maiores investimentos para a concessionária de energia elétrica.

### 6.2.2 - RESERVA FRIA

Refere-se aos equipamentos que ficam desmontados, armazenados e conservados em um almoxarifado central e/ou estratégico. Havendo necessidade, o equipamento deve ser transportado, montado e ensaiado antes de entrar em operação. Embora o custo desta reserva seja extremamente reduzido, se comparado com a reserva quente, este conceito apresenta uma série de pontos relevantes que merecem especial atenção:

- Os indicadores (DEC, FEC, DIC e FIC) podem ser afetados;
- A flexibilidade operativa do sistema é reduzida;
- Há necessidade de atualização constante da base de dados de manutenção e ocorrências no sistema, o que possibilita a elaboração de um histórico de falhas e defeitos, essencial para subsidiar o dimensionamento dos equipamentos a serem mantidos na reserva;
- Devido à variedade dos equipamentos instalados, pode ocorrer um aumento desnecessário no número de equipamentos reserva, pois há necessidade de pelo menos um equipamento reserva para atender cada uma das famílias de equipamentos existentes.


Todos os itens acima devem ser considerados para que a empresa cumpra satisfatoriamente sua missão, porém o último item merece maior dedicação.

### 6.2.3 - FAMÍLIA DE EQUIPAMENTOS

Define-se como **família** o conjunto de equipamentos que possam ser intercambiáveis entre si, seja no total ou em partes, podendo executar as mesmas funções.

O conceito de família leva em conta uma otimização de equipamentos na reserva, que contribui para a redução do custo, porém pode implicar algumas limitações ao

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	3 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

sistema. Assim deve-se definir um determinado número de equipamentos com características (subfamília) para compor uma família, sem que a mesma venha a ser desconfigurada.

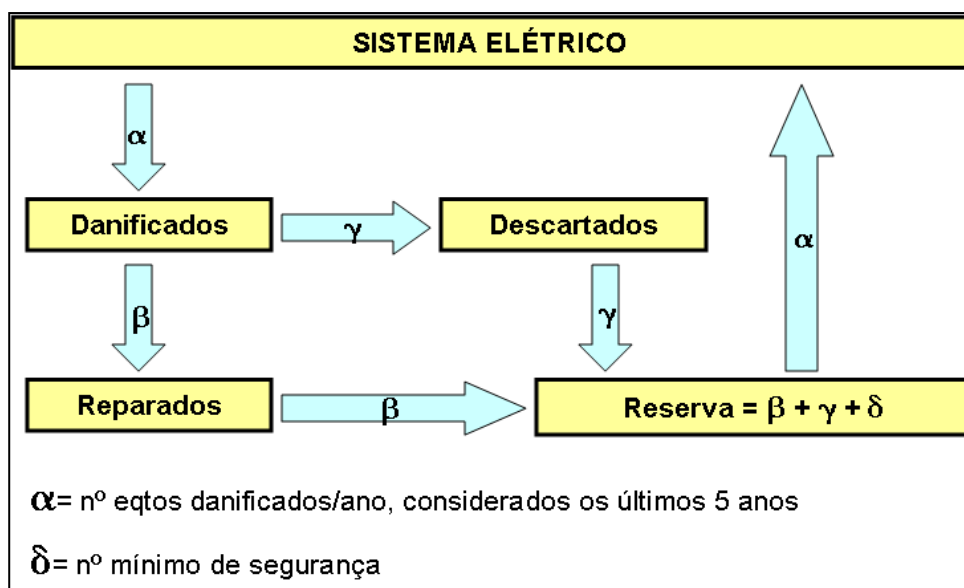
Também não é incomum que um determinado equipamento, pertencente a uma determinada família, possa substituir um de outra família, porém o contrário pode não ser verdadeiro.


Desta forma é essencial que a Gestão de Ativos, Operações de Subtransmissão, Operação e Engenharia de Manutenção definam em conjunto, os locais críticos do sistema e, como consequência, definam quais os equipamentos que exigem reservas, independentemente da quantidade de falhas que ocorram nestas famílias de equipamentos.

### 6.3 Fluxo dos Equipamentos

O fluxo de equipamentos entre Sistema Elétrico e o local de armazenamento da Reserva Técnica, faz uso do preceito técnico da Cadeia de Markov (ou sua variante simplificada denominado Modelo de Poisson) e é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema Teórico do Processo Dimensionamento da Reserva



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

As variáveis  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são quantidades de equipamentos em movimentação. As condições do contorno deste fluxo são as seguintes:


- a)  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são dinâmicos e apresentam graus de incerteza;
- b) O nível de segurança ( $\delta$ ), a ser definido em função das premissas abaixo, pode ser ajustado pelas Gerências de Ativos como decorrência de histórico de falhas, variações de tempo de reparo e demais incertezas do processo:
- O tempo de reparo dos equipamentos danificados (quanto menor é melhor);
  - O percentual de equipamentos da família no total (quanto menor é pior);
  - O tempo restante de utilização (quanto menor é pior);
  - O valor mínimo é igual a 1.

Deste modo o cálculo do nível de segurança é o seguinte:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= [(\text{tempo reparo}) / (\text{intervalo entre falhas})] \\ \delta_2 &= \{1 - [(\text{vida útil média}) / (\text{vida útil})]\} \\ \delta_3 &= [(\text{quantidade equipamentos da família}) / (\text{quantidade de equipamentos total})] \\ \delta_4 &= (\text{quantidade de equipamentos falhados}) \\ \delta &= \delta_1 \times \delta_2 \times \delta_3 \times \delta_4\end{aligned}$$

- c) O número de equipamentos a serem descartados ( $\gamma$ ), depende de vários fatores, tais como:
- Quanto maior a idade média dos equipamentos, maior é  $\gamma$ ;
  - Grau médio de danos sofridos pelos equipamentos;
  - O valor máximo é igual ao nº de equipamentos falhados.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	5 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

$$\gamma = \underbrace{(\text{idade média} \times \text{grau médio dano})}_{a} \times \underbrace{n^{\circ} \text{ equipamentos falhados}}_{b} \times 0,1$$

vida útil

As variáveis a e b assumem valores entre 0 e 1

No Anexo I pode se acompanhar o processo adotado pela Área de Gestão de Ativos atualmente, levando em consideração a quantidade de equipamentos, taxa de falhas, idade, e demais preceitos aqui estabelecidos.

Alguns dos conceitos e metodologias mais aprofundados do presente processo encontram-se descritos sequencialmente do Anexo II até o Anexo IV. No Anexo II encontra-se o conceito em forma descritiva de estudo IEEE Transactions; no Anexo III apresenta-se uma aplicação da metodologia em questão com dados típicos de transformadores de potência visando uma abordagem de confiabilidade e outra abordagem econômica e financeira; no Anexo IV pode-se acompanhar um dos critérios típicos adotados de uma maneira geral para definição de confiabilidade mínima do processo e os vários parâmetros possíveis de serem calculados para atuais e futuras análises.

#### 6.4 Dimensionamento Ótimo da Reserva Técnica

Uma vez que se faça opção por um critério técnico e econômico para a reserva, a utilização de métodos inadequados para o dimensionamento acarretaria por um lado, a redução da capacidade de atender ao sistema elétrico, e por outro, em um significativo capital imobilizado em equipamentos, que são utilizados com menor frequência.

Mesmo considerando atendidas as questões indicadas acima e os níveis de confiabilidade do sistema, podem ser ainda incorporados conceitos complementares, à medida que ocorre o aperfeiçoamento das práticas, métodos, critérios e disponibilidades computacionais. Algumas das variáveis envolvidas neste contexto são as seguintes: a) probabilidades instantâneas de funcionamento e falhas súbitas dos equipamentos; b) faixa etária dos equipamentos da família; c) valores de investimento na reserva e custos de interrupção de energia e não faturamento; d) períodos de tempo de aquisição de equipamentos ou tempo de reparos destes.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	11/10/2022	6 de 41


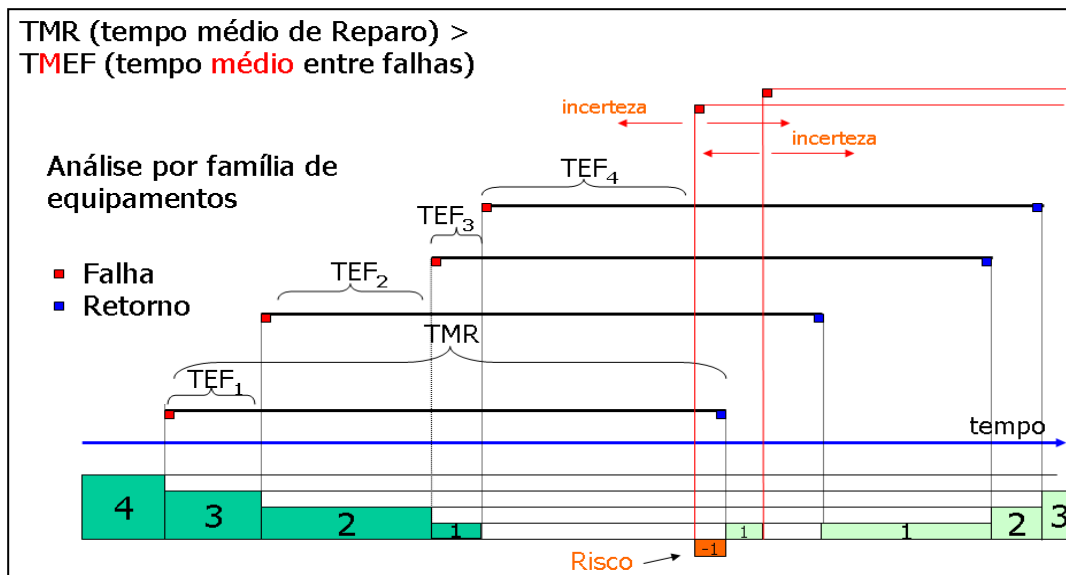
 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Figura 2 – Diagrama Esquemático do Processo desenvolvido no tempo




## 6.5 Diagnósticos Periódicos

Ao final de cada avaliação do dimensionamento da reserva técnica existe necessidade de elaboração de diagnóstico a respeito da situação dos equipamentos indicando recomendações e medidas para os ajustes necessários, tais como agilização de processos de reparos, aquisição de novos equipamentos para reserva, redefinição das quantidades de transformadores na reserva, dentre outras providências. Portanto, a periodicidade está associada aos ciclos orçamentários.

## 6.6 ATRIBUIÇÕES

A responsabilidade pela definição das famílias de equipamentos, criação de bancos de dados e realização de diagnósticos periódicos, administração e dimensionamento da reserva técnica é da Gerência de Ativos. Esta também realiza a respectiva gestão dos fluxos de equipamentos, tratando das incertezas do processo e o nível de risco desejado, como ilustrado na Figura 2.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	7 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

Pelo exposto nesta Figura, existe a possibilidade também de se controlar ou ajustar o nível da reserva técnica, através da administração dos tempos de reparos.

Portanto, deve-se buscar de forma permanente a otimização do tempo de reparo, para que não haja dispêndio a maior com estes equipamentos.

## 7 CONTROLE DE REGISTROS

Todos os registros de demandas de cálculos de reserva técnica de equipamentos e as bases adotadas para tal finalidade (taxa de falhas média da família, quantidade de unidades da família, etc.) devem ser apontados como referências e condições de contorno estabelecidas.

## 8 ANEXOS

Fazem parte integrante do presente documento os seguintes anexos elaborados para melhorar o entendimento do processo.

Anexo I – Estudos Originais sobre dimensionamento de reserva técnica exemplificado por uma família de transformadores de potência


Anexo II – Artigo IEEE Transactions sobre dimensionamento ótimo de reserva técnica exemplificado por uma família de transformadores de potência

Anexo III – Aplicação do conceito IEEE sobre dimensionamento de reserva técnica exemplificado por uma família de transformadores de potência

Anexo IV – Definição de confiabilidade mínima x indicadores de qualidade de serviços de energia

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	8 de 41



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
	Transmissão Poisson	

## ANEXO I – ESTUDO ORIGINAL SOBRE DIMENSIONAMENTO DE RESERVA TÉCNICA (EXEMPLO: TRANSFORMADORES DE SUBESTAÇÕES)


Uma síntese da prática adotada atualmente encontra-se descrita abaixo em forma de planilha autoexplicativa em Excel, como uma visão exemplificativa de transformadores de potência.

Na Tabela 1 são levantados os dados cadastrais de cada família de transformadores (tensão, potência, tipo de ligação, etc.), idade média, quantidade instalada e em operação de cada família, taxas de falhas, tempo médio entre falhas e tempos típicos de reparos. Como resultado tem-se a quantidade de unidades atualmente “disponível” na reserva técnica.

Tabela 1 – Dados Cadastrais de Transformadores por Família

TRANSFORMADORES DE FORÇA					
TIPO EQUIPAMENTO	TENSÃO (kV)	FAMÍLIAS POTÊNCIA (kVA)			
		Maior ou Igual	Menor ou Igual	Conexão	Comutação
Trafos Trifásicos	138 / 13,8 - 11,9	>=5000	<=12500	Δ/Y	Sem Comutador
				Δ/Y	Com Comutador
		>=15000	<=20000	Δ/Y	Com Comutador
				Δ/Y	Sem Comutador
		>12500	<=20000	Δ/Y	Com Comutador
	138 / 13,8 - 11,9	>20000	<=25000	Δ/Y	Sem Comutador
		>25000	<=30000	Δ/Y	Sem Comutador
			26.600	Δ/Y	Com Comutador
		>=30000	<=40000	Δ/Y	Com Comutador
		>40000		Δ/Y	Com Comutador
	138 / 34,5 - 13,8 - 11,9	Total			
		>=20000	<=25000	Δ/Y	Sem Comutador
			25.000	Δ/Y	Com Comutador
		Total			
	69 / 13,8 - 11,9		<=5000	Δ/Y	Sem Comutador
		>5000	<=6500	Δ/Y	Sem Comutador
		>6500	<=12500	Δ/Y	Sem Comutador
		>12500	<=20000	Δ/Y	Sem Comutador
			12.500	Δ/Y	Com Comutador
	34,5 / 13,8 - 11,9	Total			
		>=625	<=2700	Δ/Y	Sem Comutador
		>=5000		Δ/Y	Sem Comutador
		>=6250		Δ/Y	Com Comutador
		Total			
Autotrafos Trifásicos	138/69/13,8 - 11,9		<=45000		Com Comutador
	69/34,5		<=10000		Sem Comutador
	Total				

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	9 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de cálculos de reserva técnica, usando como base a taxa de falhas, quantidade da família, idade, unidades de segurança e unidades em reforma.


Tabela 2 – Previsão Futura da Reserva de Transformadores

TIPO EQUIPAMENTO	TENSÃO (kV)	FAMÍLIAS POTÊNCIA (kVA)	Taxa Falha (últimos 5 anos)	Qtde Eqtos Existentes	Idade Média (anos)	Qtde eqtos podem falhar ( $\alpha$ )	Qtde eqtos a reparar ( $\beta$ )	n° min segurança ( $\delta$ )	Reserva Técnica Calculada
Trafos Trifásicos	138 / 13,8 - 11,9	5.000 a 12.500	2,35%	17	40	1	2	1	2
		5.000 a 12.500 com CSC	10,00%	4	8	1	1	1	1
		15.000 a 20.000 com CSC	0,00%	3	36	1	1	1	1
		12.501 a 20.000	1,43%	14	48	1	1	1	1
		12.501 a 20.000 Ligação Y/Y com CSC	0,00%	7	7	1	0	1	1
		20.001 a 25.000 c/ tap 34,5 kV - SE Artiladora	0,00%	1	27	1	0	1	1
		20.001 a 25.000	0,94%	128	28	1	1	2	2
		25.000 com CSC	1,43%	36	8	1	2	1	2
		40.000 com CSC	1,25%	16	9	1	0	1	1
		Maior 40.000 com CSC - SE Campinas Centro	0,00%	4	24	1	0	1	1
		<b>Total</b>		<b>250</b>		<b>10</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>13</b>
	69 / 13,8 - 11,9	Menor 5.000	0,91%	22	59	1	0	1	1
		5.000 a 6.500	0,00%	43	49	1	0	1	1
		6.501 a 12.500	2,74%	51	38	1	2	1	2
		12.501 a 20.000 - Reserva SE 3M	0,00%	14	37	1	1	1	1
		12.500 com CSC	0,00%	4	4	1	0	1	1
		<b>Total</b>		<b>134</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	34,5 / 13,8 - 11,9	625 a 2.700	0,00%	4	55	1	0	1	1
		Maior ou igual 6.250	2,85%	14	32	1	0	1	1
		Maior ou igual 6.250 com CSC	0,00%	4	5	1	0	1	1
		<b>Total</b>		<b>22</b>		<b>3</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
Autotrafos Trifásicos	38/69/13,8 - 11,9	41.600	4,29%	14	31	1	1	1	1
		<b>Total</b>		<b>14</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Na Tabela 3 abaixo são apresentadas as previsões de aquisição, unidades em reforma, unidades disponíveis (e eventuais unidades a serem utilizadas em arranjos provisórios em obras) em obras de subestações. Como resultado tem se a quantidade necessária de reserva técnica de cada família.

Tabela 3 – Situação Atual da Reserva de Transformadores

Reserva Técnica Física	Reserva Técnica Reparos	Reserva Técnica (Física + Reparos)
0	2	2
1	1	2
2	1	3
1	1	2
1	0	1
1	0	1
1	1	2
4	2	6
1	0	1
1	0	1
13	8	21
0	0	0
1	0	1
3	2	5
0	1	1
1	0	1
5	3	8
0	0	0
2	0	2
3	0	3
5	0	5
0	1	1
0	1	1

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

A diferença entre as unidades de reserva no futuro e disponíveis são transformadas em uma lista de transformadores a serem adquiridos.

Por exemplo: na Linha 06 das Tabelas 1, 2 e 3 temos uma determinada família de 128 Transformadores Trifásicos de 138-13,8/11,95 kV; 20 a 25 MVA; Comutador Sem Tensão; idade média de 31 anos; Ligação D-Y; Taxa de falhas média de 1,0% ao ano; trazendo a seguinte situação:

#### Situação Prevista:

- Previsão de falhas = 1 unidades
- Previsão de reparos = 1 unidade
- Previsão para segurança = 2 unidades
- Previsão de utilização em arranjos de obras em 2016 = 0 unidades
- *Reserva técnica prevista = 2 unidades (-1+1+2+0)*

#### Situação Real:


- Disponibilidade física atual na reserva = 1 unidade
- Reparos em andamento, para devolução futura à reserva = 1 unidade
- Instalados em arranjos de obras, para devolução futura à reserva = 0 unidade
- *Reserva técnica atual (física + reparos) = 2 unidades (1+1+0)*

$$\text{Resultado} = (\text{Reserva Técnica Prevista} - \text{Reserva Técnica Atual})$$

**Resultado = 2-2 = 0, ou seja, não existe necessidade de aquisição para esta família de transformadores de potência. Lembrando que esta família está fora de padrão sendo substituída por Transformadores de Potência de 20/26,6MVA. Em termos de reserva técnica pode ser compartilhada entre as duas famílias:**

Transformadores 138-13,8/11,95 kV; 15/20/25MVA; Comutador Sem Tensão  
 Transformadores 138-13,8/11,95 kV; 20/26,6MVA; Comutador Sob Carga

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	11 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

## ANEXO II – ARQUIVO IEEE TRANSACTIONS SOBRE DIMENSIONAMENTO OTIMO DE RESERVA TECNICA (EXEMPLO: TRANSFORMADORES DE SUBESTAÇÕES)

### 1 – SINTESE

Este trabalho apresenta, em forma de tradução livre, os principais conceitos e metodologia probabilística baseada na teoria dos processos estocásticos para estudos e análises de melhor dimensionamento de estoques de reserva de transformadores de potência de subestações de distribuição de energia elétrica. Esta conceituação tem como base estudos iniciais da IEEE Transactions [5], complementados por estudos de confiabilidade e aplicação de métodos [6] [7].

A ideia básica consiste em três fases: (i) representação de uma cadeia de Markov para avaliar a confiabilidade de um sistema de transformadores provido de um estoque de reservas; (ii) avaliação dos custos de investimento e operação do sistema para diversas possibilidades de composição do estoque e (iii) identificação do estoque ótimo, i.e. que resulte na menor soma entre os custos de investimento e operação do sistema.


A proposta indicada permite estimar indicadores de desempenho do sistema como probabilidades de funcionamento e falha, frequência e duração média das falhas, bem uso de valores médios de potência e energia não suprida. Com base nestes indicadores de confiabilidade e parâmetros econômicos, poderão ser estimados os custos de interrupção de consumidores e os prejuízos decorrentes do não faturamento de energia em casos de falhas de equipamentos que não possam ser cobertas pelo estoque de reservas.

Para que pudesse ser levada a termo a possibilidade de estudos mais aprofundados a respeito deste processo, foi criado um programa computacional em linguagem Matlab, e, aplicada a um sistema teste, cujos resultados são apresentados detalhadamente no decorrer do presente documento, incluindo análise de sensibilidade para entender o comportamento dos principais parâmetros.

### 2 – INTRODUCAO

De uma forma geral, o conceito de confiabilidade está relacionado com a existência de redundâncias, ou seja, caminhos alternativos para que um sistema se mantenha em funcionamento, ainda que alguns de seus componentes estejam avariados. O planejamento adequado de um sistema elétrico de distribuição de energia elétrica, por exemplo, prevê a utilização de reservas de transformadores de potência de subestações, uma vez que a falha de um destes equipamentos provoca a interrupção de um grande número de consumidores. [7]. Empresas de geração e transmissão de energia devem ter políticas diferentes de reserva tendo em vista as peculiaridades de suas operações.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	12 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

O número de transformadores instalados em uma subestação pode ser definido pelo critério N-1, em que dois ou mais equipamentos são ligados em paralelo, para que a subestação seja capaz de atender à carga-pico mesmo com a falha de um deles. Apesar de seguro, este critério implica em custos elevados do ponto de vista do arranjo das subestações [1], o que tem viabilizado a utilização de estoques de reservas. Neste caso, uma subestação de 2 (dois) transformadores, por exemplo, deve se tornar membro de um grupo que compartilha o mesmo estoque de reserva técnica, no lugar de adquirir um terceiro transformador.

A quantidade de equipamentos a serem disponibilizados nos estoques de reserva tem influência direta nos custos das empresas de energia, visto que uma reserva excessiva representa quase sempre um investimento desnecessário, enquanto a falta de equipamentos no estoque pode comprometer a confiabilidade do sistema e, com isso, aumentar os custos operacionais. [7]

O dimensionamento da reserva técnica de transformadores de potência de uma subestação (ou conjunto de subestações de uma região) é determinado pelo nível de confiabilidade requerido e pelos custos agregados à operação do sistema, como investimento na aquisição dos transformadores reservas, armazenamento e manutenção de equipamentos, interrupção do fornecimento de energia, além das multas previstas na legislação [2].


Neste tipo de análise, é necessário levar em conta que os transformadores de subestação têm custo muito maior que os usados na distribuição [3, 4]. Também, para a aquisição de um novo transformador ou o reparo de um equipamento avariado, deve-se considerar um período de reposição relativamente longo (entre 12 e 18 meses) [5].

A seção seguinte descreve duas possibilidades para a análise de confiabilidade de um grupo de subestações que compartilham um estoque de reservas. A primeira formulação, já apresentada em diversos trabalhos sobre este tema, aplica a distribuição de Poisson para o cálculo de probabilidades de sucesso e falha do sistema, enquanto a segunda formulação, proposta neste trabalho, permite a avaliação de vários indicadores de desempenho com base na representação de uma cadeia de Markov. [7]

### 3 – ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Equipamentos como os disjuntores, para raios, transformadores de instrumentos, religadores apresentam uma taxa de falha que varia ao longo de sua vida operativa (falhas não reparáveis). Na região de vida útil [6], a taxa de falha tende a ser constante, o que implica em tempos de funcionamento exponencialmente distribuídos. No que se refere aos transformadores de subestações, as falhas podem ser de dois tipos: (i) reparáveis no campo e (ii) não reparáveis no campo (catastróficas). Uma ação de reparo leva normalmente de 1 a 10 dias para a sua conclusão, sendo comparável ao tempo de instalação de um equipamento reserva (de 1 a 5 dias), porém muito menor que o tempo

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	13 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

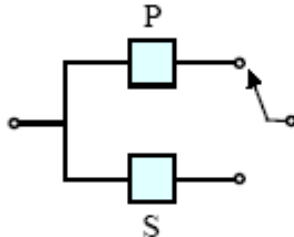
necessário para aquisição de um transformador novo (de 12 a 18 meses [1]). De uma maneira mais abrangente falhas reparáveis (i) podem ocorrer em fábrica (tempo de contratação e reparos até 12 meses). Assim, pode-se observar que a utilização do estoque está ligada às falhas do tipo (ii) não reparáveis no campo. Poderiam ser incluídas também as falhas de maior abrangência reparáveis nas oficinas (i).

### 3.1. Modelo Poisson

A distribuição de Poisson [6] permite calcular a probabilidade de um evento ocorrer um determinado número de vezes em um intervalo de tempo definido. A equação a seguir apresenta a probabilidade de um equipamento com taxa de falha  $\lambda$  falhar  $x$  vezes em um intervalo de tempo  $t$ :

$$P_x(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^x}{x!} . \quad (1)$$

Esta distribuição de probabilidades pode ser utilizada no cálculo de confiabilidade de sistemas do tipo *standby*, como o ilustrado na Fig. 1.



**Figura 1 – Sistema com 1 componente principal e 1 componente de reserva**


Neste modelo, admite-se que após a falha do componente principal (P), o componente reserva (S) entra em operação imediatamente. A confiabilidade de um sistema para um instante  $t$  futuro corresponde à probabilidade deste sistema estar operando em  $t$ . Para se calcular a confiabilidade, deve-se somar as probabilidades dos eventos em que o sistema funciona. Assim, considerando o sistema da Figura 1, tem-se

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) \quad (2)$$

onde  $P_0(t)$  e  $P_1(t)$  representam, respectivamente, a probabilidade de ocorrer 0 e 1 falha no período de tempo  $t$ . Combinando (1) e (2), tem-se

$$R(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t) . \quad (3)$$

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	14 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Generalizando para N transformadores principais e n reservas [6], então,

$$R(t) = e^{-N\lambda t} \sum_{k=0}^n \frac{(N\lambda t)^k}{k!} \quad (4)$$

Como pode ser verificado, a confiabilidade aumenta com o número de reservas, mas a cada equipamento adicionado ao estoque, o acréscimo em  $R(t)$  é menor devido ao rápido crescimento do denominador de cada parcela.

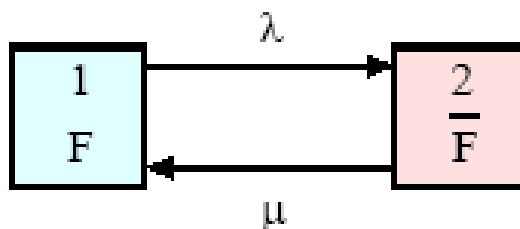
Note ainda que tal comportamento não é observado com relação ao custo de investimento, reforçando a necessidade de um dimensionamento adequado do número de reservas.

Em sistemas que possuem estoques de reservas, a caracterização *standby* é possível desde que a substituição do componente principal (que sofreu a avaria) por um reserva seja feita em um tempo relativamente pequeno se comparado ao tempo médio de funcionamento, o que é particularmente verdadeiro no caso dos transformadores de subestações.

## 3.2. Modelo Markov

### 3.2.1. Representação por Espaço de Estados


A representação por espaço de estados permite o cálculo das probabilidades instantâneas de funcionamento e falha dos transformadores. O modelo da Figura 2 é utilizado para representar um transformador em dois possíveis estados: (1) em funcionamento (designado por F) e (2) avariado (designado por  $\bar{F}$ ).



**Figura 2 – Modelo do transformador de potência de subestação**

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	15 de 41



 <i>Interno</i>	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Neste modelo,  $\lambda$  representa a taxa de falha (relativa aos defeitos não-reparáveis no campo) e  $\mu$  corresponde à taxa de reposição de um transformador avariado, isto é, o inverso do tempo médio para a aquisição de um transformador novo para recompor o estoque. Admite-se, por simplicidade, que os tempos de reposição de um transformador são distribuídos exponencialmente.

O modelo da Figura 2 pode ser utilizado para representar um sistema formado por um único transformador que não possui equipamentos reservas. No entanto, para se representar um sistema de N transformadores no campo e n reservas, deve-se montar o espaço de estados do sistema, como esquematizado na Figura 3. De acordo com a representação, é indicado em cada estado (da esquerda para a direita) o número de transformadores em operação no campo e o número de reservas disponíveis no estoque.

Pode ser constatado que existem (n+N+1) estados, dos quais (n+1) são estados de sucesso (onde há N transformadores em operação) e N são estados de falha (onde o número de transformadores em operação é menor que N, isto é, existe um déficit de transformadores no campo).

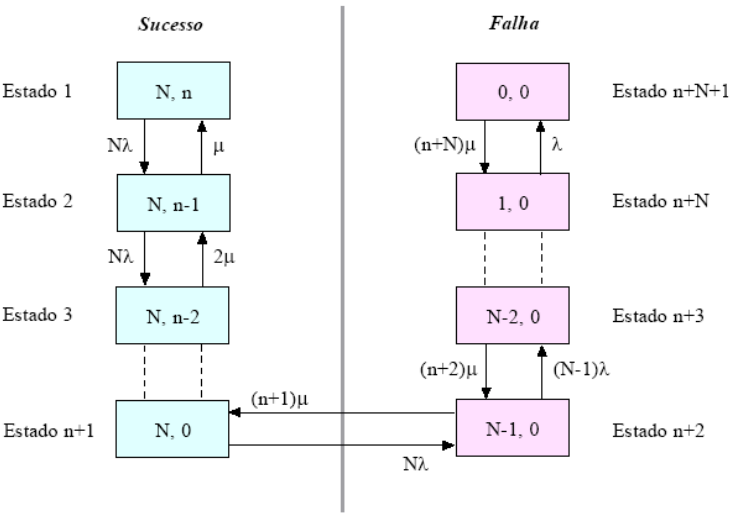



Figura 3 – Espaço de estados do sistema

3.2.2. Cálculo de Probabilidades

As probabilidades dos estados em cada instante t obedecem ao seguinte sistema de equações diferenciais, escrito em forma matricial [6]:

$$\dot{P}(t) = P(t) \times A \tag{5}$$



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

... onde o número de equações é  $n_e$ :

$$n_e = n + N + 1. \quad (6)$$

No sistema (5),  $P(t)$  é o vetor ( $1 \times n_e$ ) das probabilidades instantâneas dos estados e  $A$  é a matriz estocástica ( $n_e \times n_e$ ) das taxas de transição, construída por inspeção do espaço de estados, usando:

$$A_{ij} = \lambda_{ij} \quad \text{e} \quad A_{ii} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_e} \lambda_{ij}. \quad (7)$$

Neste caso,  $\lambda_{ij}$  é a taxa de transição entre os estados  $i$  e  $j$ . As probabilidades podem ser calculadas numericamente em tempo discreto (com  $\Delta t$  suficientemente pequeno), a partir do instante inicial ( $t = 0$ ) onde as probabilidades são conhecidas, usando o seguinte processo iterativo:

$$P(t + \Delta t) = P(t) \times P. \quad (8)$$

Em geral, admite-se como condição inicial o estado 1, onde existem  $N$  transformadores em operação no campo e  $n$  reservas disponíveis no estoque:

$$P(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$


A matriz de probabilidades de transição [6] é calculada em função da matriz estocástica de taxas de transição pela relação

$$P = \Delta t \times A + I \quad (10)$$

... onde  $I$  é a matriz identidade da mesma dimensão de  $A$ . Para calcular as probabilidades instantâneas, utiliza-se (8) recursivamente de  $\Delta t$  em  $\Delta t$  até o instante  $t$  desejado. Assim, a confiabilidade do sistema para o instante  $t$  corresponde à soma das probabilidades dos estados de sucesso, i.e. do estado 1 ao estado  $n+1$ , conforme ilustrado na Fig. 3. Matematicamente tem-se a confiabilidade  $R$  descrita abaixo.

$$R(t) = \sum_{k=1}^{n+1} P_k(t). \quad (11)$$

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	17 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

### 3.2.3. Indicadores de Confiabilidade Complementares

Além da confiabilidade para um instante desejado, é possível calcular indicadores de frequência e duração, obtidos a partir das probabilidades estacionárias [6]. Na região estacionária, as probabilidades ficam constantes, de modo que em (5), os elementos do vetor de derivadas tornam-se nulos, resultando no seguinte sistema linear de equações algébricas (em forma matricial):

$$0 = PS \times A. \quad (12)$$

Como a matriz A é singular por construção, o sistema (12) é indeterminado. Assim, para se determinar as probabilidades estacionárias, é preciso substituir qualquer equação por:

$$PS_1 + PS_2 + \dots + PS_{n_e} = 1 \quad (13)$$

... de modo a fazer com que o sistema resultante tenha uma única solução possível. A confiabilidade na região estacionária corresponde à soma das probabilidades estacionárias dos estados de sucesso e representa a probabilidade de se encontrar o sistema em funcionamento em qualquer instante futuro:

$$R = \sum_{i=1}^{n+1} PS_i. \quad (14)$$

O risco de falha é dado por

$$P_{falha} = 1 - R. \quad (15)$$

Contudo, a indisponibilidade do sistema (expressa em horas de interrupção por ano) é um indicador de mais fácil interpretação numérica, sendo calculada por:


$$U = P_{falha} \times 8760. \quad (16)$$

Para o cálculo da frequência e da duração média das falhas do sistema, tem-se [6]:

$$F_{falha} = PS_{n+1} \times N\lambda = PS_{n+2} \times (n+1)\mu \quad (17)$$

$$D_{falha} = \frac{P_{falha}}{F_{falha}}. \quad (18)$$

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	18 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

Pode-se ainda determinar os índices MTTF (*Mean time to failure* – tempo médio até a falha) e MTBF (*Mean time between failures* – tempo médio entre falhas) fazendo:

$$MTTF = \frac{R}{F_{falha}} \quad (19)$$

$$MTBF = \frac{1}{F_{falha}}. \quad (20)$$

### 3.3. Sistema-Teste

Considere um conjunto de subestações que totalizam 132 transformadores de 72–25 kV, 16 MVA [1], com taxa de falha individual de 0,011 falhas por ano e tempo médio de 1 ano para que um transformador avariado seja reparado ou um novo transformador seja adquirido.

Admitindo o modelo Poisson com  $N = 132$ ,  $\lambda = 0,011$  e, por exemplo,  $n = 5$  e  $t = 1$  ano, tem-se:

$$R(1) = 0,996185. \quad (21)$$

Logo, o risco de falha do sistema para o período de 1 ano vale  $1 - 0,996185 = 0,003815$ , que corresponde à probabilidade do sistema ter mais de 5 transformadores falhados no período de interesse, sendo que no início do mesmo, o estoque contava com 5 transformadores reservas.


Ao aplicar o modelo Markov com os mesmos parâmetros (lembrando que neste caso  $\mu = 1$  reposição por ano) tem-se, por (8):

$$R(1) = 0,999620. \quad (22)$$

A diferença entre os valores de confiabilidade em (21) e (22) se deve ao fato de que no modelo Markov, existe a possibilidade de que durante o período de interesse, i.e. 1 ano, o estoque possa ser repostado pelo reparo ou a aquisição de um ou mais novos transformadores, o que é refletido na taxa de reposição (que neste sistema é  $\mu = 1$  reposição por ano).

Refazendo-se os cálculos com  $\mu = 0$  (para eliminar a possibilidade de reparos durante o período de interesse) chega-se a uma confiabilidade de 0,996185, idêntica à obtida pelo modelo Poisson. Deste modo, é possível concluir que o modelo Poisson é um caso particular do modelo Markov, quando a taxa de reposição é feita igual a zero.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	19 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Variando-se o número de transformadores reservas no estoque, obtêm-se, pelo modelo Poisson, os valores de confiabilidade apresentados na Tabela I. Observe que a cada reserva adicionada ao estoque, a confiabilidade sofre um incremento menor, como já havia sido mencionado anteriormente.

TAB. I: EFEITO DO NÚMERO DE RESERVAS – MODELO POISSON

n	R(t)	Acréscimo em R(t)
1	0,574017	-
2	0,820796	0,246779
3	0,940237	0,119441
4	0,983594	0,043357
5	0,996185	0,012591
6	0,999232	0,003047
7	0,999864	0,000632
8	0,999978	0,000114
9	0,999997	0,000019
10	1,000000	0,000003

A aplicação do modelo Markov ao sistema-teste, com a variação do número de reservas implica nos índices de confiabilidade apresentados na Tabela II.


TAB. II: ÍNDICES DE CONFIABILIDADE – MODELO MARKOV

n	Confiabilidade estacionária	Indisponibilidade do sistema (h/a)	Frequência Média das Falhas (f/a)	Duração Média das Falhas (d)	MTBF (a)
1	0,575610	3717,66	0,4949	312,98	2,02
2	0,821460	1564,01	0,3586	181,72	2,79
3	0,940430	521,83	0,1735	125,35	5,76
4	0,983640	143,31	0,0630	94,86	15,88
5	0,996190	33,38	0,0183	76,01	54,70
6	0,999230	6,75	0,0044	63,27	226,03
7	0,999860	1,23	0,0009	54,13	1089,70
8	0,999980	0,18	0,0002	47,26	6003,70
9	1,000000	0,00	0,0000	41,92	37213,00
10	1,000000	0,00	0,0000	37,65	256290,00

#### 4. DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DA RESERVA

As aplicações anteriores mostraram o efeito do número de reservas sobre o nível de confiabilidade de um sistema. No entanto, é preciso determinar até que ponto é viável aumentar a confiabilidade. Nesta seção, analisa-se o dimensionamento ótimo dos estoques considerando aspectos técnicos e econômicos.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	20 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

#### 4.1. Estimativas de Custos

De um modo geral, o dimensionamento do estoque é feito com base em uma solução de compromisso entre o custo de investimento na aquisição do estoque (compra dos equipamentos reservas) e o custo de operação do sistema, que inclui não-faturamento, interrupção de consumidores, penalidades previstas em lei, etc. O custo anual de investimento pode ser calculado de forma sintética por (Custo<sub>inv</sub>):

$$\text{Custo}_{\text{inv}} = n \times C_T \times \text{FVA} \quad (23)$$

... onde  $n$  é o número de transformadores reservas a serem utilizados no estoque;  $C_T$  é custo de aquisição de um transformador novo em \$ e FVA é o fator para conversão de valor presente em anual, utilizando uma taxa de juros  $j$  e um período de  $n_p$  anos, sendo calculado por (FVA):

$$\text{FVA} = \frac{j \times (1 + j)^{n_p}}{(1 + j)^{n_p} - 1} \quad (24)$$

Por simplicidade, este trabalho considera o custo de operação composto pela soma entre os custos de interrupção e não-faturamento, podendo ser estimado por (Custo<sub>op</sub>):

$$\text{Custo}_{\text{op}} = (C_E + C_I) \times \text{EENS} \quad (25)$$

... onde  $C_E$  é o preço de venda da energia em \$/MWh;  $C_I$  é o valor utilizado para representar do custo unitário de interrupção dos consumidores em \$/MWh e EENS (*expected energy not supplied* – energia esperada não suprida) é o índice que corresponde ao valor médio da energia não suprida por ano. Neste caso, se um único transformador permanecer indisponível no campo durante 1 ano, i.e. 8760 horas, o sistema deixará de fornecer um montante de energia aproximadamente igual a 8760.


$$\text{ENS}_u = S_N \times \text{FP} \times \text{FC} \times 8760 \quad (26)$$

... onde  $S_N$  é a potência nominal individual dos transformadores em MVA; FP é o fator de potência da carga e FC é o fator de carregamento médio dos transformadores. A equação (26) permite estimar, em base anual, a energia não fornecida por transformador fora de operação no campo. Note que o número de transformadores indisponíveis, designado por ND, é uma variável aleatória que pode assumir valores entre 0 (nenhum transformador avariado) e N (todos os transformadores avariados). Assim, a EENS pode ser calculada como:

$$\text{EENS} = E(N_D) \times \text{ENS}_u \quad (27)$$

... onde  $E(ND)$  é o número médio de transformadores indisponíveis, cujo cálculo pode ser feito com base nos modelos Poisson e Markov, como detalhado a seguir.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	21 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

#### 4.1.1. Número Médio de Transformadores Indisponíveis – Modelo Poisson –

De acordo com a distribuição de Poisson, a probabilidade de ocorrerem exatamente  $x$  falhas de equipamentos (com taxa de falha  $\lambda$ ) durante um intervalo  $t$ , em um sistema de  $N$  componentes é dada por:

$$P_x(t) = \frac{e^{-N\lambda t} (N\lambda t)^x}{x!} \quad (28)$$

A probabilidade de haver  $m$  transformadores indisponíveis no campo é igual à probabilidade de ocorrerem  $(n+m)$  avarias de equipamentos, onde  $n$  é o número de reservas. Assim, pelo modelo Poisson, o número médio de transformadores indisponíveis:

$$E(N_D) = \sum_{m=0}^N m \times P(N_D = m) = \sum_{m=0}^N m \times \frac{e^{-N\lambda t} (N\lambda t)^{n+m}}{(n+m)!} \quad (29)$$

#### 4.1.2. Número Médio de Transformadores Indisponíveis – Modelo Markov –

O modelo Markov também pode ser usado para a estimativa de  $E(N_D)$ . Pela análise da Figura 3, conclui-se que o número de transformadores indisponíveis no sistema em cada estado  $i$ , isto é,  $N_D(i)$ , é dado pela diferença entre  $N$  (número necessário de transformadores no campo) e o número de transformadores efetivamente em operação. Assim, o número médio de transformadores indisponíveis é calculado por:


$$E(N_D) = \sum_{i=1}^{n+N+1} N_D(i) \times PS_i = \sum_{i=n+2}^{n+N+1} (i - n - 1) \times PS_i \quad (30)$$

... onde  $PS_i$  é a probabilidade estacionária do estado  $i$ .

#### 4.2. Critério de Otimização

A determinação do número ótimo de reservas é feita através da análise de diversas alternativas para a composição do estoque. Para cada possibilidade considerada, devem ser avaliados os indicadores de confiabilidade e os custos anuais esperados de interrupção e não-faturamento dentre outros. A estes custos, deve ser somado o valor anual do investimento na aquisição do estoque. Pode-se, portanto, adotar a alternativa de menor custo, desde que o nível de confiabilidade resultante seja considerado satisfatório.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	22 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

## 5. APLICACOES NUMERICAS

### 5.1. Avaliação Básica

A Tabela III apresenta o número médio de transformadores indisponíveis no campo para  $n$  (número de reservas) variando entre 1 e 10, considerando o sistema-teste [1] introduzido na Seção 2.3. Pode-se observar que para  $n \geq 3$  os modelos Poisson e Markov apresentam resultados muito próximos, tornando-se praticamente idênticos para  $n \geq 7$ . A diferença obtida para valores menores de  $n$  é justificada pelo fato deste modelo de Poisson admitir uma taxa de falha constante igual a  $N\lambda t$  para o sistema, que consiste em assumir que existam  $N$  transformadores continuamente em operação. Esta aproximação se torna melhor com o aumento do número de reservas, fazendo com que os resultados do modelo Poisson se aproximem dos obtidos pelo modelo de Markov.

Neste caso, observe que o modelo Markov considera adequadamente a variação da taxa de falha total do sistema com o número de transformadores em operação, que, conforme pode ser visto na Figura 3, é diferente para cada estado de falha.

TAB. III: NÚMERO MÉDIO DE TRANSFORMADORES INDISPONÍVEIS

n	Modelo Poisson	Modelo Markov
1	0,686102	0,679279
2	0,260119	0,257928
3	0,080915	0,080362
4	0,021151	0,021034
5	0,004745	0,004723
6	0,000930	0,000926
7	0,000161	0,000161
8	0,000025	0,000025
9	0,000004	0,000004
10	0,000000	0,000000


A Tabela IV apresenta os valores de EENS para o sistema-teste [1], onde o fator de carregamento médio dos transformadores é 0,5241 e o fator de potência médio da carga é 0,87. Para a determinação da energia não fornecida por transformador indisponível utilizou-se (26), resultando em:

$$ENS_u = 16 \times 0,87 \times 0,5241 \times 8760 = 63.908,33 \text{ MWh/(transformador-ano)} \quad (31)$$

Assim, com os números médios de transformadores indisponíveis apresentados na Tabela III é possível calcular, por (27), a EENS para cada caso através dos modelos Poisson e Markov.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	23 de 41



 <i>Interno</i>	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
	Transmissão Poisson	

TAB. IV: EENS DO SISTEMA (MWh/ANO)

n	Modelo Poisson	Modelo Markov
1	43847,64	43411,59
2	16623,77	16483,75
3	5171,14	5135,80
4	1351,73	1344,25
5	303,25	301,84
6	59,43	59,18
7	10,29	10,29
8	1,60	1,60
9	0,26	0,26
10	0,00	0,00

A Tabela V apresenta os custos esperados de investimento e operação do sistema. Para o cálculo do custo de investimento, admitiu-se que o preço para a aquisição de um transformador novo é de US\$ 350.000,00 a ser amortizado ao longo de sua vida útil de 70 anos a uma taxa de 15% ao ano. O custo de operação foi calculado com base na EENS obtida através do modelo Markov. Neste caso, foram considerados somente a tarifa de fornecimento da energia e o custo estimado de interrupção valem, respectivamente, 62,50 US\$/MWh e 10.760,00 US\$/MWh [1].


TAB. V: CUSTOS DO SISTEMA EM US\$/ANO

n	Investimento	Operação	Soma
1	52.502,96	469.821.638,16	469.874.141,12
2	105.005,92	178.402.560,65	178.507.566,58
3	157.508,88	55.582.434,66	55.739.943,54
4	210.011,84	14.547.883,19	14.757.895,03
5	262.514,80	3.266.810,81	3.529.325,61
6	315.017,76	640.578,56	955.596,32
7	367.520,72	111.293,46	478.814,18
<u>8</u>	<u>420.023,68</u>	<u>17.339,78</u>	<u>437.363,46</u>
9	472.526,64	2.447,09	474.973,73
10	525.029,60	315,47	525.345,07

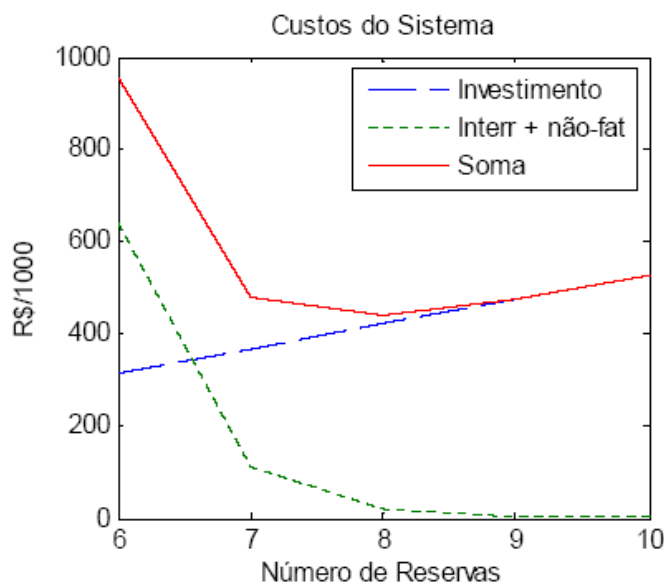
Pode-se observar que a soma entre os custos anuais de investimento e operação do sistema é mínima para  $n = 8$  transformadores reservas, o que também pode ser visto na Figura 4. O gráfico apresentado foi gerado por um programa para dimensionamento ótimo de estoques escrito em linguagem Matlab. Com um estoque de 8 (oito) transformadores, a indisponibilidade do sistema é de 0,18 horas por ano, a frequência de falhas vale 0,0002 f/ano e a duração média das falhas é de 47,26 dias, conforme resultados da Tabela II. Da Tabela IV, tem-se que a EENS vale aproximadamente 1,6 MWh/ano de modo que o custo

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	24 de 41



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

de investimento + operação seja de US\$ 437.363,46 por ano, o menor entre as alternativas analisadas, usando somente os custos indicados acima.



**Figura 4 – Custos do Sistema**

Observe na Figura 4 que para  $n > 9$ , o custo de operação torna-se desprezível, de modo que o custo total passa a ser formado apenas pelo custo de investimento, justificando o seu comportamento linear em relação ao número de equipamentos reservas.

Caso os índices de confiabilidade resultantes da utilização de 8 (oito) reservas estejam dentro de limites aceitáveis, o número ótimo de transformadores reservas deste sistema é realmente 8 (oito). Se, ao contrário, algum indicador estiver abaixo do nível desejado, devem ser adicionados mais equipamentos ao estoque até que a referida solicitação seja satisfeita. Neste caso, o ponto mais econômico não seria atingido.


## 5.2. Análise de Sensibilidade

Nesta seção, são realizadas análises de sensibilidade com a metodologia proposta a fim de verificar o efeito da variação de alguns parâmetros sobre o número ótimo de transformadores reservas. Todas as aplicações numéricas foram feitas utilizando o modelo Markov.

### 5.2.1. Efeitos da Taxa de Falha e Tempo de Aquisição de um Transformador Novo

Aumentando a taxa de falha dos transformadores do sistema-teste de 0,011 para 0,015 falhas por ano, tem-se que o número ótimo de transformadores sobe de 8 para 9. Neste

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	25 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

caso, um aumento no estoque é necessário para compensar a deterioração do nível de confiabilidade e o consequente aumento no custo anual de operação causado pela elevação da taxa de falha. Se o tempo necessário para a aquisição de um transformador novo fosse reduzido de 12 para 8 meses, o estoque ótimo se reduziria de 8 para 6 transformadores. A diminuição deste tempo causa uma melhora nos indicadores de confiabilidade e uma redução no custo de operação, que, por sua vez, viabiliza uma economia no investimento necessário para a formação do estoque. Dessa forma, pode-se concluir que o estoque ótimo é sensível aos dois parâmetros analisados.

### 5.2.2. Efeito do Número de Transformadores no Campo

O estoque ótimo apresenta certa robustez com relação ao número de transformadores no campo. Neste caso, pode-se mostrar que, de acordo com as condições estabelecidas para o sistema-teste, o número ótimo de reservas será de 8 unidades se o sistema tiver de 122 a 155 transformadores no campo. Esta característica é bastante interessante, uma vez que o crescimento do número de transformadores do sistema não exige que os estoques sejam incrementados imediatamente.

### 5.2.3. Compartilhamento de Estoques de Reserva


Na Seção 4.1, concluiu-se que o estoque ótimo para o sistema-teste de 132 transformadores no campo deve ter 8 (oito) reservas. Considere agora que um sistema vizinho tenha em operação 50 transformadores da mesma classe. Admitindo condições operativas semelhantes às do sistema-teste, como fator de potência da carga, percentual médio de carregamento, custo de interrupção e tarifa de fornecimento, obtém-se um estoque ótimo de 5 (cinco) transformadores reservas.

Se os dois sistemas operarem com estoques independentes serão necessários, no total,  $8 + 5 = 13$  transformadores reservas. No entanto, se os sistemas compartilhassem o mesmo estoque, o número ótimo de reservas seria igual a 9. Este valor foi obtido considerando-se um único sistema composto de  $132 + 50 = 182$  transformadores no campo. Portanto, o uso compartilhado de estoques promove uma redução no número necessário de reservas, podendo representar uma redução significativa nos custos de investimento das empresas. A Tabela VI ilustra os custos para este exemplo hipotético.

TAB. VI: CUSTOS DO SISTEMA EM US\$/ANO

Custo	Estoques Independentes			Estoque Compartilhado
	N = 132, n = 8	N = 50, n = 5	Soma	N = 182, n = 9
Investimento	420.023,68	262.514,80	682.538,48	472.526,64
Operação	17.339,78	17.957,06	35.296,84	39.231,33
Soma	437.363,46	280.471,86	717.835,32	511.757,97

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	26 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Da Tabela VI observa-se que a utilização do estoque conjunto resulta em um custo anual de operação de US\$ 39.231,33, ligeiramente superior à soma dos custos de operação dos sistemas independentes, i.e. US\$ 35.296,84. Por outro lado, o compartilhamento faz com que o número de reservas passe de 13 para 9, reduzindo o custo anual de investimento de US\$ 682.538,48 para US\$ 472.526,64. Assim, o custo total cai de US\$ 717.835,32 para US\$ 511.757,97 por ano.

Este exemplo ilustrou os benefícios do compartilhamento de estoques. Em situações reais envolvendo empresas diferentes é preciso definir, de forma clara, a contribuição de cada companhia para aquisição dos transformadores reservas. Além disso, o aspecto geográfico também deve ser levado em consideração, de modo que os equipamentos reservas estejam estrategicamente posicionados para que, em caso de necessidade, estes possam ser instalados no sistema o mais rapidamente possível.

## 6. CONCLUSOES

Este trabalho apresentou uma nova metodologia probabilística para o dimensionamento ótimo de estoques regionais de transformadores reservas para o atendimento de um grupo de subestações de distribuição de energia elétrica que utilizam o mesmo tipo de transformador. O método proposto se baseia na representação dos estados de uma cadeia de Markov para um sistema composto de transformadores em operação no campo que conta com um estoque de reservas, tendo sido implementado em um programa computacional em linguagem Matlab. Uma aplicação numérica com um sistema-teste ilustrou a utilização do método proposto, bem como uma comparação de resultados obtidos através de uma metodologia baseada na distribuição de Poisson, que como demonstrado, é um caso particular do modelo proposto quando a taxa de reposição do estoque é feita igual à zero, e, pode ser feita em Programa da Microsoft Excel.


Análises de sensibilidade mostraram que a metodologia apresentada é capaz de identificar o estoque de reserva ótimo, ponderando adequadamente parâmetros, como taxas de falha e reposição de estoques, para o uso somente de custos de operação do sistema e investimento na aquisição de novos equipamentos.

Um exemplo hipotético permitiu ainda verificar que o compartilhamento de estoques de equipamentos reservas é uma questão que merece ser avaliada, pois pode resultar em uma redução significativa dos custos de investimento das empresas de distribuição.

## 7 - BIBLIOGRAFIA

[1] Chowdhury, A. A. e Koval, D. O., "Development of Probabilistic Models for Computing Optimal Distribution Substation Spare Transformers", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, IEEE, 2005, pp.204-211.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	27 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

[2] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Nº 24, de 27 de Janeiro de 2000.

[3] Costa, J.G.C., Leite da Silva, A.M. e Oshiro, I.S.N., “Dimensionamento Ótimo de Transformadores de Subestações via Processos Estocásticos”, Congresso Brasileiro de Automática – CBA, Artigo No. 39499, 2008.

[4] Costa, J.G.C., Leite da Siva, A.M. “Monte Carlo Simulation to Assess the Optimum Number of Distribution Spare Transformers”, Proc. of the 10th PMAPS – Probabilistic Methods Applied to Power Systems, ID 061, 2008.

[5] Li, W., Vaahedi, E., Mansour, Y., “Determining Number and Timing of Substation Spare Transformers using a Probabilistic Cost Analysis Approach”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.

[6] Billinton, R., Allan, R. N. “Reliability Evaluation of Engineering Systems”, New York, Plenum, 1983.

### ANEXO III – APLICAÇÃO DO CONCEITO SOBRE DIMENSIONAMENTO DE RESERVA TECNICA (EXEMPLO: TRANSFORMADORES DE SUBESTACOES)

(Planilha Excel: Dimensionamento Reserva Poisson \_ OT \_ V1 040915.xls)


#### 1 – OBJETIVO

Apresentar a aplicação de conceitos de dimensionamento de reserva técnica de transformadores de potência de subestações utilizando como base primeiramente a Distribuição de Poisson até que o conceito de cadeias de Markov relacionadas a processos estocásticos estejam desenvolvidos e sedimentados na empresa. A distribuição de Poisson é um caso particular do modelo de Markov quando se utiliza inicialmente a reposição nula.

#### 2 – CONCEITOS E METODOLOGIA

Os conceitos e metodologias adotadas com maiores detalhamentos constam do Anexo II ao presente documento e das referencias [1], [2], [3], que culminou no Relatório Técnico pertinente [4]. A referência [5] apresenta um critério para definição de confiabilidade mínima desejada calculada no Anexo IV.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	28 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

### 3 – CONDIÇÕES DE CONTORNO

Devido a utilização de uma linguagem conhecida de fácil aplicação para os usuários, existe uma limitação preliminar para estudos de famílias de transformadores de potência compostas de 350 (taxa de falhas média de até 2% ao ano), resultando em uma necessidade de reserva de até 100 unidades (abordagem confiabilidade) e de reserva de até 20 unidades (abordagem econômica e financeira) nesta primeira versão que deverá ser útil para as empresas do Grupo CPFL Energia. Devido a diferenças de aplicação e utilização de transformadores e suas consequências, conceitos desta natureza podem não ser válidos para empresas de geração (geradoras) e transmissão de energia (transmissoras). Para os demais equipamentos (para raios, religadores, transformadores de instrumentos, etc.), como a abordagem é de confiabilidade, a limitação é da ordem de famílias com até 550 / 350 unidades referentes a taxa de falhas média até 2% ao ano / taxa de falhas média até 3% ao ano.

### 4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA – CASO 1 –


Dentre as famílias de transformadores existentes em operação foi escolhido um conjunto de subestações que totaliza 128 (cento e vinte e oito) transformadores de potência de 20MVA a 25 MVA sistema de resfriamento ONAN/ONAF/ONAF; 138-13,8/11,95kV, comutador sem tensão CST na alta e religação na baixa tensão, com taxa de falha individual média de 0,010 (1%) por ano e tempo médio de 1 ano para que um transformador avariado seja reparado ou um novo transformador seja adquirido. A confiabilidade mínima deve ser de 99,5% definida em [5], tempo médio entre falhas e o ciclo de vida da reserva deve ser maior do que a vida útil contábil (40 anos) deste tipo de equipamento. A ideia é calcular o melhor dimensionamento de reserva técnica para esta família, do ponto de vista técnico-econômico e de confiabilidade.

#### 4.1 – Entrada de Dados

##### 4.1.1 – Abordagem Confiabilidade:

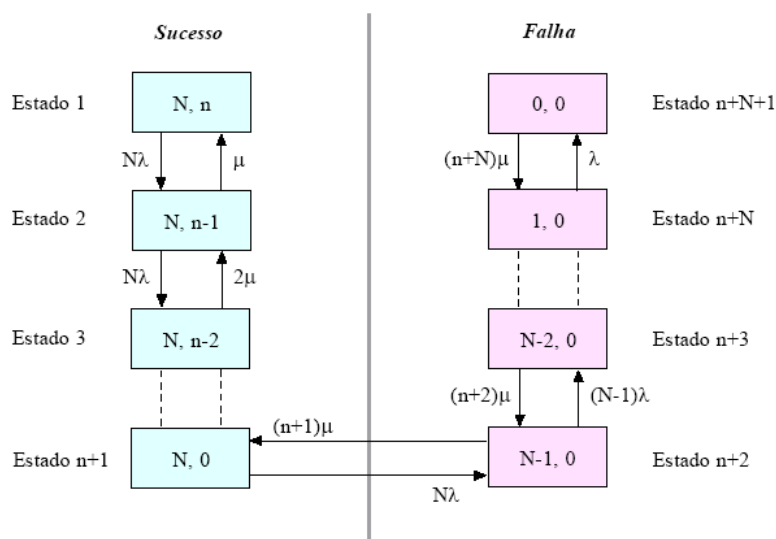
- Quantidade de transformadores da família.....128
- Taxa média de falhas por ano da família.....0,010 (1%)
- Tempo de análise em anos.....1
- Tempo de reposição ou aquisição em anos .....1
- Confiabilidade adotada ..... > 99,5%
- Ciclo mínimo de reserva (indisponíveis) em anos.....> 40
- Tempo médio entre falhas em anos .....>40
- Quantidade inicial de transformadores na reserva...1 até 10

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	29 de 41

 <i>Interno</i>	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

#### 4.1.2 – Abordagem Econômica - Financeira:

- Potência nominal adotada em MVA.....25
- Custo de um transformador novo em US\$ .....800mil
- Fator de carregamento típico da família.....0,70
- Fator de potência típica da família .....0,90
- Tempo de operação anual em horas .....8760
- Taxa de retorno de capital ao ano .....15%
- Tempo total de análise econômica em anos..... 40
- Preço da energia vendida em US\$ por MWh..... 60
- Custo da energia não fornecida US\$ por MWh ..... 20mil
- Quantidade inicial de transformadores na reserva.1 até 10




## 4.2 – Saída de Dados

### 4.2.1 – Abordagem da Confiabilidade:

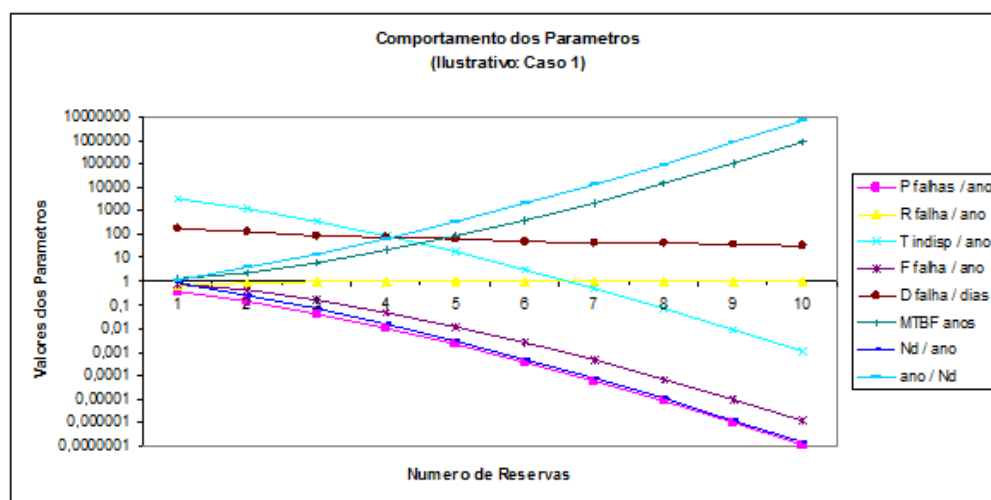
- Número de transformadores na reserva ..... 5
- Confiabilidade da família de transformadores ..... 0,9979
- Risco de falha da família de transformadores ..... 0,0021
- Tempo de indisponibilidade em horas por ano ... 18,104
- Ciclo de indisponibilidade por ano ..... 0,0025
- Tempo do ciclo de indisponibilidade em anos.....399,67

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	30 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Para a abordagem de confiabilidade nas condições pré-estabelecidas, os resultados indicam necessidade de no mínimo 5 (cinco) transformadores de reserva.

Aspectos de Confiabilidade								
n	P falha	Confiab	Indispon	F falha	D falha	MTBF	Nd / ano	ano/Nd
1	0,366074955	0,633925	3206,816606				0,5580373	1,791994906
2	0,138306798	0,861693	1211,567554				0,191962345	5,209354978
3	0,041125718	0,958874	360,2612924				0,053655547	18,637402
4	0,010027773	0,989972	87,84328865				0,012529829	79,80955056
5	0,002066699	0,997933	18,10427968				0,002502056	399,671301
6	0,000368336	0,999632	3,226624433				0,000435357	2296,963026
7	5,77784E-05	0,999942	0,506138902				6,70213E-05	14920,62028
8	8,08918E-06	0,999992	0,070861217				9,24293E-06	108190,8139
9	1,02227E-06	0,999999	0,008955058				1,15375E-06	866739,7622
10	1,17702E-07	1	0,001031069				1,31482E-07	7605603,824




#### 4.2.2 – Abordagem Econômica - Financeira

- Número de transformadores na reserva ..... 8
- Custo do investimento em US\$..... 963,597
- Custo operacional em US\$..... 25,581
- Custo total em US\$ ..... 989,178

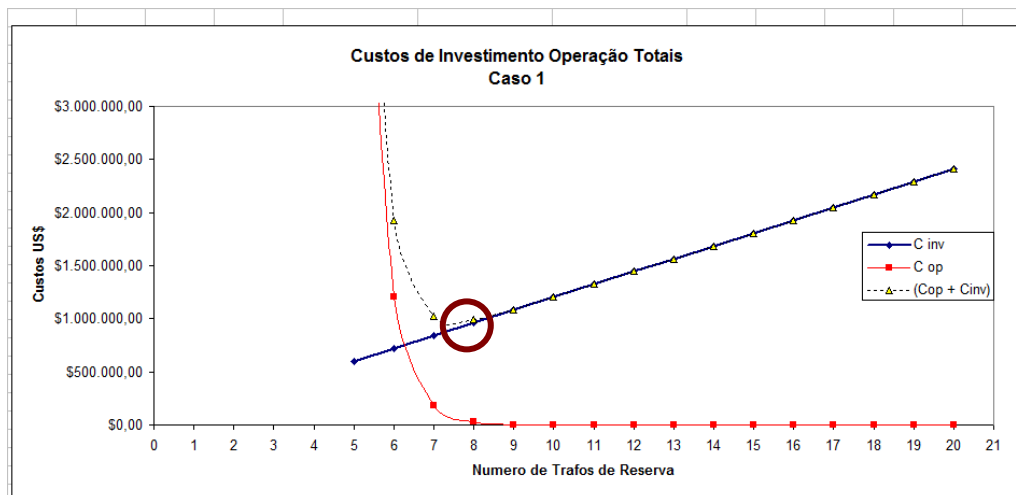
Para a abordagem econômico-financeira nas condições pré-estabelecidas, os resultados indicam necessidade de 8 (oito) transformadores de reserva.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	31 de 41



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Custos do Sistema (US\$ / Ano)			
n	Investimento	Operação	Soma
1	\$120.449,67	\$1.544.467.671,25	\$1.544.588.120,92
2	\$240.899,34	\$531.289.998,82	\$531.530.898,16
3	\$361.349,00	\$148.501.287,88	\$148.862.636,89
4	\$481.798,67	\$34.678.533,84	\$35.160.332,51
5	\$602.248,34	\$6.924.886,01	\$7.527.134,35
6	\$722.698,01	\$1.204.929,36	\$1.927.627,37
7	\$843.147,68	\$185.493,51	\$1.028.641,18
8	\$963.597,34	\$25.581,45	\$989.178,80
9	\$1.084.047,01	\$3.193,21	\$1.087.240,22
10	\$1.204.496,68	\$363,90	\$1.204.860,58



### 4.3 - Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Processo


Os valores apontados como de melhor estoque de reserva são sensíveis a variações dos principais parâmetros, tais como taxa de falhas, tempo de aquisição, número de transformadores da família, etc. Abaixo são apresentados os principais efeitos.

#### 4.3.1. Efeitos da Taxa de Falha e Tempo de Aquisição de um Transformador Novo

Aumentando a taxa de falhas dos transformadores do sistema-teste de 0,01 para 0,02 por ano, tem-se que o número ótimo de transformadores na reserva sobe de 8 (oito) para 11 (onze). Neste caso, um aumento no estoque é necessário para compensar a deterioração do nível de confiabilidade e o consequente aumento no custo anual de operação causado pela elevação da taxa de falha.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	32 de 41



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Se o tempo necessário para a aquisição de um transformador novo fosse reduzido de 12 para 8 meses, o estoque ótimo se reduziria de 8 (oito) para 7 (sete) transformadores. A diminuição deste tempo causa uma melhora nos indicadores de confiabilidade e uma redução no custo de operação, que, por sua vez, viabiliza uma economia no investimento necessário para a formação do estoque.

#### 4.3.2. Efeito do Número de Transformadores no Campo

O estoque ótimo apresenta robustez com relação ao número de transformadores no campo. Neste caso, pode-se demonstrar que, de acordo com as condições estabelecidas para o sistema-teste, o número ótimo de reservas será de 8 (oito) unidades se o sistema tiver de 123 a 146 transformadores no campo. Esta característica é bastante interessante, uma vez que o crescimento do número de transformadores do sistema não exige que os estoques sejam incrementados imediatamente, podendo ter sua aquisição planejada.

#### 4.3.3. Efeito do Compartilhamento de Estoques de Reserva

Considerando que as reservas calculadas levam em conta as famílias de transformadores de potência de subestações, o compartilhamento de estoque encontra-se devidamente incorporado a esta solução.

## 5 – CONCLUSÕES


Este trabalho apresentou a aplicação de uma metodologia probabilística para o dimensionamento de estoques de transformadores reservas para o atendimento de um grupo de subestações de distribuição de energia elétrica que utilizam o mesmo tipo de transformador.

O método adotado se baseia na representação da distribuição de Poisson (caso particular dos estados de uma cadeia de Markov) para um sistema composto de transformadores em operação no campo que conta com um estoque de reservas, tendo sido implantado em um programa computacional em linguagem Excel, até que o conceito mestre de Cadeias de Markov seja sedimentado. Como pode ser observado no Anexo II existe perfeita aderência nos resultados.

Uma aplicação numérica com um sistema-teste (Caso 1) ilustrou a utilização do método proposto de distribuição de Poisson, bem como uma comparação de resultados obtidos.

Análises de sensibilidade mostraram que a metodologia apresentada é capaz de identificar o estoque de reserva ótimo, ponderando adequadamente parâmetros, como taxas de falha e reposição de estoques, utilizando custos de operação do sistema e investimento na aquisição de novos equipamentos.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	33 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Para as características e condições do sistema indicado, o melhor dimensionamento sob o ponto de vista confiabilidade é de no mínimo 5 (cinco) unidades e sob o aspecto econômico-financeiro é de 8 (oito) unidades. Este valor de 8 (oito) transformadores de reserva é válido ainda que a taxa de falhas evolua até 0,012 ou a quantidade da família aumente para 146 transformadores de potência.

Não menos importante é a necessidade de fazer um balanço para definição de unidades em excesso ou faltantes na reserva técnica, uma vez que existe a possibilidade de existirem unidades fisicamente na reserva, em reforma nas oficinas ou utilizadas em arranjos provisórios e que retornarão para a reserva técnica.

Supondo (-P) a solução encontrada pelo modelo de Poisson, (+Y) unidades fisicamente em boas condições na reserva, (+H) unidades em reparos nas oficinas, (+K) unidades em arranjos provisórios e (-R) unidades para futuros arranjos provisórios, temos:

$$C = Y + H + K - P - R.$$

Para C negativo devem ser comprados equipamentos da família e para C positivo existe um excesso de unidades na reserva técnica para providências cabíveis (redirecionamento em obras não provisórias, junção com demais famílias afins, sucateamento, etc.).


## 6 – PLANILHA DE CÁLCULO

A Planilha Excel intitulada “Dimensionamento da Reserva Técnica Poisson V1 040915.xls”, possui várias abas de cálculo e uma dela é a principal em azul claro contendo a entrada de dados principais (coluna F linhas 7 até 21) para o desenvolvimento de cálculo e apresentação de resultados em forma analítica (colunas G43/44 & F linhas 27 a 34, bem como colunas M43/44 & L linhas de 35 a 41) e em forma de gráficos (colunas O até AD linhas 5 a 45, bem como colunas AF até AU linhas 5 a 45), como no exemplo abaixo.

### Entrada de Dados - Transformador de Potência: Abordagens Confiabilidade e Econômica

- Quantidade de transformadores da família.....128
- Potência nominal adotada em MVA.....25
- Taxa média de falhas por ano da família.....0,010 (1%)
- Tempo de análise em anos.....1
- Tempo de reposição ou aquisição em anos .....1
- Quantidade inicial de transformadores na reserva....1
- Custo de um transformador novo em US\$ .....800mil
- Taxa de retorno de capital ao ano .....15%
- Tempo total de análise econômica em anos..... 40
- Preço da energia vendida em US\$ por MWh..... 60

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	34 de 41

 <i>Interno</i>	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

- Custo da energia não fornecida US\$ por MWh.....20mil
- Fator de potência típica da família .....0,90
- Fator de carregamento típico da família.....0,70
- Tempo de operação anual em horas .....8760

#### Condições de Contorno:

- Confiabilidade adotada ..... > 99,5%
- Ciclo mínimo de reserva (indisponíveis) em anos.....> 40
- Tempo médio entre falhas em anos .....>40


Observação: Como é possível acompanhar a seguir pela entrada, cálculos e saída de dados (abordagem da confiabilidade e abordagem econômico-financeira), as condições de contorno estabelecidas foram atendidas.

Entrada de Dados	Código	Informar	Dimensão
Numero de eqtos em operação	N	128	unidades
Potencia nominal *	Sn	25	MVA
Tensão da alta e baixa tensão	Vn	138	kV
Taxa de falhas média ano da família	Tf	0,01	%/100
Numero de eqtos reserva	n	1	unidades
Periodo de estudo	t	1	anos
Tempo de reposição ou aquisição	mi	1	anos
Custo do equipamento novo	Ct	800000	US\$
Taxa de retorno de capital anual *	j	15%	%
Periodo de análise economica *	p	40	anos
Preço de venda de energia *	Ce	60	US\$/MWh
Custo da interrupção de energia consumidor *	Ci	20000	US\$/MWh
Fator de potencia *	Fp	0,9	%/100
Fator de carregamento *	Fc	0,7	%/100
Tempo em operação	Toper	8760	horas

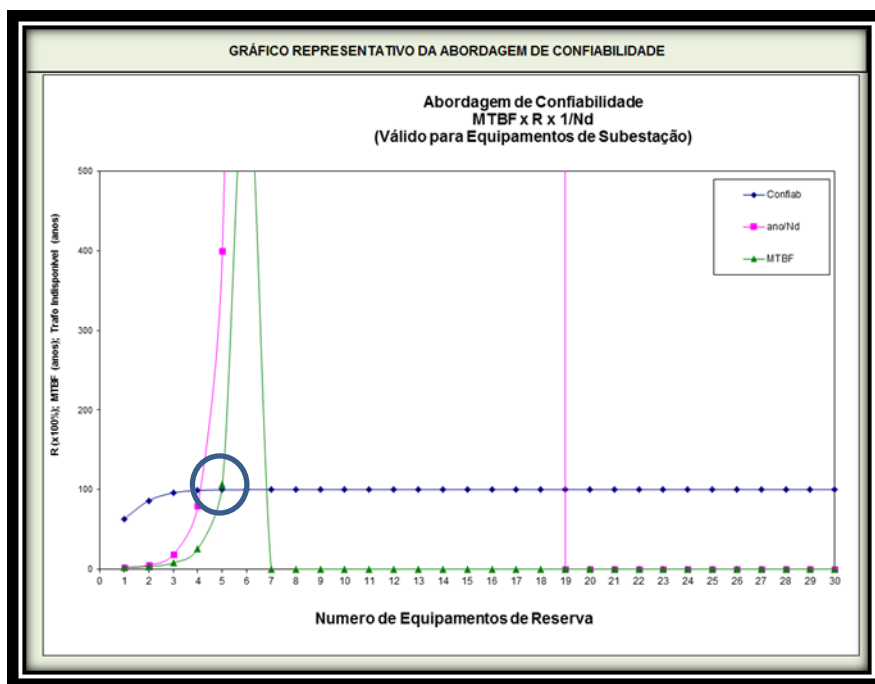
#### Saída de Dados 1 - Transformador de Potência: Abordagem Confiabilidade

- Número de transformadores na reserva ..... 5
- Confiabilidade da família de transformadores ..... 0,9979
- Risco de falha da família de transformadores ..... 0,0021
- Tempo de indisponibilidade em horas por ano ... 18,104
- Ciclo de indisponibilidade por ano ..... 0,0025
- Tempo do ciclo de indisponibilidade em anos.....399,67


N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	35 de 41

 Interno	Tipo de Documento: <b>Relatório Técnico</b>
	Área de Aplicação: <b>Engenharia de Normas e Padrões</b>
	Título do Documento: <b>Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson</b>

Saída - Abordagem Confiabilidade	Código	Resultados	Dimensão
Confiabilidade média anual	R	99,7933	%
Risco de falha médio anual	Pf	0,2067	%
Indisponibilidade média anual	U	18,1043	horas
Frequência de falhas média ano	Ff	0,0094	unidades
Duração média das falhas	Df	80,3084	dias
Período entre falhas	T	106,4612	anos
Eqts indisponíveis	Nd	0,0025	unidades
Ciclo da reserva	1/Nd	399,6713	anos
Numero médio de eqts indisponíveis	END		unidades
Energia não fornecida por trafo indisponível *	ENSU		MWh
Energia esperada não suprida *	EENS		MWh
Fator de retorno de capital *	FRC		[ ]
Custo de investimento *	Cinve		US\$
Custo de operação *	Coper		US\$
Custo total de investimento e operação *	Ctotal		US\$
QDE ESTIMADA DE EQTS DE RESERVA			5



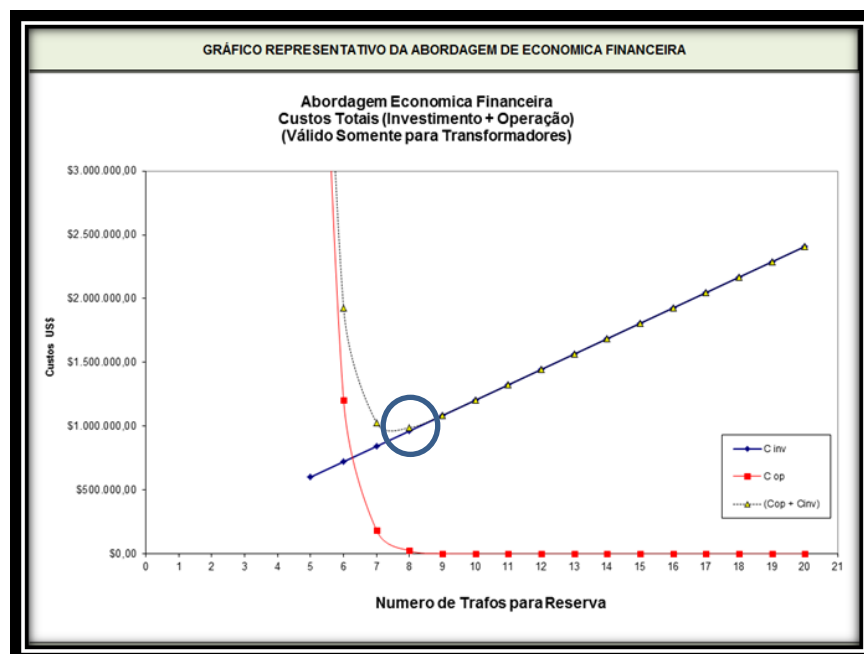
N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	36 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

### Saída de Dados 2 - Transformador de Potência: Abordagem Econômico-Financeira


- Número de transformadores na reserva ..... 8
- Custo do investimento em US\$..... 963,597
- Custo operacional em US\$.....25,581
- Custo total em US\$ ..... 989,178

Saída - Abordagem Econômica	Código	Resultados	Dimensão
Confiabilidade média anual	R		%/100
Risco de falha médio anual	Pf		%/100
Indisponibilidade média anual	U		horas
Frequência de falhas média ano	Ff		unidades
Duração média das falhas	Df		dias
Período entre falhas	T		anos
Eqts indisponíveis	Nd		unidades
Ciclo da reserva	1/Nd		anos
Numero médio de eqts indisponíveis	END	0,0000	unidades
Energia não fornecida por trafo indisponível	ENSU	137.970,0000	MWh
Energia esperada não suprida *	EENS	1,2752	MWh
Fator de retorno de capital *	FRC	0,1506	[ ]
Custo de investimento *	Cinv	\$963.597,34	US\$
Custo de operação *	Coper	\$25.581,45	US\$
Custo total de investimento e operação *	Ctotal	\$989.178,80	US\$
QDE ESTIMADA DE TRAFOS RESERVA			8



N. Documento: Categoria: Versão: Aprovado por: Data Publicação: Página:

16616 Instrução 1.1 JOSE CARLOS PINOTO BUENO 11/10/2022 37 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson

Finalmente a interpretação completa deste exemplo é a seguinte:

Para a família de equipamentos em operação analisados, do tipo reparáveis em fábrica (Transformadores de Potencia de 20MVA a 25 MVA sistema de resfriamento ONAN/ONAF/ONAF; 138-13,8/11,95 kV, comutador sem tensão CDST na alta e religação na baixa tensão, operação normal sem evolução de gases combustíveis, etc.), taxa de falhas média de 1% ao ano, tempo médio de reparos 1 ano, tempo médio de aquisição 1 ano, vida útil da ordem de 40 anos, a quantidade necessária para a reserva visando manter a confiabilidade média da subestação > 99,5% é de no mínimo de 5 unidades, denominada (P).

Caso existam unidades fisicamente na reserva em boas condições (Y), em reparos nas oficinas que retornarão para reserva (H), usadas em arranjos provisórios (K) em obras que retornarão para a reserva ou necessárias para arranjos provisórios futuros (R), deve ser feita a seguinte provisão (C) para adequação da reserva técnica:  $C = Y + H + K - P - R$ .

O resultado negativo indica a necessidade de aquisição de transformadores da família e um número positivo indica excesso de unidades na reserva técnica para providências cabíveis (redirecionamento em obras não provisórias, junção com demais famílias afins para otimizar reserva, sucateamento, etc.).

$$C = Y + H + K - P - R$$

$$C = 1 + 1 + 0 - 5 - 0$$

**Resultado = (Reserva Técnica Prevista – Reserva Técnica Atual)**

**Resultado = 2-5 = -3, ou seja, existe necessidade de aquisição de 3 unidades para esta famílias de transformadores de potência de 15/20/25MVA (ou similar padronizado).**

Família Analisada:


Transformadores 138-13,8/11,95 kV; 15/20/25MVA; Comutador Sem Tensão

+++++

Analisando separadamente outra família de 56 unidades de equipamentos em operação, do tipo reparáveis em fábrica (Transformadores de Potencia de 20/26,6 MVA sistema de resfriamento ONAN/ONAF; 138-13,8/11,95 kV, comutador sob carga CSC (CDC) na alta e religação na baixa tensão, operação normal sem evolução de gases combustíveis, etc.), taxa de falhas média de 1% ao ano, tempo médio de reparos 1 ano, tempo médio de aquisição 1 ano, vida útil da ordem de 40 anos, a quantidade necessária para a reserva visando manter a confiabilidade média da subestação > 99,5% é de no mínimo de 3 unidades.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	38 de 41



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

Avançando um pouco mais no conceito, considerando que as reservas calculadas levam em conta as famílias de transformadores de potência de subestações, o compartilhamento de estoque encontra-se devidamente incorporado a esta solução. Então analisando em conjunto as duas famílias indicadas anteriormente de 25 MVA e 26,6 MVA, totalizando 184 unidades, nas mesmas condições do exemplo, a quantidade necessária para a reserva visando manter a confiabilidade média da subestação > 99,5% é de no mínimo de 6 unidades.

Separadamente haveria necessidade de reserva de 8 (5+3) unidades, e, de forma compartilhada haveria a necessidade de apenas 6 unidades, com redução de investimento da ordem de 25% do valor originalmente proposto (cálculo separado = 8 unidades em relação ao cálculo compartilhado = 6 unidades).

$$C = Y + H + K - P - R$$

$$C = 2 + 4 + 0 - 6 - 0$$

**Resultado Compartilhado = (Reserva Técnica Prevista – Reserva Técnica Atual)**

**Resultado = 6-6 = 0, ou seja, não existe necessidade de aquisição para estas duas famílias de transformadores de potência de 20/26,6MVA.**

Famílias compartilhadas na presente análise:

Transformadores 138-13,8/11,95 kV; 15/20/25MVA; Comutador Sem Tensão (\*)

Transformadores 138-13,8/11,95 kV; 20/26,6MVA; Comutador Sob Carga (\*\*)

Nota: (\*) Família de transformadores de padrão original e com grande quantidade em operação, a partir de 1994 não teve mais compras realizadas, e, seu padrão foi substituído pela família (\*\*).


## 7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Billinton, R., Allan, R. N. “Reliability Evaluation of Engineering Systems”, New York, Plenum, 1983.

[2] Li, W., Vaahedi, E., Mansour, Y., “Determining Number and Timing of Substation Spare Transformers using a Probabilistic Cost Analysis Approach”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.

[3] Costa, J.G.C., Leite da Silva, A.M. “Dimensionamento Ótimo de Reserva Técnica de Transformadores de Subestações” X SEPOPE Belém Para – 2009.

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	33 de 41

 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da Transmissão Poisson

[4] Relatório Técnico – Recomendações para dimensionamento de reserva técnica de transformadores de potência de subestações \_ 2011 (manuscrito de 2004).

[5] Wangdee, W.; Li, w.; Shum, W.; Clouthury, P. System Planning and Performance Assessment British Columbia Transmission Corporation (BCTC), Vancouver –Canada – IEEE 2007.


#### ANEXO IV – DEFINIÇÃO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE EM FUNÇÃO DA DURAÇÃO MÉDIA EQUIVALENTE POR CONSUMIDOR DE DESLIGAMENTOS DE ENERGIA POR ANO (DEC) AFEITOS A SUBTRANSMISSÃO (CAUSA: SUBESTAÇÃO)

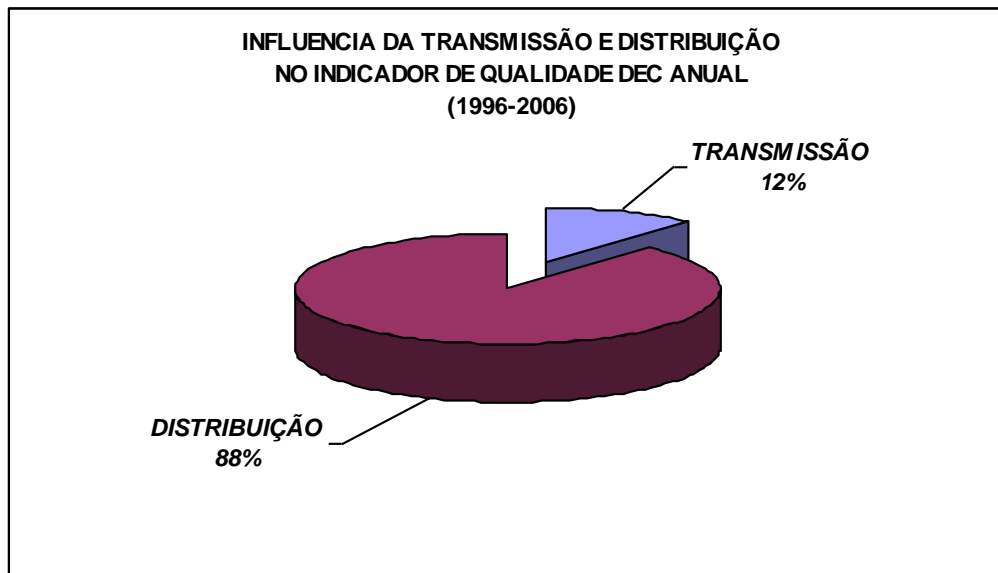
DISPONIBILIDADE POR ANO FUNÇÃO DA DURAÇÃO MÉDIA DE ENTREGA DE ENERGIA										
Quantidade de transformadores										
DEC Desejado Transmissão (h/ano)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0,10	0,999772	0,999543	0,999315	0,999087	0,998858	0,99863	0,998402	0,998174	0,997945	0,997717
0,20	0,999543	0,999087	0,99863	0,998174	0,997717	0,99726	0,996804	0,996347	0,99589	0,995434
0,30	0,999315	0,99863	0,997945	0,99726	0,996575	0,99589	0,995205	0,994521	0,993836	0,993151
0,40	0,999087	0,998174	0,99726	0,996347	0,995434	0,994521	0,993607	0,992694	0,991781	0,990868
0,50	0,998858	0,997717	0,996575	0,995434	0,994292	0,993151	0,992009	0,990868	0,989726	0,988584
0,60	0,99863	0,99726	0,99589	0,994521	0,993151	0,991781	0,990411	0,989041	0,987671	0,986301
0,70	0,998402	0,996804	0,995205	0,993607	0,992009	0,990411	0,988813	0,987215	0,985616	0,984018
0,80	0,998174	0,996347	0,994521	0,992694	0,990868	0,989041	0,987215	0,985388	0,983562	0,981735
0,90	0,997945	0,99589	0,993836	0,991781	0,989726	0,987671	0,985616	0,983562	0,981507	0,979452
1,00	0,997717	0,995434	0,993151	0,990868	0,988584	0,986301	0,984018	0,981735	0,979452	0,977169
1,10	0,997489	0,994977	0,992466	0,989954	0,987443	0,984932	0,98242	0,979909	0,977397	0,974886
1,20	0,99726	0,994521	0,991781	0,989041	0,986301	0,983562	0,980822	0,978082	0,975342	0,972603
1,30	0,997032	0,994064	0,991096	0,988128	0,98516	0,982192	0,979224	0,976256	0,973288	0,97032
1,40	0,996804	0,993607	0,990411	0,987215	0,984018	0,980822	0,977626	0,974429	0,971233	0,968037
1,50	0,996575	0,993151	0,989726	0,986301	0,982877	0,979452	0,976027	0,972603	0,969178	0,965753
1,60	0,996347	0,992694	0,989041	0,985388	0,981735	0,978082	0,974429	0,970776	0,967123	0,96347
1,70	0,996119	0,992237	0,988356	0,984475	0,980594	0,976712	0,972831	0,96895	0,965068	0,961187
1,80	0,99589	0,991781	0,987671	0,983562	0,979452	0,975342	0,971233	0,967123	0,963014	0,958904
1,90	0,995662	0,991324	0,986986	0,982648	0,978311	0,973973	0,969635	0,965297	0,960959	0,956621
2,00	0,995434	0,990868	0,986301	0,981735	0,977169	0,972603	0,968037	0,96347	0,958904	0,954338

Dados Históricos de Confiabilidade são definidos como Índices de Médios de Duração de Interrupção do Sistema (SAIDI) denominados no presente estudo como DEC da Subtransmissão. Dado em horas / ano / ponto de entrega de energia e definido com um valor máximo de 0,5 horas / ano, representando cerca de 10% do DEC total da empresa da ordem de 5 horas / ano. Dependendo da quantidade de equipamentos o valor de confiabilidade para garantir esta meta de 0,5 horas / ano, pode variar de 0,9988 até 0,9886 (média 0,994 ou 99,4%).

N. Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
16616	Instrução	1.1	JOSE CARLOS PINOTO BUENO	11/10/2022	40 de 41



 Interno	Tipo de Documento:	Relatório Técnico
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Aspectos de Dimensionamento de Reserva Técnica da
		Transmissão Poisson



## 9 REGISTROS DE REVISÃO

### 9.1 Colaboradores

Empresa	Área	Nome
CPFL Paulista	REDN	João Carlos Carneiro

### 9.2 Alterações Efetuadas

Versão Anterior	Data da Versão Anterior	Alterações em relação à Versão Anterior
1.0	18/09/2015	Formatação conforme normalização interna vigente