

# Confiabilidade de Linhas de Transmissão Utilizando Sistema Sul Brasileiro com 32 Barras

Leonardo Felipe da Silva dos Santos,  
*Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP),  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
leonardo.santos@acad.ufsm.br*

**Abstract**—This document describes the most common article elements and how to use the IEEEtran class with L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X to produce files that are suitable for submission to the IEEE. IEEEtran can produce conference, journal, and technical note (correspondence) papers with a suitable choice of class options.

**Index Terms**—Article submission, IEEE, IEEEtran, journal, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, paper, template, typesetting.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é constituído fundamentalmente por usinas hidrelétricas de grande porte, quais essas criam desafios para linhas de transmissão (LTs), quais hoje no Brasil o sistema em anel propõem uma segurança para o escoamento de energia e também cria um sistema de troca de energia entre as regiões, assim o sistema pode encontrar problema para distribuição de diversas cargas localizadas em locais pontuais com falta de geração ou demandas quais superam a intercambialidade de regiões.

Assim as capacidades da transmissão de energia ficam voltadas a confiabilidade do sistema elétrico de potência para escoamento dos geradores, quais o Brasil é referencia em usar hidrelétricas em sua grande maioria, normalmente localizadas na parte norte do Brasil por apresentar uma hidrologia mais favoráveis a geração hidrelétrica.

Este artigo visando a utilização do sistema de transmissão sul brasileiro de 32 barras (STSB-32) para criar o cenário de primeira ordem do diagrama de cortes e o cenário de segunda ordem, assim numerados utilizando os métodos de enumeração de estados do critério N-1 e N-2 [1].

Este artigo tem como proposta analisar o comportamento do Sistema STSB-32 conforme as pontos de operação propostos, assim como utilizar os modelos de confiabilidade compostos para calcular a confiabilidade do sistema n-2, se utiliza o *software* ANAREDE, para todos os objetivos deste artigo, pois o ANAREDE é utilizado para o planejamento seguro do Sistema Interligado Nacional – SIN.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. A seção 2 aborda a confiabilidade de sistemas elétricos de potência, com uma revisão do assunto. A seção 3 explana modelagem do sistema e as simulações realizadas para os dois cenários abordados. Os resultados são discutidos na seção 4. Finalmente

na seção 5 apresentado as conclusões e as contribuições do estudo.

## II. CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Qualquer sistema de potência está sujeito a falhas pontuais, tanto em equipamentos dispostos nas subestações quanto em linhas de transmissão, quais estas falhas podem comprometer a operação em parte ou todo sistema de potência, qual pode inviabilizar o fornecimento de energia em vários pontos e até mesmo para consumidores finais.

Assim a confiabilidade por meio da análise dos índices probabilísticos do sistema, combinado com julgamentos sobre critérios pré-estabelecidos e com um julgamento próprio. Porém hoje a confiabilidade utiliza métricas erradas sobre as linhas de transmissão, qual os valores são definidos por um geral e não por linha, quais esses históricos são recentes, assim não tendo dados de todos os pontos, afinal os sistema elétrico de potência é relativamente novo no Brasil.

Toda a parte de confiabilidade é baseada em grandes técnicas de análise, que utiliza princípios e conceitos da matemática fornecidos pela teoria de probabilidade [2]. A análise de confiabilidade busca, basicamente, analisar o risco de não atendimento à demanda do sistema de potência.

Com a utilização destes conhecimentos pode-se calcular quais as chances de que um determinado sistema ou componente possa falhar, assim criando modelos de confiabilidade quais podem ser mensuradas conforme modelos pré-estabelecidos ou normas vigentes como no caso das regras dos serviços de transmissão de energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.



Figura 1: Área de Atuação da ONS perante o Sistema.

Já quem faz a operação do sistema nacional é o operador nacional do sistema elétrico (ONS), qual faz desde o planejamento elétrico até operação do sistema como um todo, como mostrada na Figura 1, a abrangência da ONS perante o SIN.

#### Níveis Hierárquicos

A análise de confiabilidade pode abranger três níveis hierárquicos, conforme apresentado na Figura 2 [3]:

- 1) Nível Hierárquico 0 (NH0): Abrange o estudo de confiabilidade ligado ao sistema energético isolado aos demais, normalmente se analisa a confiabilidade de projeto e funcionamento;
- 2) Nível Hierárquico 1 (NH1): Abrange o estudo de confiabilidade ligado a geração de energia;
- 3) Nível Hierárquico 2 (NH2): Abrange o estudo de confiabilidade ligados a transmissão e geração de energia;
- 4) Nível Hierárquico 3 (NH3): Abrange o estudo de confiabilidade ligados a distribuição, transmissão e geração de energia.

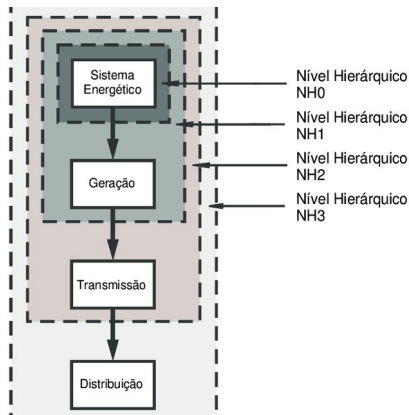


Figura 2: Níveis Hierárquicos de um Sistema de Potência [3].

Atualmente devido a dimensão dos problemas trabalhamos apenas com o NH2, assim montando o problema em razão das falhas em linhas de transmissão quais já foram modeladas e levantadas.

### III. MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Nesta seção apresentam-se as características do sistema de transmissão sul brasileiro com 32 barras simulado no *software* **ANAREDE**, para o cenário proposto para níveis de carregamento e níveis de geração, como um ponto de operação qual haveria contingências se houvesse alguma violação de tensão ou fluxo de potência, assim como considerar contingências os casos divergentes a partir do ponto de operação descrito na Tabela I.

Tabela I: Configuração do Nível de Carregamento(MW)

Nível de Carregamento (MW)		
Área 1	Área 2	Área 3
3100	7800	-4500

Assim como o nível de carregamento foi definido em cada área do sistema, o nível de geração também foi previamente definido conforme a Tabela II.

Tabela II: Configuração do Nível de Carregamento(MW)

Nível de Geração	
Área 1	Área 2
-20%	-20%

Com a definição das tabelas I e II, pode-se utilizar o **ANAREDE** [4] para configuração do sistema conforme as tabelas, após carregamento do projeto e configuração das opções das tabelas, o esquemático do sistema STSB-32 foi disposto na Figura 3, qual mostra os esquemático completo no **ANAREDE**.

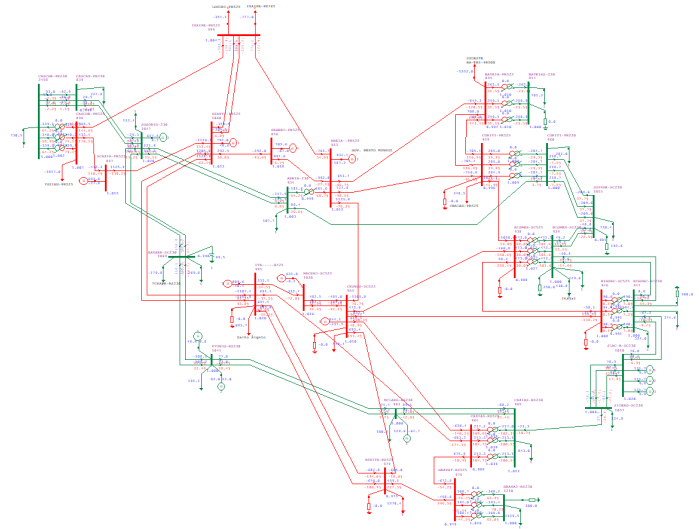


Figura 3: Diagrama do sistema de transmissão sul brasileiro de 32 barras.

Sendo o sistema separado por tensão, os níveis de tensão são de 230 kV, na cor verde e 525 kV na cor vermelha, esse sistema também é dividido em três áreas. A área número 1 é a parte classificada em 525 kV, a área 2 é a parte do sistema em 230 kV e a área 3 é a área de importação de energia da região sudeste do Brasil.

Para a utilização deste tipo de análise, foi dada a tabela III com os valores de confiabilidade em cada linha, assim podendo

analisar as tabelas de contingências com o diagrama de cortes mínimos [5].

Tabela III: Probabilidade das Linhas STSB-32.

De	Para	Q	P
933	856	2,79E-04	9,9972E-01
933	895	1,26E-03	9,9874E-01
933	955	8,66E-04	9,9913E-01
933	959	1,16E-03	9,9884E-01
933	999	8,51E-04	9,9915E-01
895	959	1,65E-04	9,9984E-01
946	938	4,28E-04	9,9957E-01
946	955	1,15E-03	9,9885E-01
938	955	1,24E-03	9,9876E-01
938	959	6,78E-04	9,9932E-01
896	897	3,10E-04	9,9969E-01
896	999	1,03E-03	9,9897E-01
964	955	9,99E-04	9,9900E-01
964	976	3,87E-04	9,9961E-01
964	995	1,25E-03	9,9875E-01
955	979	1,26E-03	9,9874E-01
955	1030	1,96E-04	9,9980E-01
976	979	1,45E-04	9,9985E-01
995	979	1,54E-03	9,9846E-01
995	1030	3,18E-04	9,9968E-01
995	1060	9,19E-04	9,9908E-01
999	1060	8,21E-04	9,9918E-01
897	1060	4,43E-04	9,9956E-01
856	1060	2,98E-04	9,9970E-01
934	960	6,59E-04	9,9934E-01
934	1047	4,30E-04	9,9957E-01
947	939	3,36E-04	9,9966E-01
947	1010	3,47E-04	9,9965E-01
939	1015	1,96E-04	9,9980E-01
839	1047	2,15E-04	9,9978E-01
839	2458	2,76E-05	9,9997E-01
965	963	1,43E-04	9,9986E-01
965	1057	5,64E-04	9,9944E-01
960	1015	2,68E-04	9,9973E-01
1010	1057	1,27E-04	9,9987E-01
963	1041	6,12E-04	9,9939E-01
1041	1069	2,12E-04	9,9979E-01
1047	1069	4,34E-04	9,9957E-01

Utilizando a tabela I e II para calcular os valores de cada uma das possibilidades para contingências de N-1 e N-2, utilizando os casos de abertura de cada uma das linhas uma única vez, caso alerta de violações do *ANAREDE* seria gerado um relatório e buscado essas informação de qual o valor de **Q** e **P** para cada linha.

#### IV. RESULTADOS

A utilização da confiabilidade e com uma lista de contingências da primeira ordem qual ele retornou o relatório de violação N-1 da tabela IV.

Tabela IV: Relatório de Violação N-1 retirado do ANAREDE.

Violação	Cont.	De	Para	Sev.	Q	P
Tensão	5	896	897	8,5	3,098E-04	9,997E-01
Tensão	13	938	959	4,4	6,784E-04	9,993E-01
Tensão	24	995	979	3	1,542E-03	9,985E-01
Tensão	20	964	976	1,4	3,875E-04	9,996E-01
Tensão	23	995	964	1,1	1,253E-03	9,987E-01
Divergente	17	955	979		1,265E-03	9,987E-01

Assim para o caso N-1, temos a tabela IV qual apresenta a contingência, de qual barra para qual barra, apresenta o Q e P para cada contingência gerada assim pelo *ANAREDE*. Assim tirando os valores das contingências N-1 para criar uma lista

de contingências de N-2, qual será feita os diagramas de cortes mínimos.

Tabela V: Relatório de Violação N-2 retirado do ANAREDE.

Violação	Cont	De1	Para1	Sev	Q1	De2	Para2	Q2
Tensão	509	955	946	9,6	1,15E-03	960	1015	1,15E-03
Tensão	517	955	946	5,5	1,15E-03	1010	947	1,15E-03
Tensão	508	955	946	5,2	1,15E-03	959	895	1,15E-03
Tensão	352	933	955	4,1	8,66E-04	955	946	8,66E-04
Tensão	349	933	955	3,5	8,66E-04	938	946	8,66E-04
Tensão	487	947	939	3,2	3,36E-04	955	946	3,36E-04
Tensão	528	955	964	3,2	9,99E-04	965	1057	9,99E-04
Tensão	449	938	946	2,6	4,27E-04	960	1015	4,27E-04
Tensão	470	938	955	2,5	1,24E-03	960	1015	1,24E-03
Tensão	538	955	964	2,4	9,99E-04	1047	1069	9,99E-04
Tensão	507	955	946	2,2	1,15E-03	955	964	1,15E-03
Tensão	297	856	1060	1,8	2,97E-04	938	955	2,97E-04
Tensão	476	938	955	1,7	1,24E-03	999	933	1,24E-03
Tensão	269	856	933	1,2	2,78E-04	938	955	2,78E-04
Tensão	448	938	946	1,2	4,27E-04	959	895	4,27E-04
Tensão	542	955	964	1,1	9,99E-04	1041	963	9,99E-04
Tensão	539	955	964	1,1	9,99E-04	1057	1010	9,99E-04
Tensão	272	856	933	1,1	2,78E-04	955	964	2,78E-04
Tensão	541	955	964	1,1	9,99E-04	1069	1041	9,99E-04
Tensão	353	933	955	1	8,66E-04	955	964	8,66E-04
Tensão	468	938	955	1	1,24E-03	955	964	1,24E-03
Divergentes	638	999	896	;	1,02E-03	1060	897	1,02E-03
Divergentes	529	955	964	;	9,99E-04	976	979	9,99E-04
Divergentes	467	938	955	;	1,24E-03	955	946	1,24E-03
Divergentes	446	938	946	;	4,27E-04	955	946	4,27E-04
Divergentes	444	938	946	;	4,27E-04	938	955	4,27E-04
Divergentes	377	933	959	;	1,15E-03	955	946	1,15E-03
Divergentes	375	933	959	;	1,15E-03	938	955	1,15E-03
Divergentes	326	933	895	;	1,25E-03	955	946	1,25E-03
Divergentes	324	933	895	;	1,25E-03	933	959	1,25E-03
Divergentes	320	933	895	;	1,25E-03	933	959	1,25E-03

Com a tabela V pode-se iniciar o diagrama de cortes mínimos, utilizando os valores de tabelas de Q e P equivalentes, sabendo que (1) podemos converter Q em P ou vice-versa.

$$1 = P + Q \quad (1)$$

Com os valores de Q e P podemos definir que a confiabilidade de sistema é o produto da probabilidade de todos os componentes em série, pela equação (2).

$$\prod_{i=1}^n (p_i) \quad (2)$$

Logo definir a confiabilidade do sistema é 1 menos o produto da probabilidade de falha de todos os componentes em paralelo, pela equação (3).

$$1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (3)$$

Utilizando essas equações temos os equivalentes do relatório de violação N-2 da Tabela V, utilizando primeiramente a equação 3, após essa análise junta-se o relatório N-1 com o equivalente do N-2 da Tabela VI.

Tabela VI: Equivalentes de N-2 calculado.

Cont.	De1	Para1	De2	Para2	Q Eq	P Eq
509	955	946	960	1015	1.33056E-06	0.999998669
517	955	946	1010	947	1.33056E-06	0.999998669
508	955	946	959	895	1.33056E-06	0.999998669
352	933	955	955	946	7.50788E-07	0.999999249
349	933	955	938	946	7.50788E-07	0.999999249
487	947	939	955	946	1.13071E-07	0.999999887
528	955	964	965	1057	9.98101E-07	0.999999002
449	938	946	960	1015	1.82996E-07	0.999999817
470	938	955	960	1015	1.53884E-06	0.999998461
538	955	964	1047	1069	9.98101E-07	0.999999002
507	955	946	955	964	1.33056E-06	0.999998669
297	856	1060	938	955	8.85122E-08	0.999999911
476	938	955	999	933	1.53884E-06	0.999998461
269	856	933	938	955	7.77462E-08	0.999999922
448	938	946	959	895	1.82996E-07	0.999999817
542	955	964	1041	963	9.98101E-07	0.999999002
539	955	964	1057	1010	9.98101E-07	0.999999002
272	856	933	955	964	7.77462E-08	0.999999922
541	955	964	1069	1041	9.98101E-07	0.999999002
353	933	955	955	964	7.50788E-07	0.999999249
468	938	955	955	964	1.53884E-06	0.999998461
638	999	896	1060	897	1.05473E-06	0.999998945
529	955	964	976	979	9.98101E-07	0.999999002
467	938	955	955	946	1.53884E-06	0.999998461
446	938	946	955	946	1.82996E-07	0.999999817
444	938	946	938	955	1.82996E-07	0.999999817
377	933	959	955	946	1.33541E-06	0.999998665
375	933	959	938	955	1.33541E-06	0.999998665
326	933	895	955	946	1.58181E-06	0.999998418
324	933	895	933	959	1.58181E-06	0.999998418
320	933	895	933	959	1.58181E-06	0.999998418

Assim com o equivalente de cada uma das linhas de transmissão feitos vamos calcular o múltiplo como se todos os elementos fossem série juntamente com a lista contingências N-1 da Tabela IV, pode-se calcular a Tabela VII, qual representa o resultado da confiabilidade.

Tabela VII: Resultantes de Confiabilidade do sistema.

Cont	De1	Para1	De2	Para2	Q	P
5	896	897	-	-	3.098100E-04	9.996902E-01
13	938	959	-	-	6.783700E-04	9.993216E-01
17	955	979	-	-	1.264600E-03	9.987354E-01
20	964	976	-	-	3.874700E-04	9.996125E-01
23	995	964	-	-	1.252800E-03	9.987472E-01
24	995	979	-	-	1.542200E-03	9.984578E-01
269	856	933	938	955	7.774617E-08	0.9999999E-01
272	856	933	955	964	7.774617E-08	0.9999999E-01
297	856	1060	938	955	8.851220E-08	0.9999999E-01
320	933	895	933	959	1.581809E-06	0.9999984E-01
324	933	895	933	959	1.581809E-06	0.9999984E-01
326	933	895	955	946	1.581809E-06	0.9999984E-01
349	933	955	938	946	7.507876E-07	0.9999992E-01
352	933	955	955	946	7.507876E-07	0.9999992E-01
353	933	955	955	964	7.507876E-07	0.9999992E-01
375	933	959	938	955	1.335411E-06	0.9999987E-01
377	933	959	955	946	1.335411E-06	0.9999987E-01
444	938	946	938	955	1.829957E-07	0.9999998E-01
446	938	946	955	946	1.829957E-07	0.9999998E-01
448	938	946	959	895	1.829957E-07	0.9999998E-01
449	938	946	960	1015	1.829957E-07	0.9999998E-01
467	938	955	955	946	1.538840E-06	0.9999985E-01
468	938	955	955	964	1.538840E-06	0.9999985E-01
470	938	955	960	1015	1.538840E-06	0.9999985E-01
476	938	955	999	933	1.538840E-06	0.9999985E-01
487	947	939	955	946	1.130708E-07	0.9999999E-01
507	955	946	955	964	1.330562E-06	0.9999987E-01
508	955	946	959	895	1.330562E-06	0.9999987E-01
509	955	946	960	1015	1.330562E-06	0.9999987E-01
517	955	946	1010	947	1.330562E-06	0.9999987E-01
528	955	964	965	1057	9.981009E-07	0.9999990E-01
529	955	964	976	979	9.981009E-07	0.9999990E-01
538	955	964	1047	1069	9.981009E-07	0.9999990E-01
539	955	964	1057	1010	9.981009E-07	0.9999990E-01
541	955	964	1069	1041	9.981009E-07	0.9999990E-01
542	955	964	1041	963	9.981009E-07	0.9999990E-01
638	999	896	1060	897	1.054729E-06	0.9999989E-01
Total					5.45274E-03	9.94547E-01
Total (%)					0.5452738%	99.4547262%

Assim com as contingências apresentadas em N-1 Tabela IV e N-2 Tabela VI, temos os valores de falha em cada uma das linhas separados assim aplicando as formulas de confiabilidade podemos determinar o resultante total da tabela VII. Assim determinamos os resultados na tabela VIII.

Tabela VIII: Resultado da Análise de Confiabilidade do Sistema STSB-32.

Total	5.45274E-03	9.94547E-01	1.00000E+00
Total (%)	0.54527%	99.45473%	100%

## V. CONCLUSÃO

The conclusion goes here.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. M. Lazari, L. H. Medeiros, N. D. Barth, R. Biazzi, and M. Sperandio, "Estudo de confiabilidade para um sistema de potência através da inserção de um parque eólico."

- [2] A. M. L. da Silva, “4. análise de confiabilidade em sistemas de potência,” 2022.
- [3] A. M. Cassula, A. M. L. D. Silva, L. A. F. Manso, and R. Billinton, “Avaliação da confiabilidade em sistemas de distribuição considerando falhas de geração e transmissão,” pp. 262–271, 2003.
- [4] E. A. Cabral, “Estudo de confiabilidade aplicado à análise de alternativas de projeto de subestação industrial 69-13,8 kv baseado no modelo demarkov e análise de falha,” pp. 1–81, 2020.
- [5] G. Luís and R. Vaccaro, “Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas,” 1997.