

# Cálculo de equivalente de rede e implementação de proteção diferencial

**Palavras-Chave:** SEP, Relés, Equivalente de rede

**Autores(as):**

**Vitor Gonçalves Costa – FEEC**

**Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares - FEEC**

---

## INTRODUÇÃO:

Países de grande extensão territorial como o Brasil costumam ter malhas elétricas muito complexas e ramificadas para atender diferentes centros de carga, muitas vezes, em razão dessa área de consumo estar geograficamente distante de onde a energia é gerada, uma vez que as usinas normalmente dependem da geografia local. Em razão disso, no Brasil, a rede elétrica possui uma malha interligada que garante confiabilidade nos segmentos de geração, transmissão e distribuição dado que é necessária a presença de redundância no sistema: capacidade de alimentar uma mesma cidade por diferentes vias, cobrindo o risco de apagão por defeito em uma linha específica.

Em vista da existência de uma malha elétrica complexa como essa, são necessários estudos constantes para adequação dos diferentes equipamentos da rede às condições atuais do sistema. Dentre esse grupo de análises necessárias serão abordados em especial dois estudos, primeiramente, os estudos de fluxo de carga, que analisam o regime permanente da rede sem defeitos, para níveis diferentes de demanda do consumidor, por exemplo, a potência necessária para suprir a demanda de uma segunda-feira em horário de pico com bastante congestionamento será menor do que em um cenário de final da copa do mundo em que a população está majoritariamente em casa assistindo a transmissão. Para realizar esse tipo de análise o sistema elétrico nacional em sua totalidade é modelado em um software desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), sendo possível encontrar os dados referentes à modelagem desse estudo no portal SINtegre.

O outro estudo igualmente importante para preparar e analisar a rede elétrica e fazer o comissionamento dos equipamentos é o estudo de curto-circuito. Nesse estudo, passamos a observar o comportamento do sistema elétrico quando acontecem defeitos, por exemplo, quando uma torre de transmissão elétrica cai ou quando algum animal entra em contato com os condutores. Nessas situações o nível de tensão para aquele ponto de observação se reduz drasticamente e provoca um aumento significativo na corrente elétrica, visto que a potência deve se conservar. Cenários como este são um risco tanto aos funcionários que realizam manutenções nas linhas como também para os equipamentos da rede que podem queimar, sendo um dos equipamentos mais caros o transformador de potência.

Em razão dos riscos apresentados no regime de falta para a integridade das pessoas e dos equipamentos, são utilizados diferentes dispositivos de proteção para realizar o monitoramento e contenção de danos. Os equipamentos que foram estudados nesta pesquisa foram os relés de proteção de sobrecorrente e diferencial de transformador, sendo o funcionamento desses equipamentos regido pelo monitoramento dos níveis de corrente que passam em determinado ramo da malha elétrica. Primeiramente, deve-se notar que os relés são equipamentos eletrônicos de monitoramento que ficam localizados na cabine de controle da subestação elétrica, logo eles não

absorvem uma corrente nominal de transmissão de 150 A, portanto são utilizados equipamentos intermediários entre o ramo observado e o IED- sigla em inglês para dispositivo eletrônico inteligente- para que a corrente que chegue em seus terminais seja de baixa intensidade, representando a realidade em uma diferente escala.

No contexto de proteção para sistemas elétricos de potência, existe a filosofia de proteção de retaguarda que funciona basicamente como uma alternativa para o isolamento da falta quando a proteção principal não atua. Nesta pesquisa a proteção principal utilizada é a diferencial de corrente, ela funciona comparando a corrente que flui através dos enrolamentos do transformador: caso haja diferença com o programado a proteção envia um sinal elétrico para os disjuntores tripolares de tal forma que o sistema fique isolado. Já no caso da retaguarda, é utilizada a proteção de sobrecorrente, a qual atua de forma temporizada: a partir de determinado nível de corrente (corrente de pick-up) ela inicia um relógio interno e caso o sinal não tenha normalizado após esse intervalo a mensagem é enviada ao disjuntor.

## METODOLOGIA:

A modelagem a ser feita é composta de três regiões: interna, fronteira e externa. O sistema interno consiste na área a ser analisada, em que se conhece os parâmetros elétricos da rede. Nesse estudo, tem-se por objetivo analisar a barra de Fortaleza. A rede externa representa toda a área elétrica que não é de interesse do estudo, enquanto a fronteira conecta à rede interna a externa, e incorpora as características elétricas da rede externa equivalente, dessa forma foram estabelecidos 4 níveis para obter uma precisão mais adequada, sendo o nível 0 a barra de referência e o nível 3 a fronteira entre região interna e externa. Assim, tem-se a determinação de um modelo reduzido que consegue representar suficientemente bem o comportamento da rede real e prover viabilidade computacional para os estudos de caso.

O equivalente das barras do sistema externo consiste em eliminar as equações que representavam o que estava além da fronteira, de forma a incorporá-las ao sistema resumido por meio da adição de novas conexões ao sistema as quais devem se comportar tal como o que foi omitido. Existem diferentes formas de calcular esse sistema equivalente, no entanto o caminho que utiliza o método computacional da ferramenta Anafas foi escolhido em razão da compatibilidade com os arquivos disponibilizados pela ONS, dessa forma o sistema externo a partir de cada barra de nível 3 é substituído por um equivalente de Thévenin.

Esse estudo tem por objetivo utilizar o equivalente de rede para montar um sistema que simula, com menos elementos, a rede do Ceará ligada a todo o Sistema Interligado Nacional e suas unidades de geração e transmissão, sendo o objeto de estudo nesse equivalente a barra de Fortaleza. Isso será feito com intuito de analisar o comportamento do transformador de potência da subestação desse barramento em regime permanente e no regime de faltas para observar o comportamento do sistema quando há defeitos na zona interna e na zona externa de proteção do Trafo, pois, assim, será possível parametrizar os relés de forma correta.

Para a parametrização da proteção de retaguarda foi utilizada a curva IEC standard que segue o equacionamento

$$t = \frac{tms \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I_{pickup}}\right)^\alpha - 1}$$

Equação 1

$$I_{pickup} < \frac{I_{cc_{jusante}}}{R_{TC}}$$

Equação 2

Nesse sistema de equações  $t$  indica o tempo que a proteção levará para atuar após identificar um defeito,  $I$  indica a corrente de linha no ramo e  $I_{pickup}$  a corrente a partir da qual a proteção começa a atuar, por fim, os outros termos servem para indicar a acentuidade da curva, sendo predeterminados por normas técnicas.

Já para a proteção diferencial segue o esquema das figuras

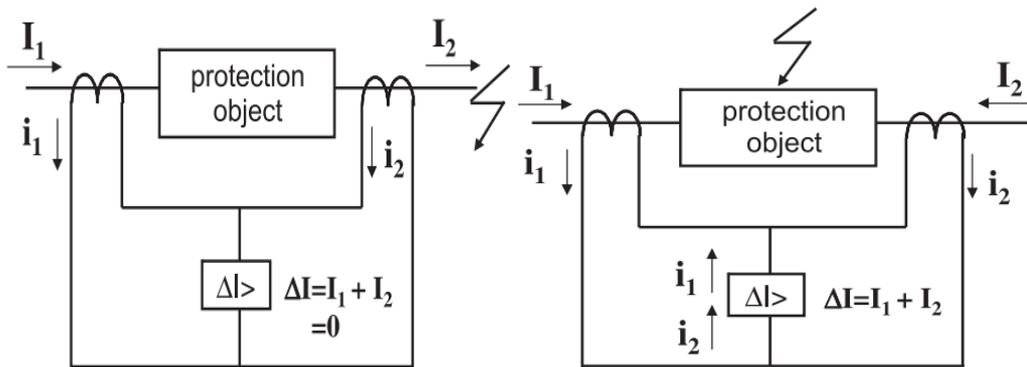


Figura 1: Esquemático da proteção diferencial

(a) Falta externa

(b) Falta interna

Portanto, se a falta ocorre em região externa a proteção de sobrecorrente atua e se a falta ocorrer no equipamento, nesse caso no transformador, a proteção diferencial deve atuar seguindo como referência a diferença das correntes nos enrolamentos, sendo parâmetros importantes a corrente de operação e a corrente de restrição dadas respectivamente pela diferença das correntes e pela média delas. Com esses parâmetros pode-se calcular a declividade que será a referência para atuação da proteção.

Por fim, para realizar a implementação da proteção foi utilizado o software RSCAD que conta com hardware dedicado presente no Laboratório de Estudo de transitórios eletromagnéticos e de proteção do Sistema Elétrico de Potência (LTRANSP-Unicamp) a partir das planilhas de dados de regime permanente do Anarede, tais como potência nominal dos geradores e capacidade dos trafos. Para modelar as linhas de transmissão nesse programa foi preciso estimar os dados de susceptância de sequência zero para que o tempo de propagação do sinal pudesse ser computado pelo software. Logo, para que isso fosse possível foi utilizado o programa ATP que permite modelagem de linhas e estudos transitórios a partir do fornecimento de dados acerca da linha tais como geometria da torre, nível de tensão e características dos condutores.

A partir desses dados representados, na figura 2 e 3, foi possível estimar a velocidade de propagação na linha mediante o programa e calcular a susceptância. Esse método foi utilizado, também, para corrigir problemas no banco de dados disponibilizado pelo SINtegre de linhas de níveis de tensão diferentes para que a modelagem fosse possível no RSCAD.

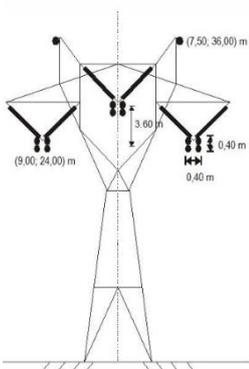


Figura 2: Torre típica 500kV

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.163	1.467	0.0588	9	24	10.57	0.4	45	4
2	2	0.163	1.467	0.0588	0	27.6	14.12	0.4	45	4
3	3	0.163	1.467	0.0588	9	24	10.57	0.4	45	4
4	0	0	0.457	4.188	7.5	36	22.57	0	0	1
5	0	0	0.457	4.188	7.5	36	22.57	0	0	1

Figura 3: Parâmetros dos condutores

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Tabela 1: Contribuições de curto-circuito

Curto-circuito monofásico terra			
Barra	Nome	Secundário [A]	Primário [A]
5458	QUIXADA-500kV	-654	396
5370	PECEM-CE500	-1640	978
5841	PACABA-CE500	-2235.9	1396.7
5651	CAUIPE-CE230	1830.3	-823.9
5081	MARACN-CE230	2046.9	-900.8
5641	PICI2-CE230	2087.9	-921.4
5452	FORTAL-CE230	5899.5	-2442.3
5471	D.GOUVEIA-CE230	3635.6	-1545.6
5481	SBD-CE230	1925	987
8165	LAVRAS-CE230	826.9	-372.2
5643	PICI2-CE69	309.8	-142.5
77256	UTE-TERMOCOUTE	1257.9	-574.5
77259	UTE-13.8-G3	1275.9	-574.9
5652	UTE-FOUTE000	1743	-785.3
7231	MCN-T1-230	1121.8	-516.1
7233	MCN-T2-230	1121.8	-516.1
7599	MCN-T3-231	1121.8	-516.1
45358	TIMBAU-CE500	-541.5	311.4
5350	ACU3--RN500	337.6	182.3
5408	MILAGR-CE500	-144.2	82.6
5370	PECEM2-CE500	-1640.8	978.1
5924	JAGUAD-CE500	-348.4	208.5
5318	ARACT-CE500	-414.1	216.4
5480	SOBRA3-CE500	-612.2	317.6
5371	PECEM2-230	-872.9	497
8350	SBD-CE230	-1582	815
5488	SBT-CE230	-335.6	176.6
5381	AQUIR2-CE230	2537.9	-1093.4
5453	FORTAL-CE69	436.1	-200.9

A tabela ao lado indica valores da contribuição para o curto-circuito, executado para níveis 2 e 3, no transformador de potência de três enrolamentos escolhido para o estudo na barra de Fortaleza que será relevante para o cálculo da parametrização dos relés de proteção. A tabela que consta os cálculos para curtos da natureza ABCG estarão no relatório PIBIC por questão de limite de páginas deste resumo.

Para escolher a corrente de pick-up do relé de sobrecorrente utilizaremos um fator de sobrecarga típico de 1,2, a menor corrente de curto do secundário obtida, 309,8A, além de uma relação de transformação do TC de 150, assim obtemos  $I_p=2,47$  A. Para atuação instantânea dessa proteção vamos considerar uma corrente 3 vezes maior de 7,44 A.

Para a proteção diferencial vamos utilizar um ajuste de declive percentual. A partir do software Anarede podemos obter as condições nesse regime e calcular as correntes de operação e de restrição, obtendo um ajuste para declividade de 2,19%. Em razão disso foi escolhido um declive de 10% para correntes mais baixas e um de 20% para as mais intensas como é possível observar no gráfico.

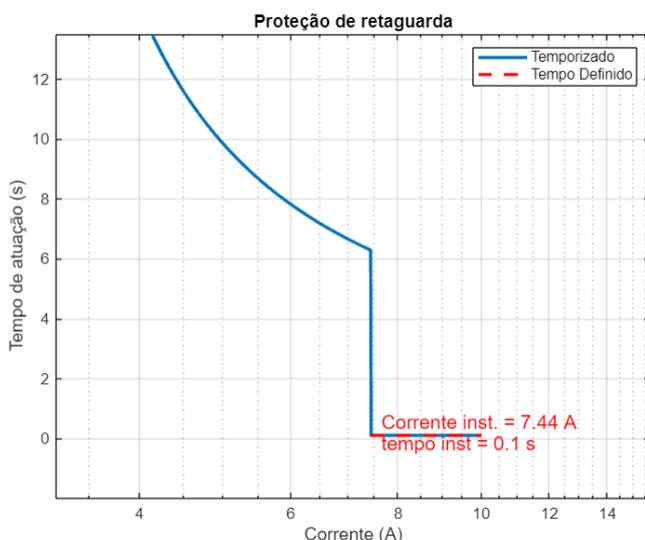


Figura 4: Ajuste para proteção de sobrecorrente

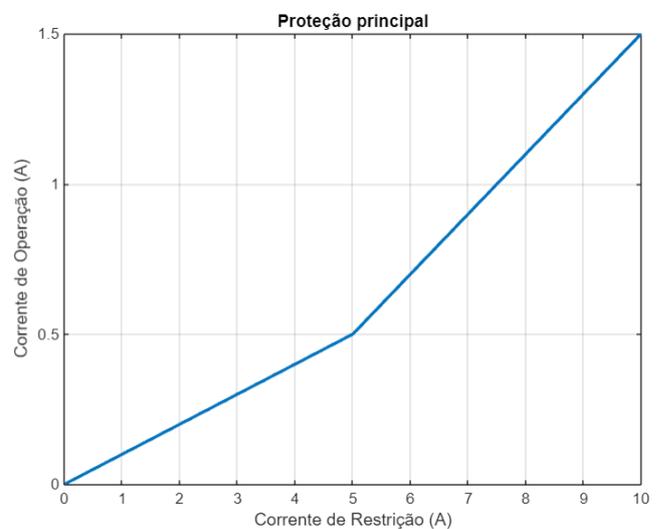


Figura 5: Ajuste para proteção diferencial

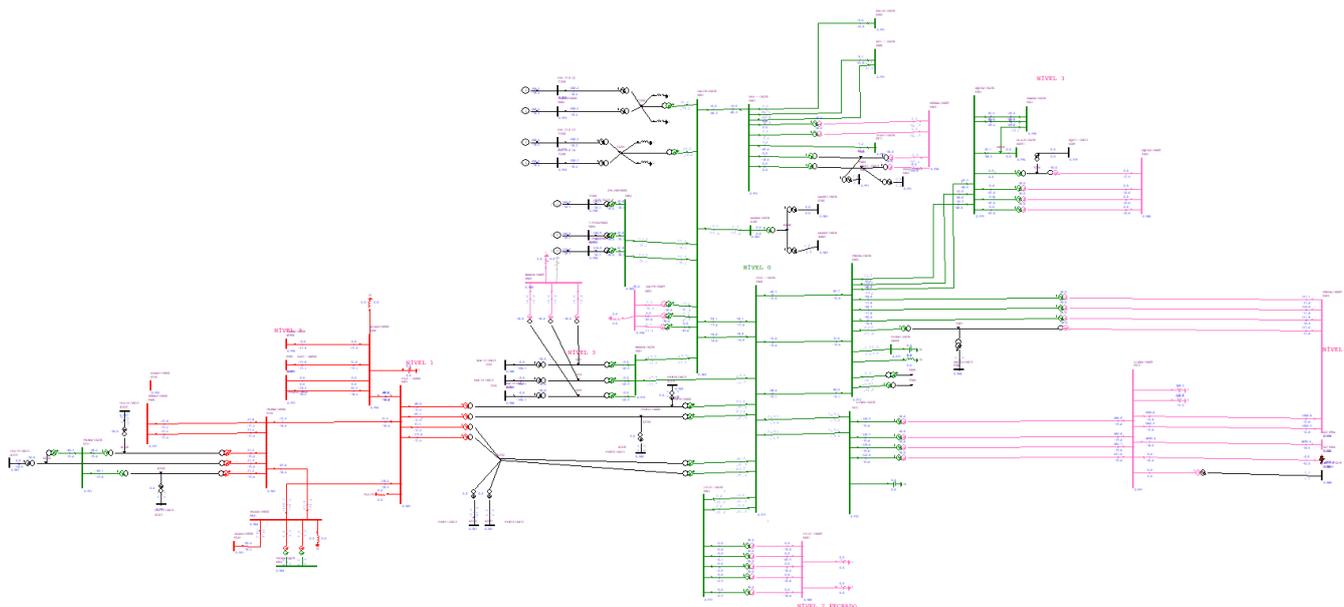


Figura 2: Sistema equivalente para o Ceará

## CONCLUSÕES:

Com base no exposto conclui-se que a partir dos dados de regime permanente e regime de falta é possível realizar estudos de equivalência de redes para planejar a operação e manutenção do sistema interligado nacional com eficiência, adequando esquemas de proteção apropriados para garantir confiabilidade da rede.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro.** Proteção de sistemas elétricos de potência. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2000.
- [2] **ZIEGLER, Gerhard.** Numerical differential protection: principles and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012.
- [3] **WINDERS, John.** Power transformers: principles and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- [4] **ALVES, Waschington Fernandes.** Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. Niterói, RJ: Universidade Federal Fluminense, 2007.
- [5] **SOUZA JÚNIOR, Sérgio Gonçalves de; et al.** Apresentação e aplicação do software ANAFAS em estudo de curto-circuito. Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- [6] **COSTA, Janaina Mirses de Sousa Cruz; et al.** Levantamento da curva de saturação de transformadores de potência a partir de registros das formas de onda da tensão e corrente de energização. Itajubá, MG: Universidade Federal de Itajubá, 2020.
- [7] **PAIVA, Francisco Jandson Barbosa.** Equivalente da rede elétrica de distribuição cearense: um estudo de variação de tensão em regime permanente na conexão de novos clientes no regional Cauípe. Fortaleza, CE, 2022.
- [8] **TAVARES, M.C.; PRADO, P.A.** Estudo da proteção diferencial de transformadores pela análise harmônica. São Paulo, SP: Universidade de São Paulo - USP, Departamento de Engenharia Elétrica, 1999.
- [9] **COSTA, Vitor Gonçalves.** Estudo sobre o sistema elétrico de potência: função de sobrecorrente. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, XXXI Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, 2023.
- [10] **MACÊDO, Ana Vitória de Almeida; et al.** Solução de fluxo de potência, cálculo da estabilidade de tensão e equivalente de redes com aplicações utilizando o ANAREDE®. Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2009.