

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia

**ESTUDO DE IMPACTO DE ENTRADA DE GERAÇÃO NO SIN
NO HORIZONTE 2018: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA NO X/R
DE DISJUNTORES PRÓXIMOS À USINA DE TUCURUÍ.**

Autora: Micaelle Araújo de Siqueira

Orientador: Rudi Henri van Els

**Co-orientador: MSc. Magno de
Bastos Guimarães**

Brasília, DF

2017



MICAELLE ARAÚJO DE SIQUEIRA

**ESTUDO DE IMPACTO DE ENTRADA DE GERAÇÃO NO SIN NO HORIZONTE
2018: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA NO X/R DE DISJUNTORES PRÓXIMOS À
USINA DE TUCURUÍ.**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Dr. Rudi Henri van Els

Co-orientador: MSc. Magno de Bastos
Guimarães

Brasília, DF

2017

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Siqueira, Micaelle Araújo de.

Estudo de impacto de entrada de geração no SIN no horizonte 2018: análise da influência no X/R de disjuntores próximos à Usina de Tucuruí. Micaelle Araújo de Siqueira. Brasília: UnB, 2017. 81 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Orientação: Rudi Henri van
Els.

1. Curto circuito. 2. SIN. 3. Capacidade de abertura de
disjuntores.

I. Els, Rudi Henri van. II. Estudo de impacto de entrada de
geração no SIN no horizonte 2018: análise da influência no X/R
de disjuntores próximos à Usina de Tucuruí.

CDU Classificação



**ESTUDO DE IMPACTO DE ENTRADA DE GERAÇÃO NO SIN NO HORIZONTE
2018: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA NO X/R DE DISJUNTORES PRÓXIMOS À
USINA DE TUCURUÍ.**

Micaelle Araújo de Siqueira

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 11/07/2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Rudi Henri van Els, UnB/ FGA

Orientador

MSc. Magno de Bastos Guimarães, Eletronorte

Co-orientador

Prof. Dr. Luís Filomeno de Jesus Fernandes, UnB/FGA

Membro Convidado

Brasília, DF

2017

Esse trabalho é dedicado à toda minha família, como forma de gratidão à todo apoio que me foi dado durante os últimos anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, Nossa Senhora D'Abadia e Nossa Senhora Sant'Ana por todas as bênçãos concedidas até o presente momento.

Ao Professor Rudi por todas orientações que me foram dadas durante todo meu percurso acadêmico, pela paciência e por confiar à mim mais este projeto.

Ao meu co-orientador Magno, pela disponibilidade, paciência e sabedoria dispensadas à mim.

À Universidade de Brasília por todo acolhimento e auxílios nestes últimos anos.

À Eletronorte, em especial à equipe do planejamento, pela acolhida e oportunidade de aprendizado durante minha passagem como estagiária desta empresa.

Aos meus colegas de curso que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho e aos que me deram apoio diante das dificuldades.

Aos meus amigos que são familiares de coração, que me adotaram nesta jornada fora do ninho materno e me deram lar.

Aos meus familiares que nunca me deixaram desacreditar desta graduação e em tantos outros sonhos.

À minha mãe que viveu este sonho comigo e que nunca mede esforços para me apoiar.

Ao meu companheiro João Paulo e à minha filha Olívia, com os quais pude compartilhar minhas dificuldades e conquistas, e que compreendem minha ausência e me incentivam a prosseguir na busca por este objetivo.

Consagre ao Senhor tudo que faz e os seus planos serão bem sucedidos.

Provérbios 16,3.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os impactos associados à conexão de novas gerações no Sistema Interligado Nacional (SIN) nas proximidades da SE/UHE Tucuruí (PA), mais especificamente a influência destas no nível de curto circuito da subestação e na capacidade de abertura dos disjuntores da mesma. Motivado por uma recomendação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que indica superação dos disjuntores da SE/UHE Tucuruí no Plano de Ampliação e Reforços (PAR), tendo em vista a superação destes equipamentos por nível de curto circuito e por aplicação do fator associado à relação X/R frente aos estudos de curto circuito realizados pelo ONS no programa SAPRE/Anafas. Para realização deste trabalho, obtiveram-se a partir de simulações computacionais da Eletronorte no programa ATP-EMTP, novos valores de curto circuito na SE/UHE Tucuruí utilizando o caso base da ONS no horizonte 2018. Uma vez que a modelagem realizada neste programa se utiliza de parâmetros completos dos equipamentos, que foram retirados dos dados de placa dos mesmos. Neste contexto, são apresentados uma modelagem da SE/UHE Tucuruí no programa ATP, os cálculos dos níveis de curto circuito a partir das simulações, comparação dos valores obtidos com a capacidade nominal de abertura dos disjuntores. Estes valores obtidos são comparados aos valores de curto-circuito de outras subestações diferentes da SE/UHE Tucuruí por serem localizadas distantes de usina. Em especial é analisada a SE São Luis 500kV (MA), com caso base do ONS no SAPRE/Anafas e posteriormente também realizada análise mais completa com ATP a título de comparação do comportamento da corrente de curto-circuito e relação X/R .

Palavras-chave: curto circuito, suportabilidade de correntes de curto-circuito em equipamentos, ATP, disjuntores, relação X/R .

ABSTRACT

This work aims to analyze the impacts related to the connection of new power plants in the National Interconnected System (SIN) near SE / UHE Tucuruí (PA), specifically its influence on the substation short circuit level and interrupting capacity of the Circuit breakers. This study was motivated by a recommendation from the National Electric System Operator (ONS), which indicates an overrun of the SE / UHE Tucuruí circuit breakers in the Expansion and Reinforcement Plan (PAR), in order to overcome these equipment by short circuit level and by applying the factor Associated with the X / R ratio compared to the ONS short-circuit studies in the SAPRE / Anafas program. To do this work, we obtained new short-circuit values at the SE / UHE Tucuruí using the ONS base case for the 2018 horizon, based on Eletronorte's computational simulations in the ATP-EMTP program using a more complete set of equipment parameters, obtained from the manufacturer's specifications. In this context, the study presents a modeling of the SE / UHE Tucuruí on the ATP program, the calculation of the short circuit levels from the simulations and comparison of the values obtained with the nominal capacity of the circuit breakers. These values are also compared with the short-circuit values of other substations other than SE / UHE Tucuruí located far from the plant. In particular, the São Luis 500kV (MA) substation is analyzed, with ONS base case using SAPRE / Anafas and also with a more accurate analysis using ATP to compare the behavior of short-circuit current and X / R ratio.

Keywords: short circuit, short-circuit current support in equipment, ATP, Circuit breakers, X / R ratio.

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AIS | <i>Atmospheric Air Insulation</i> |
| ANAFAS | Análise de Falhas Simultâneas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ANSI | American National Standards Institute |
| ATP | <i>Alternative Transients Program</i> |
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica |
| CIGRÉ | <i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i> |
| EMTP | Programa de Transientes Eletromagnéticos |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| GIS | <i>Gas Insulated Substation</i> |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| LT | Linha de Transmissão |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| ONS | Operador Nacional do Sistema |
| SAPRE | Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas |
| SE | Subestação de Energia |
| SF ₆ | Hexafluoreto de enxofre |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| TACS | Transient Analysis of Control Systems |
| TRT | Tensão de Restabelecimento Transitório |
| UHE | Usina Hidrelétrica |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|--|
| f | Frequência |
| I_{ac} | Componente periódica da corrente de curto-circuito |
| I_{cc} | Corrente total de curto-circuito (valor eficaz) |
| I_{dc}/ CC | Componente aperiódica da corrente de curto-circuito |
| I_p | Valor de crista da corrente de curto-circuito calculada; |
| τ | Constante de tempo de decaimento da corrente de curto-circuito |
| t_p | Tempo de crista da corrente de curto-circuito |
| X | Reatância equivalente de Thévenin vistas do ponto de falta |
| R | Resistência equivalente de Thévenin vistas do ponto de falta |
| w | Velocidade angular |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira..... | 12 |
| Figura 2. SIN – Integração Eletroenergética. | 13 |
| Figura 3. Estrutura institucional do setor elétrico..... | 15 |
| Figura 4. Balanço de Energia no SIN em 2015. | 16 |
| Figura 5. Representação Esquemática das Interligações entre Subsistemas..... | 21 |
| Figura 6. Usina Hidrelétrica Tucuruí..... | 24 |
| Figura 7. UHE Belo Monte..... | 26 |
| Figura 8. Unidade Geradora 3 - Sítio Pimental..... | 27 |
| Figura 9. Disjuntor Siemens 145 kV. | 31 |
| Figura 10. Disjuntores. | 32 |
| Figura 11. Detalhe de tela do programa ANAFAS com caso base do SIN..... | 44 |
| Figura 12. Corrente assimétrica de curto-circuito..... | 45 |
| Figura 13. Cálculo da Componente CC..... | 45 |
| Figura 14. Dados da GIS 2ª Etapa. | 49 |
| Figura 15. Modelagem da SE/UHE Tucuruí no ATP. | 51 |
| Figura 16. Corrente de curto-circuito nos disjuntores da SE TUC1..... | 53 |
| Figura 19. Análise de curto-circuito em subestações 500 kV..... | 56 |
| Figura 20. Subestações da Eletronorte nos Estados (a) do Pará e (b) Maranhão. | 57 |
| Figura 26. Corrente de curto-circuito trifásico e sua respectiva componente CC..... | 61 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Densidade demográfica e distribuição de recursos hídricos por região.. | 12 |
| Tabela 2. Energia Armazenada no SIN no ano 2016 | 14 |
| Tabela 3. Fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito pelo critério da manutenção da energia do arco..... | 37 |
| Tabela 4. Valores do fator de assimetria e da componente aperiódica (% CC) em função de X/R e da constante de tempo.. | 39 |
| Tabela 5. Características dos Disjuntores da GIS 1ª Etapa – Valores Nominais Especificados | 49 |
| Tabela 6. Características Gerais do Conjunto GIS 2ª Etapa – Valores Nominais Especificados. | 49 |
| Tabela 7. Disjuntores AIS 1ª Etapa: FA4-525-40. | 51 |
| Tabela 8. Disjuntor da AIS 2ª Etapa – Valores de Placa..... | 51 |
| Tabela 9. Corrente de curto-circuito passante nos disjuntores da SE Tucuruí..... | 52 |
| Tabela 10. Dados de curto-circuito na SE São Luis 500 kV | 61 |
| Tabela 11. Comparação dos resultados SAPRE/Anafas x ATP..... | 63 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| AGRADECIMENTOS | vii |
| RESUMO | ix |
| ABSTRACT | x |
| LISTA DE ABREVIATURAS | xiii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xiv |
| LISTA DE FIGURAS | xv |
| SUMÁRIO | xvii |
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 11 |
| 1.2. Objetivo Geral do Trabalho | 18 |
| 1.2.1 Objetivos Específicos | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1. INTERLIGAÇÃO NORTE NORDESTE (NNE) | 20 |
| 2.2 SE/UHE Tucuruí | 24 |
| 2.3. UHE BELO MONTE | 25 |
| 2.4. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO | 27 |
| 2.4.1. Superação de Disjuntores | 30 |
| 2.4.2. Metodologias de Cálculo de Superação de Disjuntores | 36 |
| 2.4.3. ATP | 39 |
| 2.4.4. ANAFAS e SAPRE | 40 |
| 3. ESTUDO DE CASOS | 42 |
| 3.1. GRÁFICO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO | 44 |
| 4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS | 47 |
| 4.1. SE/UHE TUCURUÍ (PA) | 47 |
| 4.2. RELAÇÃO X/R PRÓXIMAS E DISTANTES DA FONTE | 54 |
| 4.2.1. Escolha da Subestação para simular no ATP | 56 |
| 5. CONCLUSÕES | 63 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 65 |

1. INTRODUÇÃO

A inserção de novos reforços de geração e usinas no Sistema Interligado Nacional (SIN) nas proximidades da Subestação de Energia (SE)/ Usina Hidrelétrica (UHE) Tucuruí devem ser monitoradas e seus impactos avaliados. Com base neste monitoramento o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) recomendou que todos os disjuntores da SE/UHE Tucuruí isolada à gás SF₆ (GIS) fossem substituídos, tendo em vista a superação destes equipamentos por causa do nível de curto-circuito e por causa da razão entre a impedância (X) e reatância (R) do circuito X/R frente aos estudos de curto circuito realizados pelo ONS. Diante desta problemática, este trabalho tem como objeto avaliar especificamente a influência da evolução, para horizonte 2018, no nível de curto circuito da SE/UHE Tucuruí e na capacidade de abertura de seus disjuntores.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil é um país de grandes extensões territoriais que abrangem estados com características geoclimáticas e atividades econômicas distintas. A matriz elétrica do país, conforme mostrado na figura 1, é em sua maioria composto por recursos hídricos, que representam aproximadamente 65% da oferta de energia elétrica (MME, 2016). No sul se encontram locais com maior atividade econômica e grande concentração populacional, o que implica em maior demanda por energia elétrica. Já no norte do país a demanda por energia elétrica não é tão significativa em comparação às demais regiões do país, e esta região possui maior disponibilidade de água conforme apresentada na Tabela1 (SANTOS, 2010).

Para distribuir melhor a energia elétrica entre as diversas regiões do país, promoveu-se a criação de um Sistema Interligado Nacional – SIN no ano de 1998 a partir da Resolução 351/98 do Ministério de Minas e Energia – MME, que autoriza o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS a dar cumprimento as atividades de coordenação e controle da operação da geração e transmissão de energia elétrica nos sistemas interligados de acordo com os procedimentos de rede aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que por sua vez regula e fiscaliza. A Resolução 351/98 está em conformidade com o Decreto 2.655/98 que determina as

normas de organização do ONS e a Lei 9.648/98, que promove a reestruturação das Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobras (ONS, 2017).

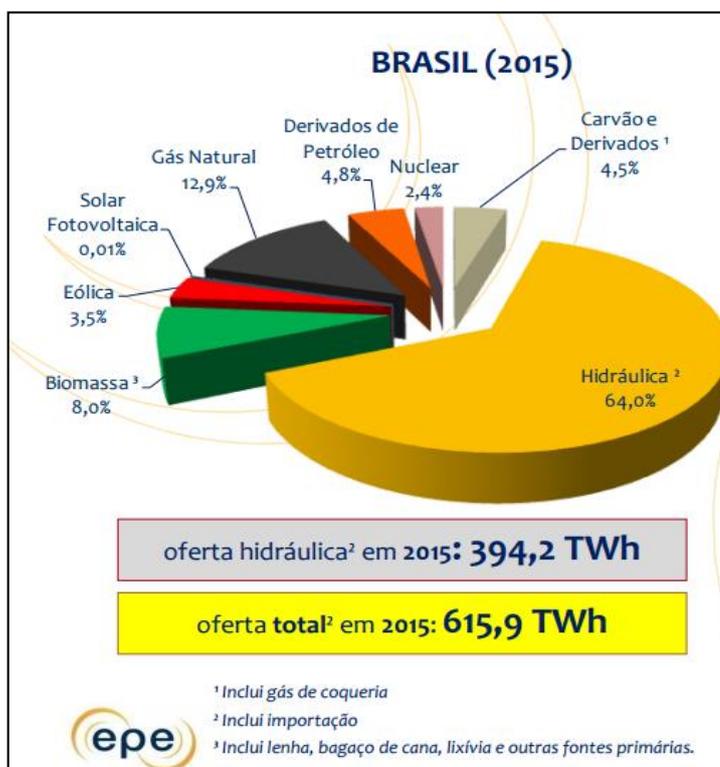


Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira. Fonte: (MME,2016)

Tabela 1. Densidade demográfica e distribuição de recursos hídricos por região. Fonte: SANTOS,2010.

| Região | Densidade demográfica (hab/km ²) | Concentração dos recursos hídricos |
|----------------|--|------------------------------------|
| Norte | 4,12 | 68,5% |
| Centro - Oeste | 8,75 | 15,7% |
| Nordeste | 34,15 | 3,3% |
| Sul | 48,58 | 6,5% |
| Sudeste | 86,92 | 6% |

O SIN é um sistema de geração e transmissão de energia elétrica que é abastecido em sua maioria por usinas hidrelétricas, mas que também é formado por centrais de geração termelétrica, parques eólicos e outros em menor quantidade. É dividido em quatro subsistemas geoeletrônicos interligados: Nordeste (NE), Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), Sul (S) e Norte (N). O sistema (ilustrado na Fig.2) visa a distribuição de energia por todo país de forma mais econômica e segura por meio da integração dos recursos (ONS, 2017).

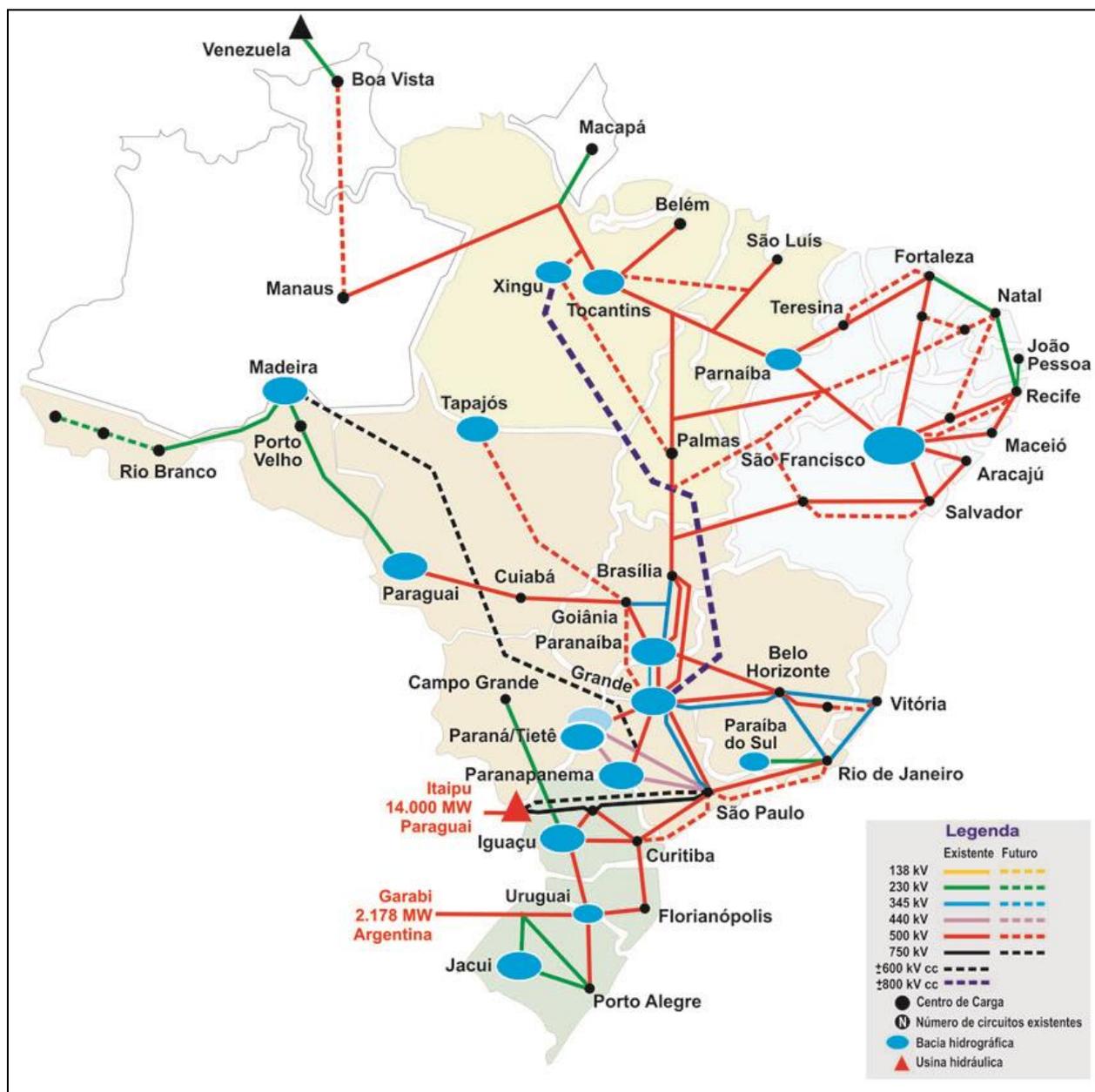


Figura 2. SIN – Integração Eletroenergética. Fonte: (ONS,2017)

O ONS é responsável pela coordenação e supervisão da operação do sistema interligado do Brasil. Sua atividade principal é acompanhar e aferir permanentemente a continuidade e a segurança do fornecimento elétrico em todo o país e também emitir diagnósticos e sugerir ações necessárias para garantir o suprimento da demanda (ONS, 2017).

A interligação elétrica entre subsistemas de diferentes características sazonais permite que se tenha mais flexibilidade nos intercâmbios de energia, possibilitando a ocorrência de um melhor aproveitamento das particularidades de cada região, por meio da operação interligada. Assim sendo a operação interligada proporciona ganhos sinérgicos, eleva a confiabilidade de abastecimento elétrico e reduz o custo total de operação do sistema (EPE, 2010).

No ano 2016, por exemplo, mais uma vez, evidenciou-se a heterogeneidade hidrológica dos subsistemas membros do SIN. Ficou caracterizada uma condição hidrológica mais favorável nos subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e no Sul; enquanto notou-se uma situação hidrológica crítica no Norte, sendo este o pior ano do histórico; e no subsistema Nordeste, uma nova temporada crítica plurianual, como mostrado na Tabela 2 (ONS, 2017).

Tabela 2. Energia Armazenada no SIN no ano 2016. Fonte: (ONS, 2017)

| Subsistemas | Part. % no Armazenamento do SIN | Energia Armazenada (EAR) - % da EAR máximo | |
|-------------|---------------------------------|--|------------|
| | | 31/12/2015 | 31/12/2016 |
| SE/CO | 70% | 29,8% | 34% |
| Sul | 7% | 98,4% | 60% |
| Nordeste | 18% | 4,9% | 16% |
| Norte | 5% | 15,4% | 19% |

Em 2004, com a iniciação do Novo Modelo do Setor Elétrico, que tinha por principais metas garantir a segurança no suprimento elétrico; promover a modicidade tarifária e promover programas de universalização da energia elétrica e a inserção social (como, por exemplo, o Luz para Todos). Este novo modelo devolveu ao Estado o encargo de realizar o planejamento do setor de energia elétrica. Os setores de transmissão e distribuição são totalmente regulamentados, e a produção das geradoras é negociada no mercado livre. A Figura 3, a seguir, retirada do Atlas de Energia Elétrica (BRASIL, 2008) reproduz a atual estrutura institucional do setor

elétrico brasileiro, e a Figura 4 mostra o balanço energético do SIN no ano de 2009 (ONS, 2017).

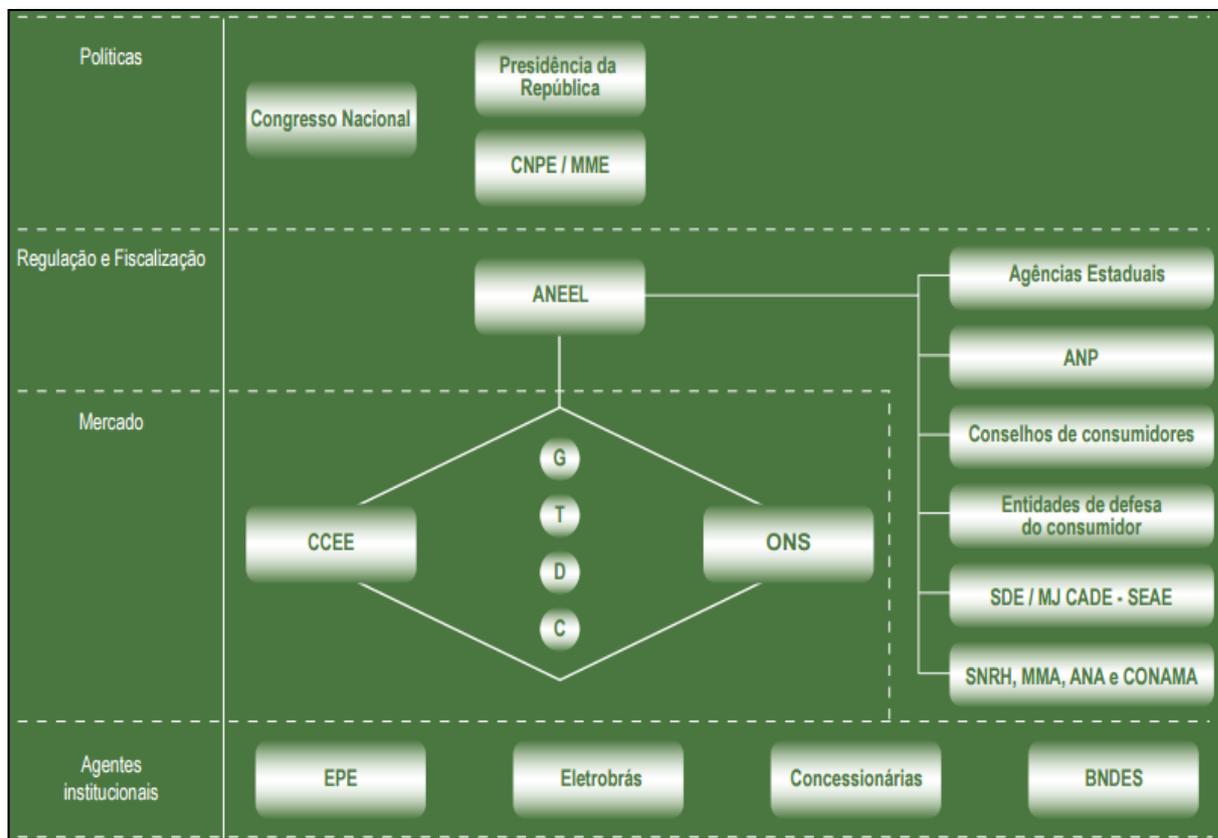


Figura 3. Estrutura institucional do setor elétrico. Fonte (BRASIL, 2008)

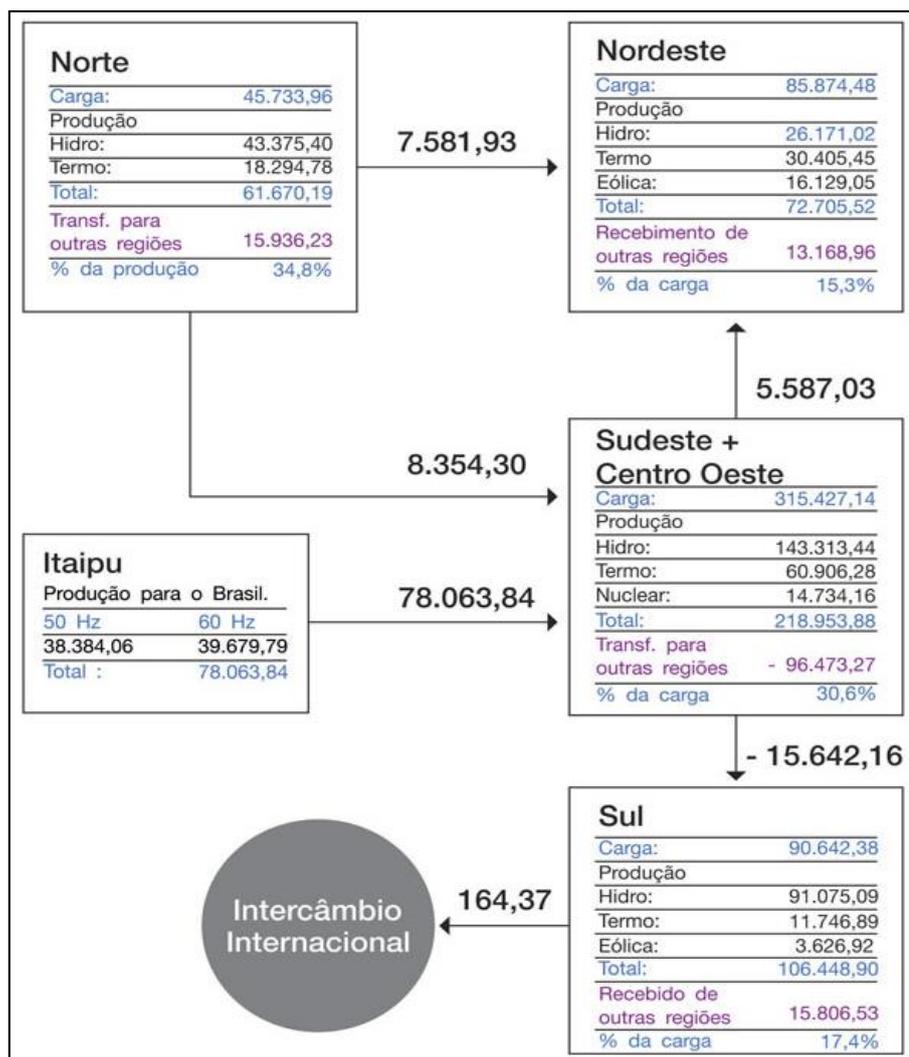


Figura 4. Balanço de Energia no SIN em 2015. Fonte: (ONS, 2017)

O atual modelo do SIN promoveu a descentralização das concessões à poucas empresas, o que permitiu a instalação de novas usinas térmicas, parques eólicos e fotovoltaicos, nas proximidades dos grandes centros de carga do país.

Grande parte destas mudanças não foram previstas anteriormente no planejamento de longo prazo, e este novo processo de acesso à rede de transmissão ocasiona o aumento do nível das correntes de curto-circuito nas subestações localizadas próximas aos pontos de conexão das novas gerações. Tendo em vista que estes novos valores de corrente não estavam previstos, comumente tem-se acarretado a superação de equipamentos (MONTEIRO, 2005).

Como o SIN está em constante expansão e crescimento da demanda por energia, novos reforços e ampliações sempre são necessários. Dado o início da

entrada da UHE Belo Monte (11.233 MW de potência instalada) em operação a partir de janeiro de 2016, bem como outros empreendimentos próximos à SE/UHE Tucuruí, localizada no subsistema Norte, é relevante o estudo de impactos destas cargas em equipamentos instalados na rede de transmissão da respectiva subestação. Alguns dos outros empreendimentos previstos de entrada no mesmo subsistema incluem: UHE São Luiz do Tapajós (8.040MW), UHE Jatobá (2.333MW), UHE Marabá (1.850MW), UHE Serra Quebrada (1.328MW), LT Tucuruí – Marituba, entre outros. O foco deste trabalho se dará nos impactos da entrada de geração nos níveis de curto-circuito da UHE/SE Tucuruí, e conseqüentemente, na eventual superação dos disjuntores da mesma.

Durante o planejamento da expansão do sistema de transmissão devem ser avaliados os impactos sistêmicos da entrada em operação das novas instalações nos equipamentos terminais existentes (disjuntores, chaves seccionadoras, bobinas de bloqueio e transformadores de corrente). A análise da superação destes equipamentos está sob responsabilidade do ONS de acordo com o que estabelecem a Resolução Normativa nº 443 de 26/07/2011 e a Resolução Normativa nº 643 de 16/12/2014 da ANEEL (ANEEL, 2011) (ANEEL, 2014).

O Plano de Ampliações e Reforços (PAR) e o Plano de Modernização de Instalações (PMI) expõe a visão do ONS a respeito das ampliações e dos reforços da rede básica, necessários para manter o desempenho satisfatório da rede e garantir o pleno funcionamento do mercado de energia elétrica dentro do horizonte de três anos. Logo, o PAR e o PMI consistem no detalhamento dos estudos de planejamento da expansão dos sistemas de transmissão, de forma a identificar os prazos de necessidade de entrada em operação das ampliações e reforços no SIN. Assim, quando o objetivo for a manutenção do serviço público prestado, a intervenção deve ser classificada como melhoria (PMI). Quando visar aumentar o serviço prestado, será classificada como reforço (PAR) (ANEEL, 2011).

Todos os reforços devem ser apresentados pelo ONS no PAR, a ser encaminhado ao Ministério de Minas e Energia (MME). Desta forma, o Ministério elaborará o plano de outorgas da transmissão determinando quais as instalações devem ser licitadas e quais existentes serão reforçadas, impedindo desta forma, a existência de reforços em planos distintos (ANEEL, 2011).

No PMI constam as intervenções classificadas como melhorias em instalações de transmissão sob responsabilidade de transmissoras, além de intervenções que devem ser implementadas pelas distribuidoras em instalações sob sua responsabilidade e as intervenções que devem ser implementadas pelas geradoras em instalações sob sua responsabilidade (ANEEL, 2011).

Tanto o PAR quanto o PMI são elaborados anualmente e possuem um horizonte de três anos, compreendendo o período entre o primeiro e o terceiro ano subsequentes ao ano de elaboração dos mesmos (ANEEL, 2011).

1.2. Objetivo Geral do Trabalho

Apresentar o contexto da expansão do sistema próximo a UHE Tucuruí, bem como a modelagem e os estudos realizados para a simulação de curto-circuito nas barras da SE Tucuruí, afim de estudar a capacidade de abertura de disjuntores com a variação da relação X/R . Dados os altos valores de X/R verificados, este trabalho também se propõe a comparar os resultados com ocorrência de curto circuito em subestações distantes de usinas por meio da análise computacional dos mesmos nas ferramentas Anafas e ATP.

1.2.1 Objetivos Específicos

O desenvolvimento dos objetivos abaixo listados é apresentado em ordem cronológica de execução do presente trabalho.

- Proceder a concepção analítica do fenômeno de curto-circuito de subestações considerando a localização próxima e distante à UHE e seus respectivos efeitos nos disjuntores.
- Abordar as características de atuação de disjuntores diante de curtos-circuitos a partir de noções gerais acerca do equipamento, analisando nos programas ATP e Anafas, as solicitações que o mesmo estará submetido;
- Apresentar a modelagem computacional das Subestações em estudo;
- Exibir os resultados numéricos das correntes de curto-circuito passante pelos disjuntores durante as simulações computacionais no ATP e no

SAPRE e as variações de parâmetros de acordo com a localização das subestações;

- Apresentar as solicitações de curtos-circuitos nos disjuntores, as diferenças nos valores de X/R de acordo com a localização e o programa utilizado para análise.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos principais.

O Capítulo 1 é a introdução com a contextualização e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, onde são tratados assuntos conceituais referentes ao Sistema Interligado Nacional, a área de interesse em estudo, o caso específico de curto circuito e suas influências nos disjuntores e estudo de caso de ensaio de curto-circuito nos disjuntores da SE/UHE Tucuruí, sistema Norte-Nordeste e SE São Luis.

O capítulo 3 trata dos estudos dos casos e aspectos técnicos da metodologia adotada.

O capítulo 4 apresenta os resultados das simulações de curto-circuito e breve análise da capacidade de atuação dos disjuntores em cada situação.

No Capítulo 5 são explanadas as conclusões deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo prover uma visão geral acerca do estado da arte na análise de curto-circuito e capacidade de atuação de disjuntores em subestações próximas às usinas hidrelétricas, neste caso em específico a UHE Tucuruí (PA). A elaboração de uma abordagem breve dos temas em estudo permite a contextualização do trabalho desenvolvido.

2.1. INTERLIGAÇÃO NORTE NORDESTE (NNE)

O subsistema Norte é composto pelos estados do Pará, Tocantins, Maranhão, Amazonas, Amapá e, posteriormente, Roraima passará a fazer parte. O subsistema é abastecido em sua maioria por aproveitamentos hidrelétricos (cerca de 97%) e o restante se dá por gerações térmicas e eólicas. A Usina Hidroelétrica de Tucuruí é a principal no abastecimento do subsistema. Durante o período seco o Norte importa energia dos demais subsistemas enquanto que durante o período úmido exporta energia para os mesmos. A malha interligada da região Norte é constituída por um sistema de transmissão da Rede Básica com cerca de 11.500 km em 500 kV e 3.600 km em 230 kV. Até dezembro de 2014 a capacidade instalada do subsistema Norte era de 13.500 MW, dos quais 9.700 MW eram de UHE do estado do Pará (NERI, 2015).

O subsistema Nordeste é composto pelos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Este subsistema corresponde à cerca de 14% do consumo do SIN e sua geração se dá em sua maioria por geração hidráulica, mas também é composto por gerações eólicas e térmicas. Seu abastecimento é complementado pelos excedentes importados do Norte e Sudeste/Centro-Oeste. Em dezembro de 2014, a capacidade instalada do subsistema Nordeste era aproximadamente 21.000 MW, dos quais 10.900 MW em usinas hidráulicas e 3.500 MW em eólicas. A maior parte dos aproveitamentos hidráulicos está localizada nos estados da Bahia e Alagoas e a geração eólica distribuída principalmente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia (EPE, 2015).

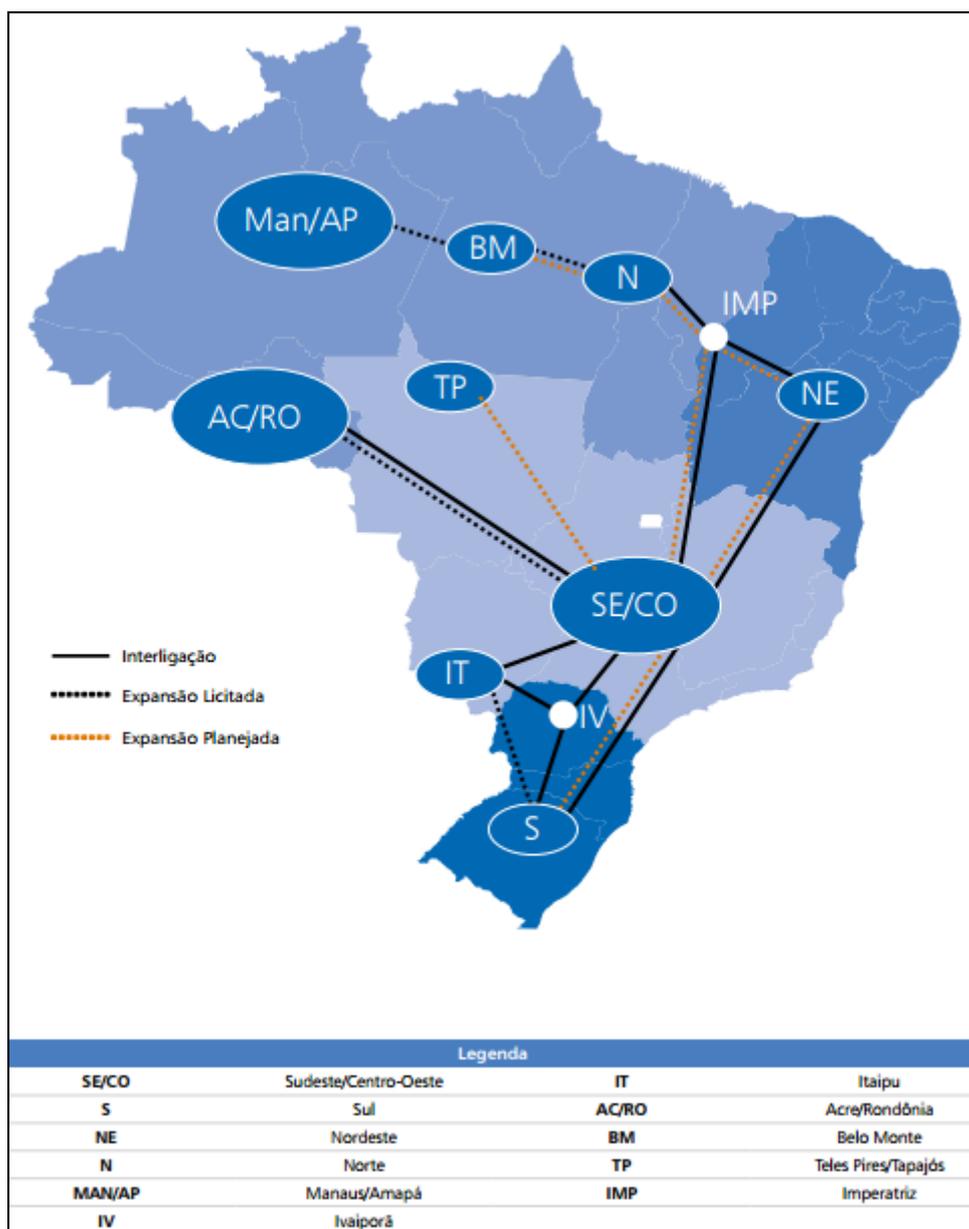


Figura 5. Representação Esquemática das Interligações entre Subsistemas. Fonte: (EPE, 2010)

O estudo de impactos de entrada de reforços na região da interligação Norte-Nordeste é de suma importância para analisar a suportabilidade do sistema de transmissão, visto que os equipamentos instalados na rede de transmissão foram especificados para uma configuração diferente da atual e das futuras. A SE/UHE Tucuruí possuía uma linha de transmissão inicialmente radial. Com a expansão do SIN foram acrescentadas novas linhas de transmissão na região, que implicam no aumento do nível de curto-circuito do local.

Atualmente a interligação Norte-Nordeste é composta pelas linhas de transmissão em 500 kV: Presidente Dutra – Boa Esperança; Presidente Dutra – Teresina C1 e C2; pela LT 500 kV Colinas – Ribeiro Gonçalves – São João do Piauí – Sobradinho; e pela LT 500 kV Colinas – Ribeiro Gonçalves – São João do Piauí – Milagres. Esse estágio atual da interligação é mostrado na Figura 6.

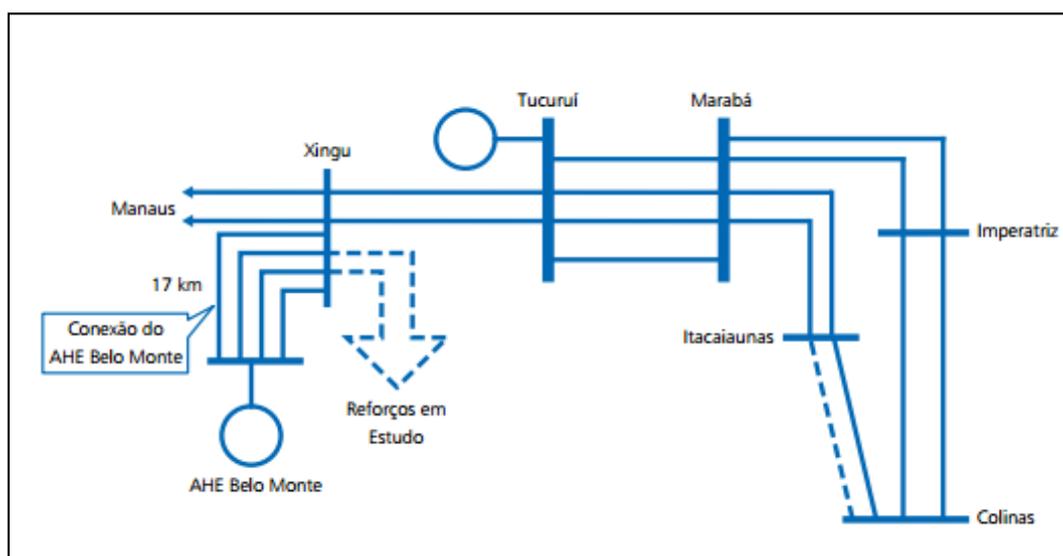


Figura 6. Conexão do AHE Belo Monte na SE Xingu. Fonte: (EPE, 2010)

O aumento médio anual da carga de energia do SIN, no horizonte decenal (2009-2019), é de cerca de 3.300 MW_{méd}, o que representa uma taxa média de expansão de 5,1% ao ano. A capacidade instalada no SIN no início do estudo (2009) foi de 103.598 MW, evoluindo para 167.044 MW em dezembro de 2019, com destaque da elevação da participação da região Norte, onde estão localizados os sistemas AC/RO, Manaus/Amapá, Belo Monte e Teles Pires/Tapajós, cuja capacidade instalada em relação ao SIN passa de 10%, em 2010, para 24% em 2019, totalizando aproximadamente 28.800 MW de expansão (EPE, 2010).

Em meio as principais atualizações no SIN no horizonte 2019, destacam-se a conexão de grandes usinas na região amazônica previstas no programa de geração e as conseqüentes ampliações das interligações regionais a partir do ano de 2015. Dentre elas, em especial, citam-se as instalações associadas à UHE Belo Monte, às usinas do rio Teles e às usinas do rio Tapajós (EPE, 2010).

Os principais obstáculos da expansão do SIN atualmente se devem em grande parte ao atraso de obras do sistema de transmissão para escoar o acréscimo de energia gerada. A empresa espanhola ABENGOA, por exemplo, está em processo de recuperação judicial e não cumpriu prazos de obras importantes no SIN brasileiro. Desta forma, haverá uma restrição de soma igual a 6.000 MW em relação ao fluxo no primeiro Bipolo de Belo Monte conjugado com o fluxo na interligação Norte – Sul (ONS, 2017).

A ANEEL em seu relatório de acompanhamento diferenciado de empreendimentos de expansão da rede básica, acompanhados no período de janeiro a março de 2017, a Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade – SFE - apresenta uma gama de dados acerca dos empreendimentos que possuem maior risco de impactar a operação do SIN. Alguns exemplos aplicáveis neste estudo são a linha de transmissão 500 kV Tucuruí II - Itacaiúnas e a linha de transmissão 500 kV Itacaiúnas - Colinas C2, antes prevista para ser entregue em 2018, já está postergada para o ano de 2019 (ANEEL, 2017/02).

Devido às dificuldades financeiras da empresa espanhola Isolux houve atraso nas obras, que agora realiza negociações com órgãos regulatórios do Brasil para atingir a capacitação da Linhas de Itacaiúnas Transmissora de Energia, que segundo a ANEEL ainda não foram satisfatórias do ponto de vista da retomada da execução da obra. Logo, a previsão de entrada em operação das instalações da referida linha de transmissão não é mais possível de ser atingida. A SFE considera a estimativa de entrada em operação com base na deliberação do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico - CMSE, que é janeiro de 2019. Diante deste cenário, a ANEEL iniciou um processo para apuração das falhas e transgressões ao contrato de concessão e à legislação em vigor (ANEEL, 2017/02).

2.2 SE/UHE Tucuruí

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí é atualmente a maior usina hidrelétrica totalmente brasileira com potência instalada de 8.370 MW – até a entrada total da UHE Belo Monte que terá 11.233 MW. Construída em duas etapas, a UHE Tucuruí está localizada no Rio Tocantins, no município de Tucuruí no Estado do Pará.



Figura 6. Usina Hidrelétrica Tucuruí. Fonte: ELETRONORTE, 2017.

As obras da primeira casa de força começaram em na década de 1970 durante o regime militar, continham potência instalada de 4.245 MW - com 12 unidades geradoras de 350 MW e duas auxiliares de 22,5 MW – começaram a gerar em 1984 e foram concluídas em dezembro de 1992. No ano de 2007 foi concluída a construção da segunda casa de força, com 11 unidades geradoras de 375 MW e potência instalada total de 4.125MW (ELETRONORTE, 2017) (PINTO, 2012).

A usina inicialmente surgiu da necessidade de abastecer as indústrias de alumínio do Pará, de acordo com os interesses econômicos do governo da época. A UHE Tucuruí é a principal geradora do Sistema Norte-Nordeste e passou a integrar o

SIN em março de 1999 com a conclusão da Interligação Norte-Sul. Interligação que por sua vez permite a preservação de reservatórios hidrelétricos em outras regiões durante o período hidrológico de cheias no Rio Tocantins (PINTO, 2012) (CIDADE, 2017).

A eletricidade gerada em Tucuruí atende os mercados do Pará, Maranhão e Tocantins e também exporta energia para os sistemas Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Os cerca de 3.500 MW médios mensais, são escoados por linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV.

A SE Tucuruí também é dividida em duas partes: a primeira etapa, que chamamos no nosso trabalho de TUC1 e segunda etapa, que chamamos de TUC2. A SE Tucuruí 500 kV apresenta arranjo tipo disjuntor e meio com equipamentos convencionais, isolados a ar (AIS – Air Insulated Substation) e, do lado da geração, é isolada à gás SF₆ (GIS – Gas Insulated Substation).

Na GIS os equipamentos como os disjuntores, as chaves interruptoras, os transformadores de corrente e transformadores de tensão ficam submersos no gás SF₆ dentro de um cubículo metálico aterrado. A AIS utiliza o ar atmosférico como meio isolante. Comparando AIS e GIS pode-se assegurar que a primeira requer um espaço muito maior para sua construção, em torno de dez vezes maior para um mesmo nível de tensão. Subestações GIS possuem custo mais elevado, mas ocupa menor espaço e há um menos desgaste devido a exposição dos equipamentos às condições climáticas (MUZY, 2012).

2.3. UHE BELO MONTE

A Usina Hidrelétrica Belo Monte está localizada no Rio Xingu na região que fica próxima à cidade de Altamira no estado do Pará. Começou a operar no ano de 2016 e sua entrada em operação comercial com sua capacidade máxima está prevista para o ano de 2019. A capacidade de potência instalada é de 11.233,1 MW, dos quais 11.000 MW na casa de força principal (Sítio Belo Monte) e 233,1 MW na casa de força complementar (Sítio Pimental). A usina adicionará ao SIN 4.571 MW médios de energia por ano, ao preço de R\$77,97 por MWh (BRASIL, 2017).

O custo total estimado da UHE Belo Monte é de R\$25,8 bilhões e a mesma é de propriedade do consórcio Norte Energia S.A, que por sua vez é formado por empresas estatais e privadas do setor elétrico, fundos de pensão e de investimento e empresas autoprodutoras (NORTE ENERGIA, 2017).



Figura 7. UHE Belo Monte. Fonte: Norte Energia, 2017.

A primeira turbina iniciou sua operação em abril de 2016 e possui potência instalada de cerca de 611 MW. A UHE conta com mais 17 unidades geradoras que gradualmente estão entrando em operação desde então, com a previsão de término no ano de 2019. Toda energia gerada já está disponível para o SIN. A unidade produz para as distribuidoras que compraram energia em leilão de 2010, atendendo assim 60 milhões de pessoas em 17 Estados do Brasil (BRASIL, 2017).

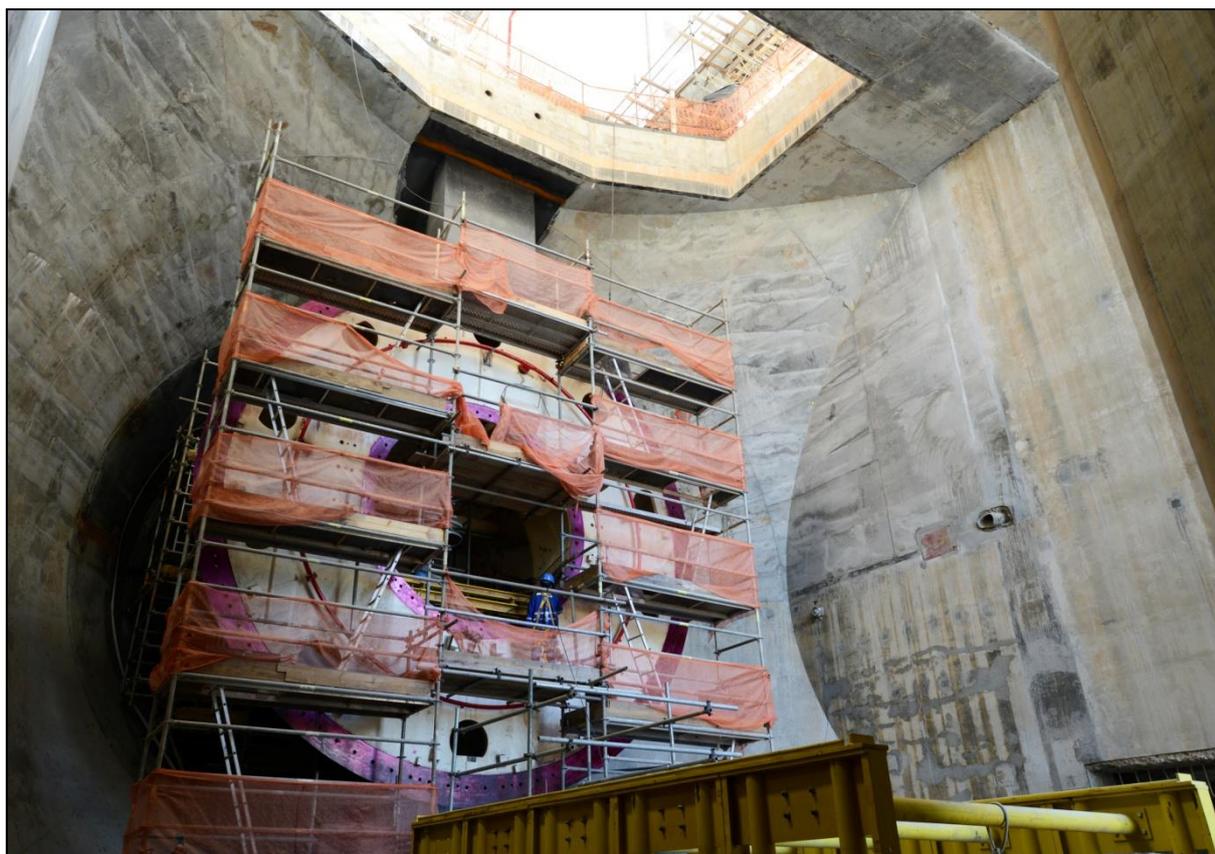


Figura 8. Unidade Geradora 3 - Sítio Pimental. Fonte: Norte Energia, 2017.

Estudos prévios indicavam a conexão do AHE Belo Monte à Rede Básica por meio de dois circuitos de 751 km, em 765 kV, para a SE Colinas, além de um aumento da capacidade de intercâmbio entre Colinas e a região Sudeste de cerca de 7.000 MW. Entretanto, os estudos mencionados foram realizados antes da concepção da SE Xingu em 500 kV no sistema Tucuruí-Manaus-Macapá, licitado em 2008. A SE Xingu está situada a aproximadamente 17 km da usina, e passou a ser a opção para ponto de conexão, envolvendo circuitos mais curtos e na tensão de 500 kV. O Ministério de Minas e Energia – MME - considerou a usina de Belo Monte constituindo um novo subsistema, conectado ao subsistema Norte para os estudos eletroenergéticos do ciclo de planejamento decenal (EPE, 2010).

2.4. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO

Um curto-circuito acontece quando há uma diminuição abrupta da impedância do circuito entre dois pontos de diferentes potenciais provocando um aumento

significativo do valor da corrente. O estudo e simulação das correntes de curto-circuito no sistema de transmissão é de suma importância para planejamento e coordenação da proteção bem como especificação de equipamentos. Esse tipo de análise permite que sejam tomadas medidas necessárias para minimizar as consequências do curto-circuito quando este ocorre, o que inclui a especificação de equipamentos para atuar na interrupção dos circuitos defeituosos e garante que os demais equipamentos do sistema serão capazes de tolerar os efeitos do curto enquanto estes continuarem (SINDER, 2007).

Os curtos-circuitos podem ser caracterizados por sua duração, tipo ou origem, e o valor da corrente durante um curto-circuito depende, em sua maior parte, da fonte e capacidade do sistema. Logo, quando há mudança do sistema de transmissão, os cálculos devem ser refeitos a fim de se verificar se não há superação da suportabilidade de curto-circuito dos equipamentos.

A superação por curto-circuito é dada pela ocorrência de correntes de curto-circuito com magnitudes superiores à nominal dos equipamentos em estudo, em condições normais e de emergência (KINDERMAN, 1997).

Sempre que ocorre um curto-circuito no sistema, a corrente é constituída por duas componentes: uma periódica, geralmente chamada de componente de corrente alternada CA (I_{ac}) (onda senoidal), e uma componente aperiódica, denominada componente de corrente contínua CC (I_{dc}) (exponencial decrescente). Dessa forma, a corrente total de curto-circuito pode ser expressa pela equação (1):

$$I_{cc} = I_{ac} + I_{dc} \quad (1)$$

A componente CA da corrente de curto-circuito é chamada de componente simétrica. A corrente total é chamada assimétrica (DARTAWAN & ST PIERRE, 2003) (JADEJA et. al, 2015).

A componente CC do sinal de onda depende do valor da tensão no momento de ocorrência da falta e decai exponencialmente com o tempo a partir de seu valor inicial como mostra a equação (2). O valor máximo da componente CC ocorre

quando a onda de tensão está nos extremos (valor máximo ou mínimo). Logo, a máxima assimetria ocorre no momento do curto-circuito (FERREIRA, 2007).

$$I_{cc} = I_{cc} \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Onde a constante de tempo τ vale:

$$\tau = \frac{X}{\omega R} \quad (3)$$

Sendo:

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

Onde:

f é a frequência do sistema em Hertz

X e R são a reatância e resistência equivalente de Thévenin vistas do ponto de falta.

A constante de tempo (relação X/R) exerce influência direta na capacidade de interrupção de curto-circuito do disjuntor, visto que quanto maior for este valor, mais lento será o decaimento da corrente (FERREIRA, 2007). Desta forma, para analisar a superação por curto-circuito é necessário avaliar curtos-circuitos monofásicos e trifásicos, verificar se o valor máximo da corrente de curto é superior à magnitude da corrente nominal do disjuntor e também observar se a relação X/R é elevada. Segundo o ONS, para os disjuntores, deve-se avaliar a superação por corrente de curto-circuito simétrica, pela crista da corrente de curto-circuito, por constante de tempo (X/R) e por tensão de restabelecimento transitória – TRT (ONS, 2014).

As quedas de tensão no sistema são proporcionais à magnitude da corrente e aos componentes que transportam a corrente de curto-circuito. Os efeitos desta no sistema podem ser devastadores, uma vez que arcos voltaicos podem surgir nos terminais dos disjuntores, provocar a queima de equipamentos e o rompimento de condutores devido à passagem de corrente muito superior à nominal. O curto-circuito também tem impacto na estabilidade do sistema (GUIMARÃES & NEUMANN, 2009).

As correntes de curto-circuito são monitoradas basicamente com a finalidade de prever os esforços térmicos e eletrodinâmicos provocados pela passagem da corrente, coordenar as proteções da rede e estudar a estabilidade dinâmica do sistema (GUIMARÃES & NEUMANN, 2009).

2.4.1. Superação de Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos elétricos de grande complexidade e suma importância nas subestações de energia elétrica. Isso se deve ao fato do disjuntor que ter por finalidade a interrupção de correntes de curto-circuito em pequenos intervalos de tempo visando evitar danos aos equipamentos, além de estabelecer correntes de falta, interromper correntes de magnitudes muito menores que as nominais e de isolar partes dos sistemas quando colocado na posição aberta, e isso tudo deve ocorrer da forma mais confiável possível (FRONTIN et. al, 2013).

Eles são os dispositivos de manobras mais eficientes na rede de energia elétrica, assim como são também os principais equipamentos de segurança, por possuírem capacidade de abertura e fechamento sob condições normais de carregamento ou sob situações de contingência.

Os primeiros disjuntores eram a óleo ou ar comprimido, mas com o decorrer do tempo e aumento das solicitações elétricas, novas tecnologias surgiram e tornaram a utilização deste tipo quase que obsoleta. Atualmente os disjuntores mais aplicados em sistemas de alta tensão utilizam a técnica de interrupção à vácuo e a SF₆ (FRONTIN et. al, 2013).



Figura 9. Disjuntor Siemens 145 kV. [FRONTIN et. al, 2013.]

Para melhorar o desempenho dos disjuntores, as tecnologias a respeito da fabricação e ensaios destes equipamentos vem evoluindo bastante, bem como as normas para padronização dos mesmos. As mais conhecidas e utilizadas são as normas IEC, ABNT NBR IEC, ANSI, IEEE e Brochuras Técnicas do CIGRÉ (FRONTIN et. al, 2013).

As funções mais frequentemente exercidas pelos disjuntores são a condução de correntes de carga na posição fechada e o isolamento de circuitos ou equipamentos, quando na posição aberto. O disjuntor deve atender rapidamente as solicitações mecânicas de abertura e fechamento quando solicitadas pelo comando. A principal função dos disjuntores é a interrupção de correntes de falta tão

rapidamente quanto possível, de forma a limitar a um mínimo os possíveis danos causados aos equipamentos pelos curtos-circuitos (FRONTIN et. al, 2013).

Outras solicitações as quais os disjuntores estão sujeitos são a interrupção de correntes de magnetização de transformadores e reatores, isolamento de partes do circuito, interrupção das correntes capacitivas de bancos de capacitores e de linhas em vazio. O disjuntor deve também fechar circuitos elétricos em condições normais de carga, quando solicitado e na presença de curtos-circuitos (FRONTIN et. al, 2013).

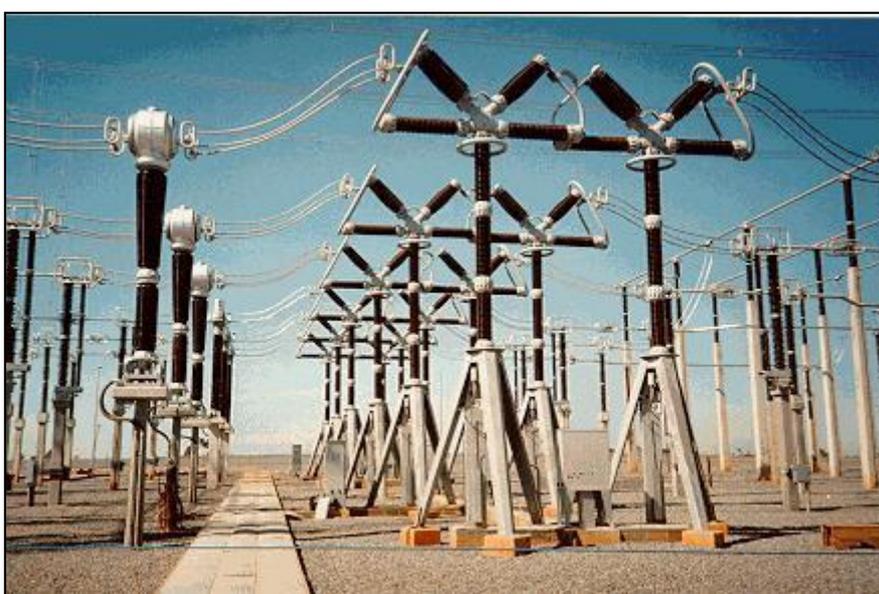


Figura 10. Disjuntores. [CIGRÉ, 2006]

Os disjuntores, bem como os demais equipamentos da rede de transmissão existentes no SIN foram especificados para utilização por um longo prazo. Este período de tempo deve ser suficiente para amortizar os custos de sua aquisição e instalação. Portanto, são dimensionados para suportarem ampliações que porventura venham a ocorrer no sistema ao longo dos anos de sua utilização (FRONTIN et. al, 2013).

Entretanto, o que acontece muitas vezes é que durante o tempo de operação do equipamento acontecem mudanças na configuração do sistema que não haviam sido previstas no momento da especificação do mesmo. Em casos como estes, os equipamentos podem ser submetidos a solicitações estressantes não previstas anteriormente. Tal fato é confirmado, historicamente, na maioria dos sistemas de potência existentes (FRONTIN et. al, 2013).

No que se refere à superação dos disjuntores devido sua capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito, a análise de superação geralmente é examinada, respectivamente, por meio da comparação dos valores das correntes simétricas e assimétricas de curtos-circuitos com a capacidade de interrupção simétrica e assimétrica dos disjuntores. Os valores da corrente assimétrica de curto-circuito são calculados com base no X/R do sistema e no tempo de afastamento dos contatos dos disjuntores. Para realizar uma análise mais minuciosa são utilizados os critérios estabelecidos nos dados de fabricação de cada disjuntor (CARVALHO et. al, 2007).

Quanto a superação devido à suportabilidade na condução da corrente de curto-circuito, a análise é realizada por comparação dos valores da corrente simétrica de curto-circuito que passa pelo disjuntor com o valor da corrente suportável nominal de curta duração (efeito térmico) e os valores de pico da corrente assimétrica de curto-circuito com o valor de crista nominal da corrente suportável (efeito dinâmico) (CARVALHO et. al, 2007).

Os disjuntores devem ser dimensionados para suportarem as ampliações que ocorrerem no sistema elétrico durante sua vida útil. Antes da reestruturação do setor elétrico, parâmetros elétricos, como por exemplo os níveis de curto-circuito eram mais facilmente tratados pelas empresas, visto que os setores de geração e transmissão pertenciam, geralmente a uma mesma empresa. Desta forma, era possível projetar de forma coordenada a expansão da geração e do respectivo sistema de transmissão. Atualmente as transmissoras não detém mais este controle, o que torna o SIN suscetível a casos de superação dos equipamentos quanto a correntes de curto-circuito (CARVALHO et. al., 2007).

Tendo em vista este tipo de ocorrência, a EPE e o ONS disponibilizam publicamente os arquivos (casos base) no formato do programa Anafas para que as empresas acompanhem a evolução dos níveis de curto-circuito, bem como a superação dos equipamentos. Uma vez identificada a superação, os agentes comunicam o ONS para a tomada de providências cabíveis.

Com a crescente evolução da potência instalada no SIN e da sua respectiva abrangência em linhas de transmissão pelo território brasileiro, surgem demandas aliadas à adequação e ampliação destas linhas aos novos parâmetros como por

exemplo nível de curto-circuito e corrente da rede. O processo de superação de equipamentos de alta tensão se dá quando as alterações do SIN implicam em mudanças nos parâmetros da rede e estas solicitações elétricas passarão a não mais serem suportadas pelos equipamentos em operação. Estas solicitações culminam então na substituição destes equipamentos de forma antecipada à entrada da energia no SIN ou em mudanças alternativas para a suportabilidade da energia em questão (CARVALHO et. al., 2007).

Um equipamento é considerado superado quando os requisitos impostos pela rede são iguais ou superiores a qualquer das suas capacidades nominais. Em caso de ser detectada a superação de alguma característica nominal dos equipamentos, deve ser providenciada a sua substituição ou estudadas medidas que evitem ou pelo menos adiem a troca destes (ONS, 2014).

A aplicação de medidas mitigadoras para a superação devem ser fruto de uma investigação detalhada sobre a sua viabilidade técnica e econômica. Questões operativas da rede também devem ser levadas em consideração, como por exemplo desligamentos de rede, que muitas vezes, dependendo da localidade, podem ser inviáveis. De modo geral, uma vez caracterizado o indicativo de superação de algum equipamento pelo ONS, por meio do relatório anual de estudos de curto-circuito, cabe aos agentes de transmissão o detalhamento da análise, uma vez que estas particularidades fazem parte do conhecimento exclusivo dos mesmos. Os agentes devem avaliar soluções mitigadoras, com base nos aspectos técnicos, econômicos e operacionais, intrínsecos a cada caso (ONS, 2014).

Outra questão relevante que deve ser levada em conta na decisão de se aplicar medidas mitigadoras é a eficiência destas. Em outras palavras, baseando-se nas previsões de crescimento da rede e de sua carga, deve-se investigar até qual horizonte (ano) a medida mitigadora seria eficaz. Um breve período para o qual a medida mitigadora seria eficiente pode inviabilizá-la, pois haveria a necessidade de substituição dos equipamentos. Tal situação poderia corresponder a um custo global superior à troca imediata dos equipamentos superados sem a adoção de medidas mitigadoras.

Estudos realizados para avaliar os impactos da entrada em operação da UHE Belo Monte e outros empreendimentos localizados na região Norte, onde a mesma

está inserida, indicaram a superação dos disjuntores 50 kA da Subestação Tucuruí 500 kV por relação X/R a partir do ano 2017 e por curto-circuito no ano de 2018, sobretudo na 1ª etapa da UHE Tucuruí, conforme nota técnica emitida pelo ONS (ONS, 2014).

As providências que o ONS solicitou em carta de referência à Eletrobras Eletronorte, que é responsável pela área de concessão em questão, implicam em medidas que requerem elevados volumes de recursos – em torno de 500 milhões de reais - e prazos de execução relativamente longos, que podem ultrapassar quatro anos. Isto se deve ao fato da quantidade de disjuntores existentes superados na UHE/SE Tucuruí 500 kV, 1ª e 2ª etapas (Carta ONS 1223/100, 2016).

Desta forma, o Departamento de Planejamento da Expansão da Transmissão da Eletrobrás Eletronorte julgou adequada e necessária uma análise técnica mais acurada das solicitações elétricas que os disjuntores estariam submetidos e de soluções alternativas de limitação de curtos-circuitos na UHE/SE Tucuruí, visando apresentar à diretoria uma alternativa de evitar a superação dos equipamentos ou, pelo menos, viabilizar a postergação de tais obras (Relatório EPPT, 2017).

De acordo com DAS (2009) um disjuntor próximo ao gerador deve considerar uma maior corrente de falta, visto que geralmente, a contribuição do gerador para o curto-circuito dá origem a uma assimetria maior do que o mesmo em um sistema distante do gerador. Isto ocorre porque os geradores grandes possuem uma relação X/R maior em comparação com as relações X/R de curto-circuito nos sistemas de transmissão.

O padrão ANSI/ IEEE Std. C37.010 adverte que as constantes de tempo de componente CC mais longas podem provocar problemas em disjuntores do tipo SF₆. A janela de interrupção, que é a diferença de tempo entre os tempos de arco mínimo e máximo, pode ser excedida devido ao zero de corrente atrasado, e culminar em uma energia de arco muito maior que a suportada pelo disjuntor. Este padrão é um guia de auxílio para seleção de disjuntores de alta tensão CA em sistemas de energia elétrica. Os disjuntores de alta tensão têm sua capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito limitada operando deste modo, a menos que tenha sido projetado considerando estes efeitos (ANSI/IEEE C37.010,1999).

2.4.2. Metodologias de Cálculo de Superação de Disjuntores

Metodologia de Cálculo de Superação pela Crista da Corrente de Curto-Circuito:

Caracterizada pela ocorrência de magnitudes superiores àquelas definidas como nominais para os equipamentos em análise. Pode ser determinada em função da corrente de curto-circuito simétrica e da constante de tempo da rede, determinadas nos estudos de curto-circuito como mostra a equação 5 (ONS, 2014).

$$I_p = I_{cc} \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{-\frac{t_p}{\tau}}\right) \quad (5)$$

Onde:

I_p é o valor de crista da corrente de curto-circuito calculada [kA];

I_{cc} é o valor eficaz da corrente de curto-circuito calculada nos estudos de cc [kA];

t_p é o tempo de crista da corrente de curto-circuito [ms] (8,33 ms para 60 Hz ou 10 ms para 50 Hz);

τ é a constante de tempo calculada para a barra onde o equipamento é instalado [ms].

Metodologia de Cálculo de Superação por Constante de Tempo (X/R):

O ONS adota um critério próprio de superação por relação X/R devido à falta de tradição e complexidade dos fenômenos envolvidos neste tipo de análise de superação de disjuntores por X/R (ONS, 2014).

O simples fato da relação X/R da rede ultrapassar a relação X/R especificada para o disjuntor não caracteriza necessariamente que o equipamento está superado. A superação por relação X/R é apontada pela análise deste parâmetro em conjunto com a amplitude da corrente de curto-circuito simétrica. Conforme proposto pelo ONS em 2003, para cada faixa pré-definida de X/R da rede, há um fator de redução da corrente nominal de curto-circuito do disjuntor que permite a operação segura do equipamento, mesmo em condições de rede com X/R acima do valor normalizado. Os valores originais desse fator de redução são apresentados na tabela à seguir (ONS,2014).

Tabela 3. Fatores de redução da corrente nominal de curto-circuito pelo critério da manutenção da energia do arco. Fonte: ONS, 2014.

| τ (ms) | $0 < t_{op} \leq 10$ | $10 < t_{op} \leq 27,5$ | $27,5 < t_{op} \leq 44,5$ |
|-------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| 45 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 60 | 0,896 | 0,881 | 0,883 |
| 75 | 0,847 | 0,820 | 0,818 |
| 120 | 0,767 | 0,722 | 0,708 |

Nota: τ - constante de tempo derivada da relação entre a indutância e a resistência de curto-circuito equivalente da rede no ponto considerado.

t_{op} - tempo de abertura do disjuntor em ms.

A relação entre o pico de corrente e o valor eficaz da corrente simétrica é denominado fator de assimetria (a).

$$I_p = I_{cc}(\text{eficaz}) \times a \quad (6)$$

Sendo:

$$a = \frac{I_p}{I_{cc}} \quad (7)$$

Das equações (6) e (7), tem-se:

$$a = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (8)$$

Onde:

$t = 8,33 \text{ ms}$ (60Hz) ou $t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz)

A tabela 4 apresenta alguns valores do fator de assimetria em função de valores da relação X/R e da constante de tempo de circuitos a 60Hz. Esta tabela foi retirada de FRONTIN et. al, 2013, onde também são indicados os valores percentuais da componente CC no instante de separação dos contatos dos disjuntores.

Tabela 4. Valores do fator de assimetria e da componente aperiódica (% CC) em função de X/R e da constante de tempo. Fonte: FRONTIN et. al, 2013.

| X/R | τ (ms) (para $\omega = 377 \text{ rd/s}$) | f (fator de assimetria) (para $t = 8,33 \text{ ms}$) | % CC | Tempo de separação dos contatos (ciclos) |
|----------|--|--|------------|---|
| 12 | 32 | 2,5 | 46 27 | 1,5 2,5 |
| 17 | 45 | 2,59 | 57 40 | 1,5 2,5 |
| 20 | 53 | 2,62 | 62 46 | 1,5 2,5 |
| 30 | 80 | 2,69 | 73 59 | 1,5 2,5 |
| 40 | 106 | 2,72 | 79 67 | 1,5 2,5 |
| 50 | 133 | 2,74 | 83 73 | 1,5 2,5 |
| 60 | 159 | 2,76 | 85 77 | 1,5 2,5 |
| 100 | 265 | 2,78 | 91 85 | 1,5 2,5 |
| ∞ | ∞ | 2,83 | 100 100 | 1,5 2,5 |

Metodologia de Cálculo de Superação por TRT:

A superação do disjuntor por TRT é caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade dielétrica ou térmica do meio de extinção do arco, seja

por magnitude ou por taxa de crescimento. São levados em consideração para análise os valores e envoltórias propostos pela Norma IEC 62271-100. Para este tipo de análise são considerados os disjuntores que possuem níveis de curto-circuito superiores a 85% do valor nominal do equipamento. As simulações de TRT nesta etapa devem ser realizadas para uma representação simplificada da rede, uma vez que desta forma o estudo tende a produzir resultados mais conservadores. O cálculo da TRT é uma tarefa complexa, os critérios e metodologia adotados pelo ONS e Agentes para análise de TRT são bem específicos e devem utilizar um programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos, como o ATP/EMTP por exemplo (ONS, 2014).

2.4.3. ATP

O ATP (Alternative Transients Program) é o programa mais utilizado mundialmente para a simulação de fenômenos transitórios. O ATPDraw™ é um pré-processador gráfico e orientado por mouse para a versão ATP do Programa de Transientes Eletromagnéticos (EMTP). O programa é utilizado pela grande maioria das concessionárias de energia do Brasil e do mundo (PRIKLER et. al, 2009).

Com o ATPDraw, o usuário pode construir o modelo digital do circuito a ser simulado, então o ATPDraw gera o arquivo de entrada para a simulação ATP no formato apropriado. O nome do nó de circuito é administrado pelo ATPDraw, portanto, o usuário precisa dar um nome somente para nós com interesse especial (PRIKLER et. al, 2009).

O programa ATPDraw é livre de royalties e pode ser baixado gratuitamente em vários sites da Internet. Entretanto o licenciamento ATP é obrigatório antes de obter permissão para baixar o programa e a documentação da Internet ou para receber materiais relacionados com ATP de outros usuários (PRIKLER et. al, 2009).

A licença do ATP também é gratuita para membros de seus grupos de usuários oficiais como o European EMTP-ATP Users Group (EEUG, 2017).

O programa ATP inclui variáveis de interesse nas redes de energia elétrica como funções do tempo, normalmente iniciadas por alguns distúrbios. A regra trapezoidal de integração é usada para resolver as equações diferenciais dos componentes do sistema no domínio do tempo. As condições iniciais não-zero

podem ser determinadas automaticamente ou podem ser inseridas pelo usuário para componentes mais simples (PRIKLER et. al, 2009).

O programa também possui muitos modelos, como máquinas rotativas, transformadores, para-raios, linhas de transmissão e cabos. A capacidade de intercalação para os módulos do programa TACS e MODELS permite a modelagem de sistemas de controle e componentes com características não-lineares, como arcos e corona. Sistemas dinâmicos sem rede elétrica também podem ser simulados usando modelagem do sistema de controle TACS e MODELS (PRIKLER et. al, 2009).

São aceitos distúrbios simétricos ou não-simétricos, como falhas, sobretensões e vários tipos de operações de comutação, incluindo a comutação de válvulas. Também são aceitos cálculos da resposta em frequência de redes fasoriais usando o recurso frequency scan e também harmônicas de domínio de frequência usando método de injeção de corrente harmônica (harmonic frequency scan) (PRIKLER et. al, 2009).

O ATP é um sistema de programa universal para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica. Com este programa digital, redes complexas e sistemas de controle de estrutura arbitrária podem ser simulados. O ATP possui amplos recursos de modelagem e recursos importantes adicionais além da computação de transitórios. Foi desenvolvido continuamente através de contribuições internacionais nos últimos 20 anos (EEUG, 2017).

Graças à grande propagação do ATP a simulação transitória de redes elétricas é frequentemente empregada nos dias de hoje. A possibilidade de modelagem da rede com grande grau de sofisticação que estes casos exigem, dá aos usuários uma imensa vantagem e atrai olhares para realizar uma simulação com esta ferramenta (ONS, 2015).

2.4.4. Análise de Falhas Simultâneas - ANAFAS e Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas – SAPRE

O SIN apresenta características singulares, com evidência nas longas distâncias entre as gerações e os grandes centros consumidores. Considerando estas

características o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) desenvolveu um conjunto próprio de programas de análise de redes que estão entre os mais usados no país, visto que o mesmo é celebrado pelo grupo Eletrobrás. Estes programas incluem aspectos como fluxo de potência, curto circuito, estabilidade, confiabilidade e harmônicos. O SAPRE (Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas) é um destes programas, utilizado para integração de programas de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência, sendo compatível com os principais gerenciadores de bancos de dados comerciais (CEPEL, 2017).

O SAPRE é a interface gráfica comum à alguns programas do Cepel, o que inclui o programa computacional ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) que é utilizado para cálculo de curtos-circuitos na rede elétrica e que permite a execução de grande número de faltas simultâneas contidas na mesma base de dados.

O ANAFAS também permite o estudo de superação de disjuntores, a obtenção de equivalentes de curto-circuito e balanço da evolução dos níveis de curto. É desenvolvido pelo Cepel sob a linha de pesquisa “Planejamento, Operação e Análise de Redes Elétricas” (CEPEL, 2017).

O ANAFAS realiza cálculos de curto-circuito e geralmente utiliza-se o SAPRE como sua interface gráfica. Os principais integrantes do setor elétrico brasileiro utilizam o SAPRE e o ANAFAS. Entre eles pode-se citar as empresas do grupo Eletrobrás, o ONS, a EPE, universidades e diversos agentes geração, transmissão e distribuição. O ONS utilizou o ANAFAS e o SAPRE para os estudos que culminaram na indicação da superação dos disjuntores da SE/UHE Tucuruí.

3. ESTUDO DE CASOS

Os estudos de curto-circuito realizados pelo ONS utilizam-se do programa computacional do Cepel chamado ANAFAS. Entretanto a modelagem foi efetuada no programa ATP, visto que este permite uma análise mais acurada, sendo os equivalentes de curtos-circuitos obtidos com o programa ANAFAS.

A configuração para análise de uma subestação próxima à geração abrangerá a UHE/SE Tucuruí, 1ª e 2ª etapas e linhas de transmissão em suas proximidades. A configuração para análise da subestação distante da geração abrangerá o sistema Norte-Nordeste na avaliação do ANAFAS/SAPRE e posteriormente será realizada a escolha de uma subestação inserida neste sistema para simulação de curto-circuito e análise mais precisa no programa ATP.

A modelagem partiu do Caso base ONS BR1812PY Horizonte 2018 com obras e usinas, utilizando-se de equivalentes de curtos-circuitos obtidos do caso ONS.

Os parâmetros elétricos foram retirados dos dados de placa dos equipamentos em análise, que contêm as características elétricas garantidas pelos fabricantes, com base nos requisitos das especificações técnicas. Para as simulações, os seguintes casos foram analisados:

Caso Base 1 – SE/UHE TUCURUÍ (PA) - ATP

Utilizou-se de uma modelagem da Eletrobras Eletronorte com aperfeiçoamento da modelagem de máquinas de Tucuruí, por meio da máquina de Modelo 59 do ATP. A máquina de modelo 59 inclui em seus parâmetros reatâncias variáveis – X_d (reatância síncrona do eixo direto), $X'd$ (reatância transitória do eixo direto) e $X''d$ (reatância subtransitória de eixo direto). Infere-se que com esta modelagem de máquinas os resultados da análise de curto-circuito sejam mais precisos, uma vez que tornam a simulação mais completa e aproximada do caso real. A modificação foi feita a partir do caso base do ONS Horizonte 2018 com obras e usinas – caso base ONS BR1812PY, de acordo com Nota Técnica do ONS que adiciona as seguintes obras e usinas:

- 13 máquinas da UHE Belo Monte (totalizando 18 máquinas);
- UHE São Luiz do Tapajós (8040 MW) e Jatobá (2.338 MW), conectadas na SE Parauapebas 500 kV, previstas no Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2024 da EPE;
- UHE Serra Quebrada com 1328 MW na SE Imperatriz 500 kV, prevista no Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2023 da EPE;
- SE Marituba 500 kV, conectada à subestação Vila do Conde, englobando um transformador 500/230 kV, dois transformadores 230/69 kV, além de linhas de 230 kV;
- UHE Marabá com 2160 MW na SE Itacaiúnas 500 kV, prevista no Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2024 da EPE.

Caso Base 2 – Sistema Norte-Nordeste – SAPRE/ANAFAS

Utilizou-se de um caso base da Eletrobras Eletronorte, que por sua vez foi adaptado do caso base do ONS BR1812PY. Foi realizada análise de superação de disjuntores no programa ANAFAS/SAPRE do Cepel, como apresentados na figura a seguir.

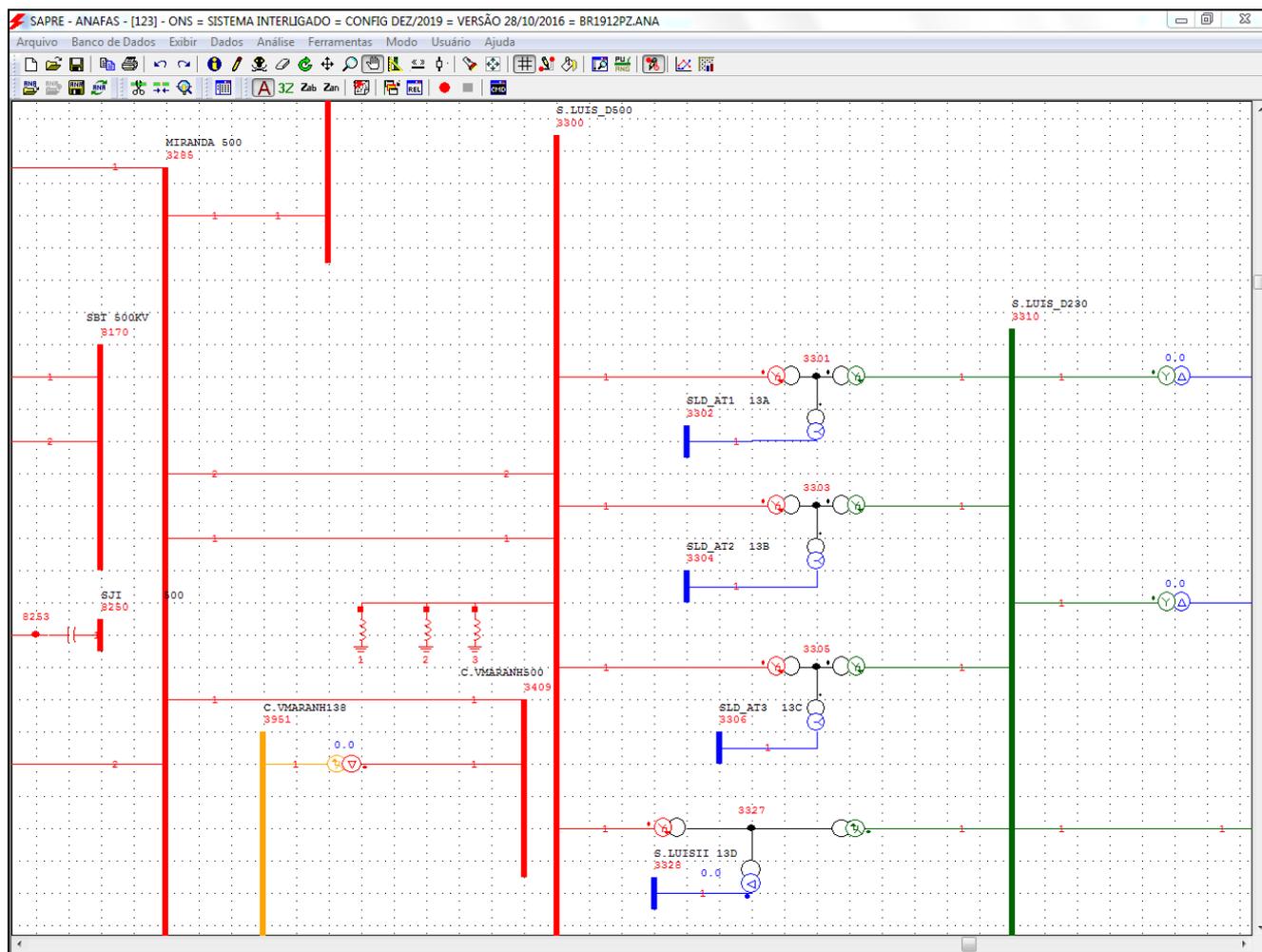


Figura 11. Detalhe de tela do programa SAPRE – ANAFAS com caso base do SIN.

3.1. GRÁFICO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

A partir do uso do ATP para simulação de curto-circuito e obtenção do gráfico da corrente de curto-circuito, são observados os seguintes valores de interesse:

- Valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (efeito dinâmico no disjuntor e demais componentes);
- Valor da corrente no instante da separação dos contatos do disjuntor;
- Percentual da componente CC, no instante da separação dos contatos do disjuntor;
- Corrente em regime permanente.

As figuras a seguir apresentam os pontos de interesse nesta análise:

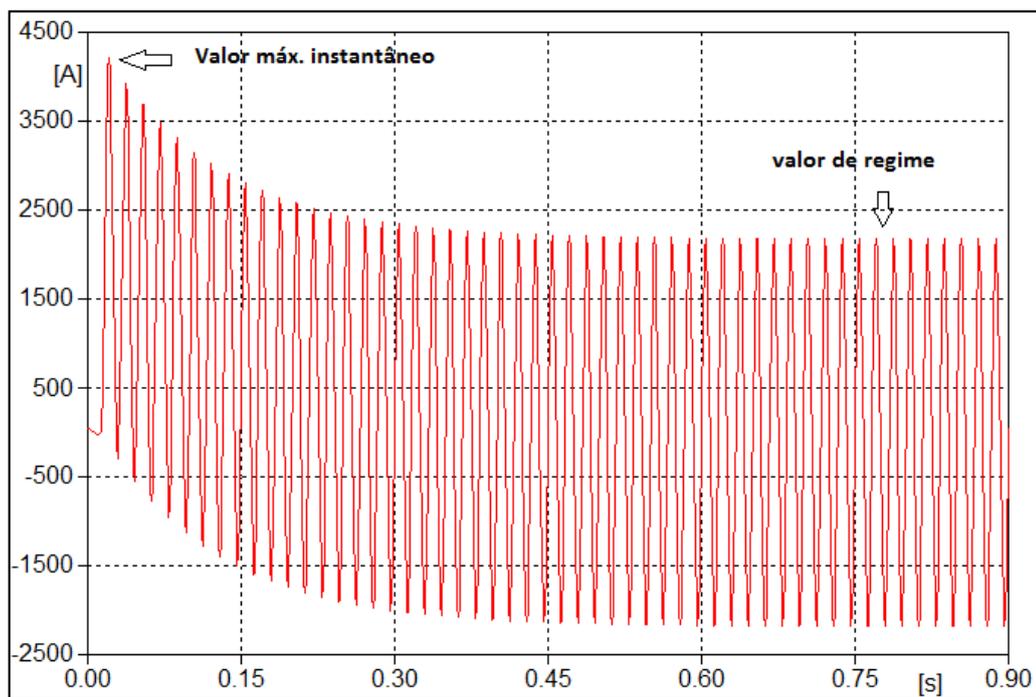


Figura 12. Corrente assimétrica de curto-circuito.

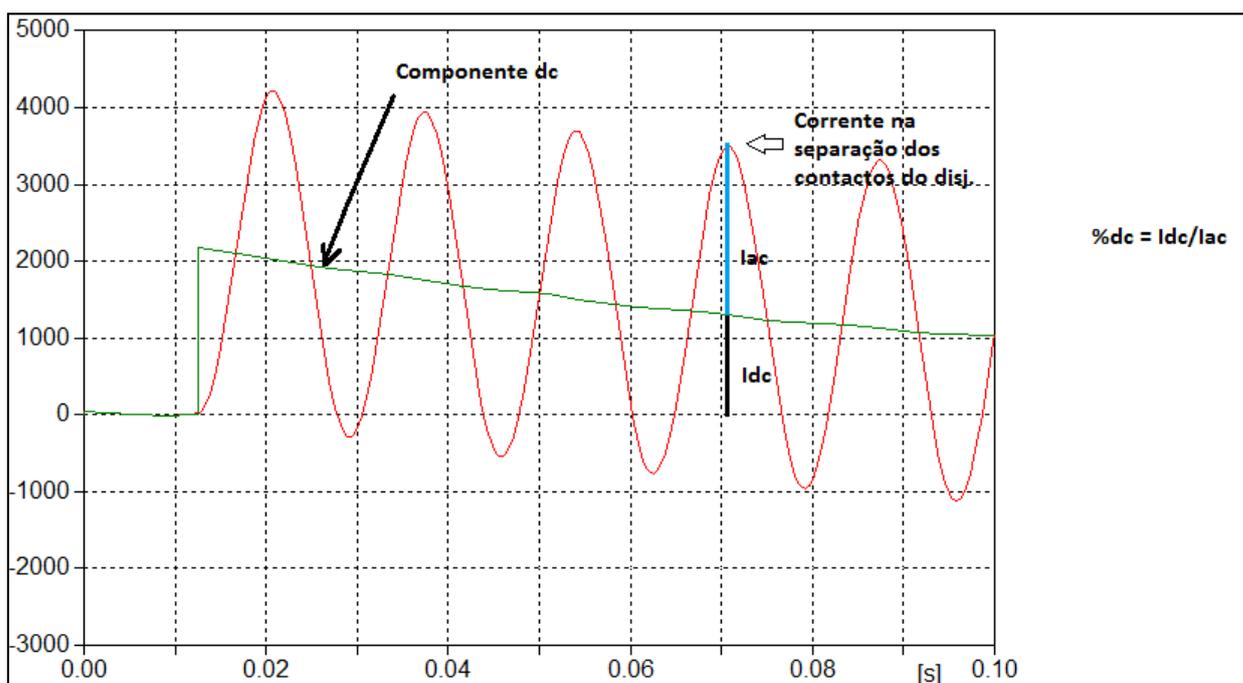


Figura 13. Cálculo da Componente CC.

A análise da componente CC associada à corrente de curto-circuito total passante pelo disjuntor é importante para o cálculo da relação X/R (GRIGOLETTO,2013).

As seguintes premissas foram adotadas, pela equipe da Eletrobras Eletronorte para elaboração das simulações da SE/UHE Tucuruí no ATP:

- a. Modelagem no ATP a partir dos parâmetros distribuídos das linhas de transmissão, dos reatores em derivação, dos capacitores série e seus respectivos MOV (*Metal Oxide Varistor*) e dos parâmetros dos geradores.
- b. Representação dos equivalentes considerando resistência nula a partir dos níveis máximos de curtos-circuitos, trifásicos e monofásicos, obtidos no caso horizonte ONS/EPE.
- c. Modelagem dos geradores pelo elemento 59 do ATP partir dos parâmetros dos geradores, que considera as reatâncias variáveis $X''d$, $X'd$ e X_d , e as constantes de tempo. Calculando-se assim o percentual de componente CC, conforme a equação apresentada a seguir.

$$\%CC = \frac{I_{dc}}{I_{ac}} \quad (9)$$

- d. A partir do percentual da componente CC calculam-se as constantes de tempo e a relação X/R pelas Eq.(10) e (11) (FRONTIN et. al, 2013).

$$\%CC = 100e^{-t/\tau} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\frac{X}{R}}{377} \quad (11)$$

Sendo t o instante de abertura dos contatos.

- e. Para plotar a componente CC junto à corrente total de curto-circuito, foi utilizada uma fonte cossenoidal de corrente de amplitude e fase idênticas à de regime permanente. Considerando a Eq. (1), ao injetar esta fonte de sinal contrário, obtém-se a componente CC.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1. SE/UHE TUCURUÍ (PA)

Utilizou-se de uma modelagem realizada pela Eletrobras Eletronorte, baseada no caso base do ONS, porém mais detalhada, visto que possui aperfeiçoamento da modelagem de máquinas de Tucuruí, por meio da máquina de Modelo 59 do ATP. A máquina de modelo 59 inclui em seus parâmetros reatâncias variáveis – X_d , X'_d e X''_d . Infere-se que com esta modelagem de máquinas os resultados da análise de curto-circuito sejam mais precisos e aproximada do caso real, do que a análise somente com a reatância fixa. A modificação foi feita a partir do caso base do ONS Horizonte 2018 com obras e usinas – caso base ONS BR1812PY.

Premissas:

Para as simulações as seguintes premissas foram adotadas:

- Tensão pré-falta utilizada neste trabalho foi de 1,1 p.u., uma vez que a UHE Tucuruí opera em 550 kV.
- Tempo mínimo de eliminação de faltas de 60ms, visto que esta é a soma do tempo de atuação da proteção mais o tempo de abertura do disjuntor de 500 kV.
- Verificando-se diferenças entre dados de catálogo e dados de placa, estes foram utilizados.

Dados de entrada:

Os dados dos geradores, transformadores e disjuntores foram os mesmos utilizados no caso base da Eletrobras Eletronorte. Os dados dos disjuntores da SE/UHE Tucuruí são apresentados a seguir.

Dados dos disjuntores da subestação isolada à gás SF₆ (GIS) - 1ª Etapa:

Tabela 5. Características dos Disjuntores da GIS 1ª Etapa – Valores Nominais Especificados (dados de placa).

| Característica | Valores garantidos | Ensaio Lab. Cerde | Catálogo 1 | Catálogo 2 |
|---|----------------------------|------------------------|--|---|
| | | | Fluobloc FD 20-0-6A AHT 362 to 800 kV | Fluobloc 550 kV, Type T (**) |
| Corrente nominal | 2000 A | 2000 A | Alim.: ≥ 2500 A Barra: ≥ 4000 A | 4000 A |
| Capacidade de curto-circuito, simétrico | 40 kA em 550 kV | 44,06 kA/3,06 s | 40 – 50 kA | 63 kA |
| Capacidade de fechamento | 108 kAp | 112,6 kAp | 100 -125 kAp (*) | 170 kAp |
| Corrente de curta duração admissível | 40 kA/1s | 40 kA/3s | | 63 kA/3s |
| % da corrente CC, para 2,5 ciclos. | 50% | | | |

Dados gerais da subestação isolada à gás SF₆ (GIS) - 1ª Etapa:

Tabela 6. Características Gerais do Conjunto GIS 1ª Etapa – Valores Nominais Especificados.

| | |
|---------------------------------------|----------------|
| Tensão máxima de operação | 550 kV |
| Frequência nominal | 60 Hz |
| Corrente nominal | 2000 A |
| Corrente de curto-circuito momentâneo | 108 kAp |

Os dados da GIS 2ª Etapa se assemelham aos da GIS 1ª Etapa, exceto os disjuntores, conforme apresenta a figura a seguir.

| CERDA mod B01-196 | | Rapport Report nº 4174 Ponto de | | Page Page 1 Pagina | |
|--|--|---|---------|--|--|
| CARACTÉRISTIQUES ASSIGNÉES / RATED CHARACTERISTICS / CARACTERISTICAS ASIGNADAS | | | | | |
| Tension assignée / Rated voltage / Tension asignada | | Ur | 550 | kV | |
| Fréquence assignée / Rated frequency / Frecuencia asignada | | fr | 50 | Hz | |
| Courant assigné en service continu / Rated normal current / Intensidad asignada en servicio continuo | | Ir | 4000 | A | |
| Courant de courte durée admissible assigné Rated short-time withstand current Intensidad de corta duración admisible asignada | | I _k | 63 | kA | |
| Valeur de crête du courant admissible assigné Rated peak withstand current Valor de cresta de la corriente admisible asignada | | I _p | 171 | kA | |
| Durée assignée de court-circuit Rated duration of short-circuit Duración asignada del corto-circuito | | t _k | 3 | s | |
| Tension d'alimentation assignée / Rated supply voltage / Tension asignada de alimentación du dispositif de fermeture / of closing device / del dispositivo de cierre du dispositif d'ouverture / of opening device / del dispositivo de apertura | | U _A U _A | 125 | V | |
| Pression assignée d'alimentation en huile pour la manoeuvre Rated pressure of compressed oil supply for operation Presión de alimentación asignada del aceite para la maniobra | | P _{om} | 370 | bar | |
| Pression assignée du gaz de coupure (effective à 20°C) Rated pressure of compressed gas supply for breaking (effective at 20°C) / Presión asignada del alimentación del gas para el corte (efectiva a 20°C) | | P _{re} | 7,8 | bar | |
| NIVEAU D'ISOLEMENT ASSIGNÉ / RATED INSULATION LEVEL / NIVEL DEL AISLAMIENTO ASIGNADA | | | | | |
| Tension de tenue assignée Rated withstand voltage Soportada asignada | | A la terre To earth A tierra | | Ouvert entre bornes Open circuit across terminals Abierto entre bornes | |
| Choc de foudre / Lightning impulse / Impulso tipo rayo | | U _p | 1800 kV | 2000 kV | |
| Choc de foudre coupé à Chopped lightning impulse at Impulso tipo rayo cortado a | | µs | | | |
| Choc de foudre coupé à Chopped lightning impulse at Impulso tipo rayo cortado a | | µs | | | |
| Choc de manoeuvre / Switching impulse / Impulso tipo maniobra | | U _s | 1175 kV | 1625 kV | |
| Fréquence industrielle / Power frequency / Frecuencia industria à sec / dry / en seco | | U _d | 740 kV | 998 kV | |
| COUPE ET ETABLISSEMENT - BREAKING AND MAKING - CORTE Y CIERRE | | | | | |
| Pouvoir de coupure en court-circuit Short-circuit breaking current Poder de corte en corto circuito | | Composante périodique a.c. component Componente periodica | 63 kA | Composante aperiodique d.c. component Componente aperiodica | |
| Tension transitoire de rétablissement Transient recovery voltage Tension transitoria de restablecimiento | | Valeur de crête Peak value Valor de cresta | 943 kV | Vitesse d'accroissement Rate of rise Velocidad de crecimiento | |
| Pouvoir de fermeture en court-circuit Short-circuit making current Poder de cierre en corto circuito | | | | (valeur de crête) (peak value) (valor de cresta) | |
| Séquence de manoeuvres Operating sequence Secuencia de maniobras | | | | O-CO | |
| Défaut proche en ligne Short-line fault Defecto proximo en linea | | Impédance d'onde Surge impedance Impedancia de onda | 450 Ω | Facteur de crête Crest factor Factor de cresta | |
| Pouvoir de coupure en discordance de phases Out-of-phase breaking current Poder de corte en discordancia de fases | | | 2 | facteur factor factor | |
| Pouvoir de coupure de lignes à vide Line-charging breaking current Poder de corte de líneas en vacío | | | | 500 A | |

Relatório CERDA 4174

TUF-E-GIS-4063-NT-ROD

Figura 144. Dados da GIS 2ª Etapa.

Dados dos disjuntores da subestação isolada à ar (AIS) - 1ª etapa:

Tabela 7. Disjuntores AIS 1ª Etapa: FA4-525-40.

| Característica | Dados de Placa | Catálogo Fig. 4.7 e 4.8 |
|---|----------------|-------------------------|
| Capacidade de interrupção simétrica: [kA] rms | 40 | 50 |
| Corrente de curta duração: kA/s | 40/3s | NI |
| Capacidade de fechamento: kA crista | 102 | 125 |
| % componente CC | 50 | NI |
| Tempo de interrupção | 40 ms | NI |

Dados dos disjuntores da subestação isolada à ar (AIS) - 2ª etapa:

Tabela 8. Disjuntor da AIS 2ª Etapa – Valores de Placa.

| Característica | VA TECH | ABB | SIEMENS |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | FA4-50 | HPL 550 TB2 | 3 AT5 -EI |
| Corrente de curto simétrica [kA] rms | 50 | 50 | 50 |
| Percentual de corrente contínua [%CC] | 85 | 85 | 88 |
| Constante de tempo τ ms | 159 | Não informado | Não informado |
| Tempo de interrupção (ciclos) | 2 | Não informado | Não informado |
| Corrente de estabelecimento | 138 | 138 | 138 |
| Corrente curta duração kA/s | Não informado | 50/3s | 50/3s |

Modelagem:

A modelagem realizada pela Eletrobras Eletronorte inclui representação completa e detalhada da SE/UHE Tucuruí. No programa ATP, a modelagem é feita com representação trifásica do sistema em estudo e o uso de equivalentes de curto-circuito nas barras de fronteira das proximidades. Os curtos-circuitos monofásicos e trifásicos são analisados.

A figura a seguir apresenta a modelagem da SE/UHE Tucuruí no programa ATP.

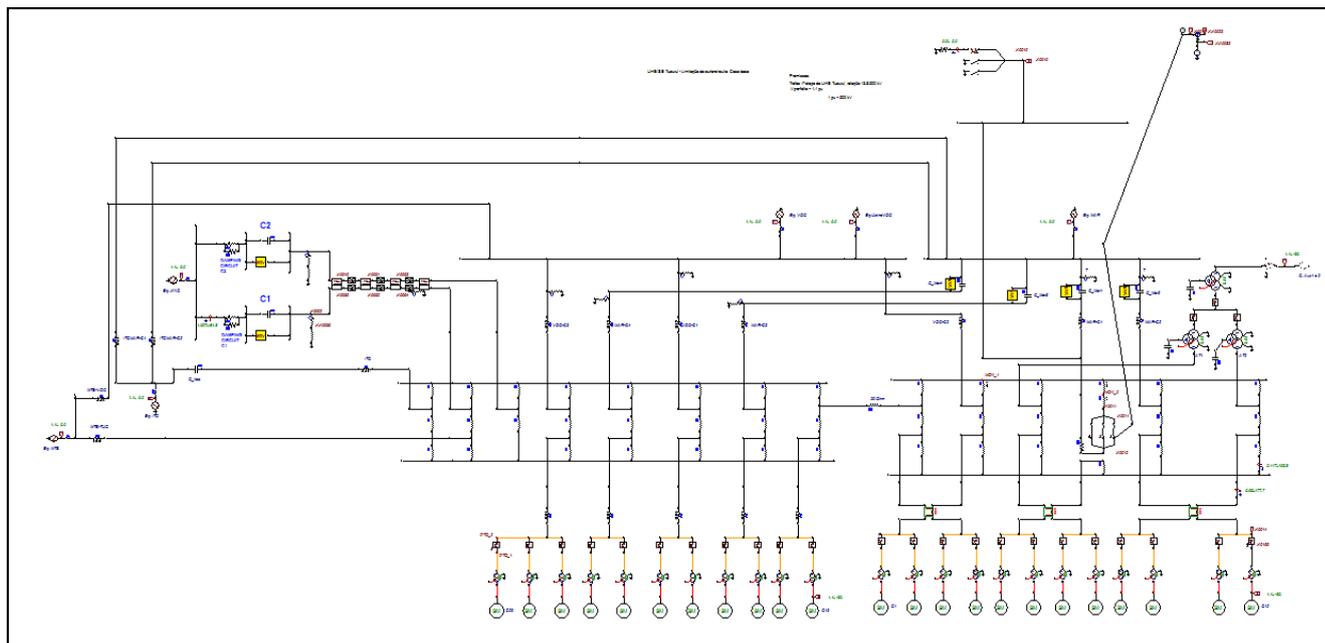


Figura 155. Modelagem da SE/UHE Tucuruí no ATP.

Simulações:

A tabela (9) apresenta os resultados das correntes de curto-circuito passante nos disjuntores da SE/UHE Tucuruí.

Tabela 9. Corrente de curto-circuito passante nos disjuntores da SE/UHE Tucuruí.

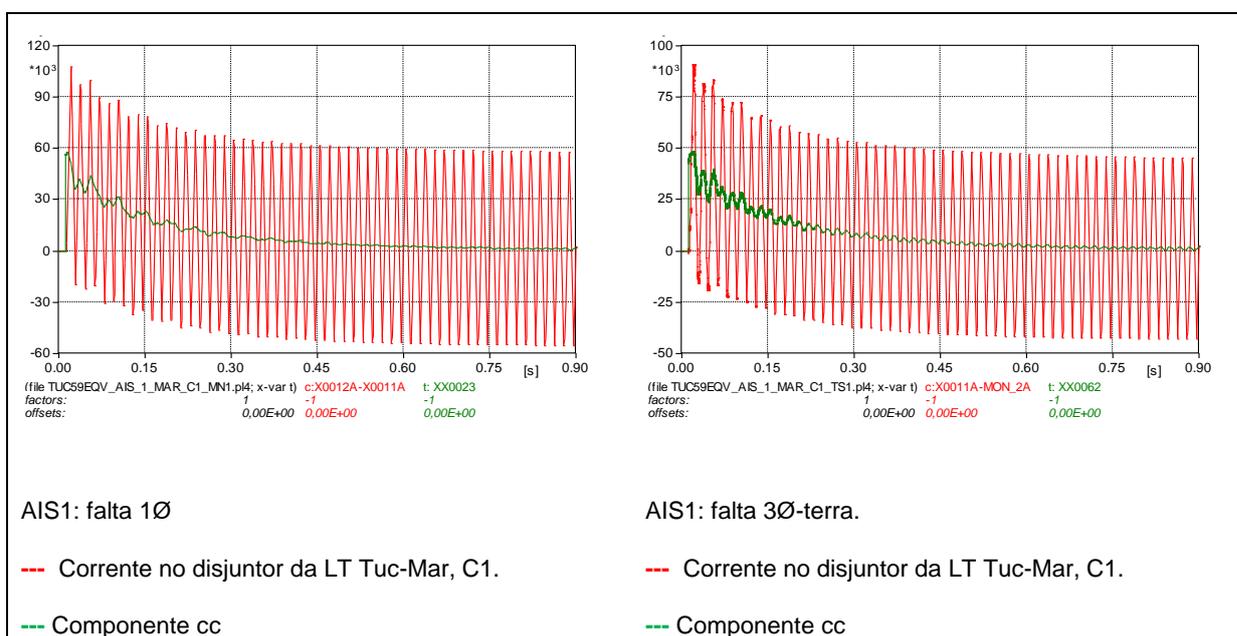
| Local do Curto | | Corrente de Curto-circuito | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------|------|--------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------|------|
| | | Monofásico | | | | | Trifásico | | | | |
| | | 1º Pico [kA _p] | Pico após 60ms [kA _p] | Valor Regime [kA] | I _{cc} [%] | X/R | 1º Pico [kA] | Pico após 60ms [kA _p] | Valor Regime [kA] | I _{cc} [%] | X/R |
| [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | | |
| TUC1 AIS | DISJUNTOR Marabá, C1 | 107,7 | 89,4 | 40,0 | 54,0 | 36,7 | 90,8 | 73,9 | 31,1 | 54,5 | 37,3 |
| TUC2 AIS | DISJUNTOR VDC, C1 | 104,8 | 99,9 | 49,3 | 43,4 | 27,1 | 98,9 | 96,1 | 44,4 | 40,5 | 25,0 |
| TUC 1 GIS | IDISJUNTOR (Contrib. Sistema) | 101,8 | 83,0 | 39,6 | 48,7 | 31,4 | 89,7 | 73,3 | 33,1 | 57,0 | 40,2 |
| TUC 2 GIS | IDISJUNTOR (Contrib. Sistema) | 96,9 | 87,6 | 45,1 | 37,4 | 23,0 | 96,9 | 93,5 | 43,5 | 40,2 | 24,8 |

Notas:

- [1] - Máximo valor de pico nos instantes iniciais da falta;
- [2] - Máximo valor de pico próximo de 60ms de duração da falta;
- [3] - Valor eficaz, RMS, sem a presença de componente contínua;
- [4] - Percentual da componente CC no primeiro pico da corrente assimétrica após o instante de abertura do disjuntor;
- [5] - X/R calculado a partir da componente contínua da corrente de curto-circuito.

De acordo com os valores encontrados, pode-se perceber que os disjuntores da SE/UHE Tucuruí estão superados no horizonte em estudo. No caso de Tuc1 AIS por exemplo, foi observado que no disjuntor do primeiro circuito que sai para Marabá o valor nominal dos disjuntores é de 40 kA, e a corrente de curto-circuito trifásico encontrada é de 31,1 kA, o que indicaria a não superação dos equipamentos. Porém, a relação X/R no ponto em questão é de 37,3 e nos dados de fabricante $X/R \leq 17$, por isso aplica-se os fatores de redução da Tabela (3), e o novo valor de relação $X/R = 40 \times 0,7 = 28$ kA. Como $31,1 \text{ kA} > 28 \text{ kA}$, pode-se concluir que os disjuntores estão superados.

Na Figura (16) estão apresentados os comportamentos da corrente de curto-circuito nos disjuntores da SE/UHE Tucuruí, com suas respectivas componentes CC.



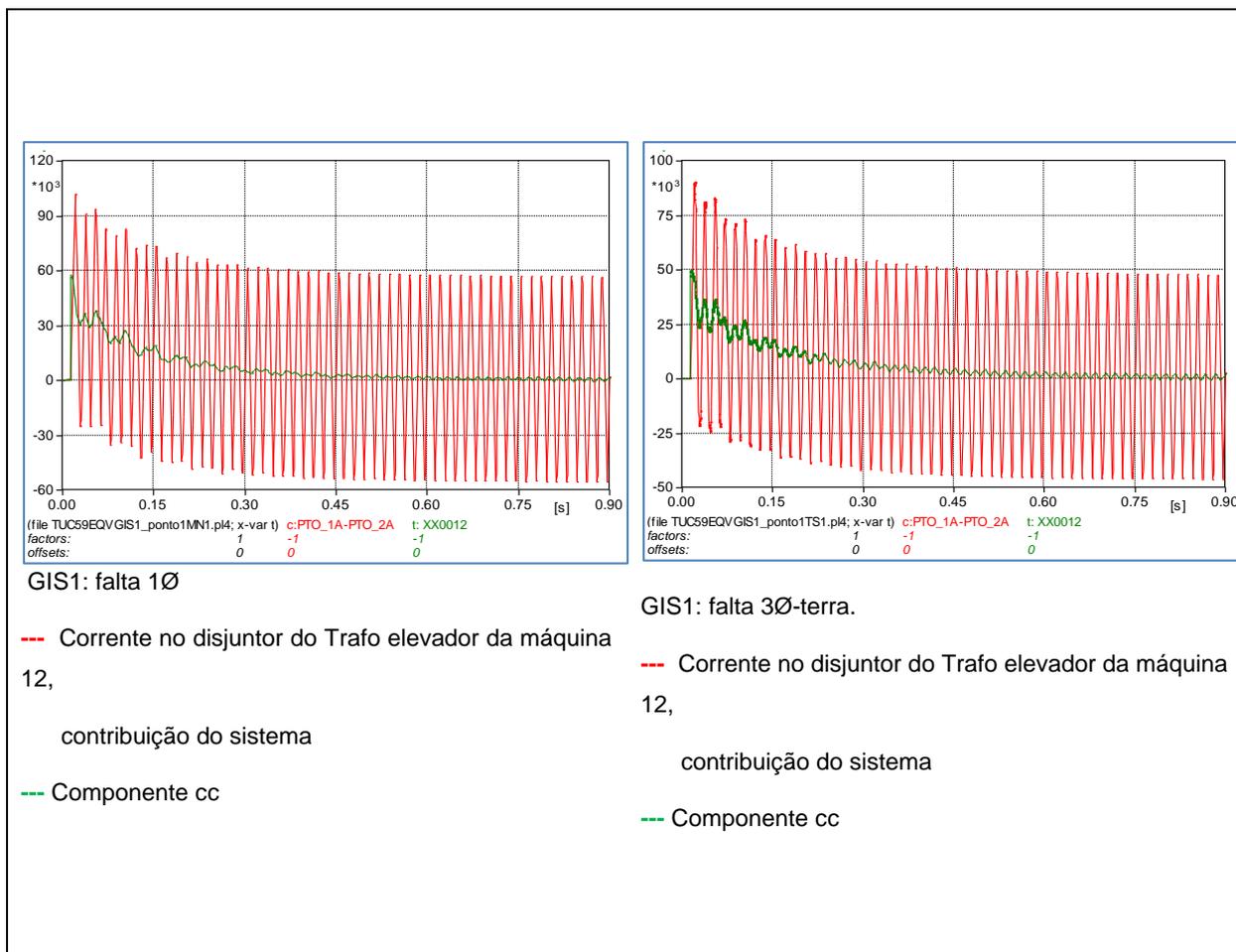
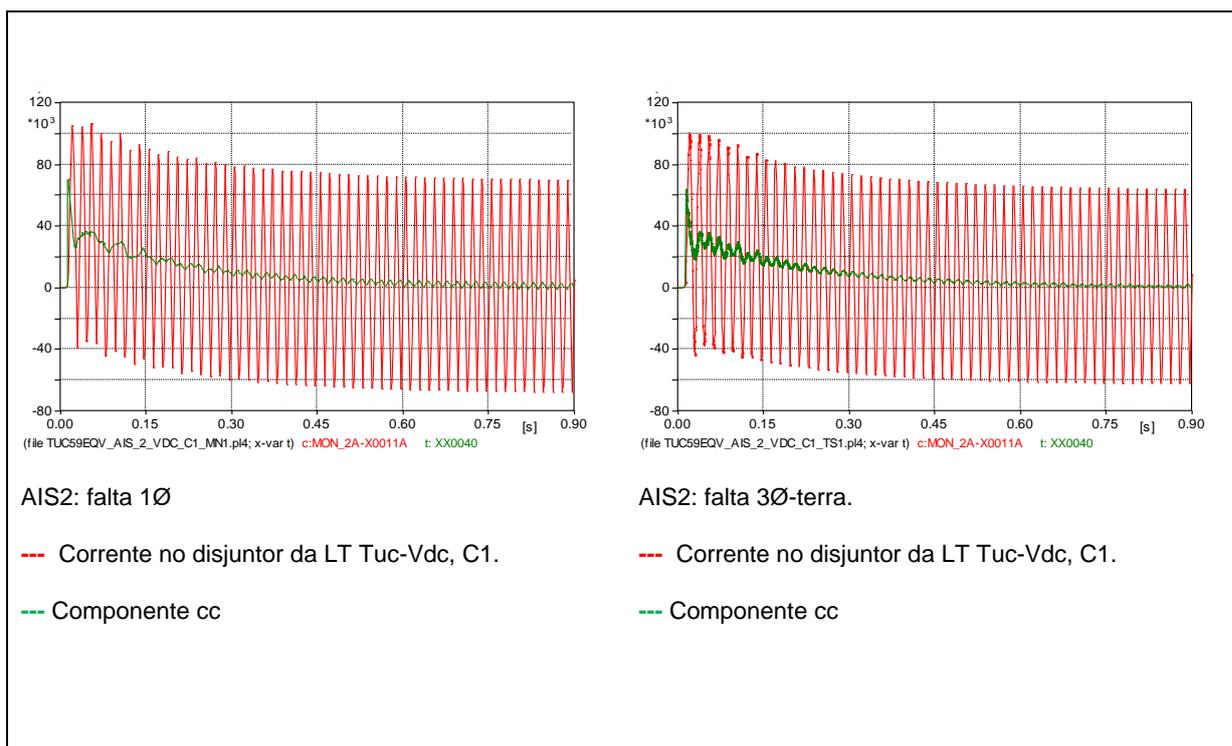


Figura 166. Corrente de curto-circuito nos disjuntores da SE TUC1.



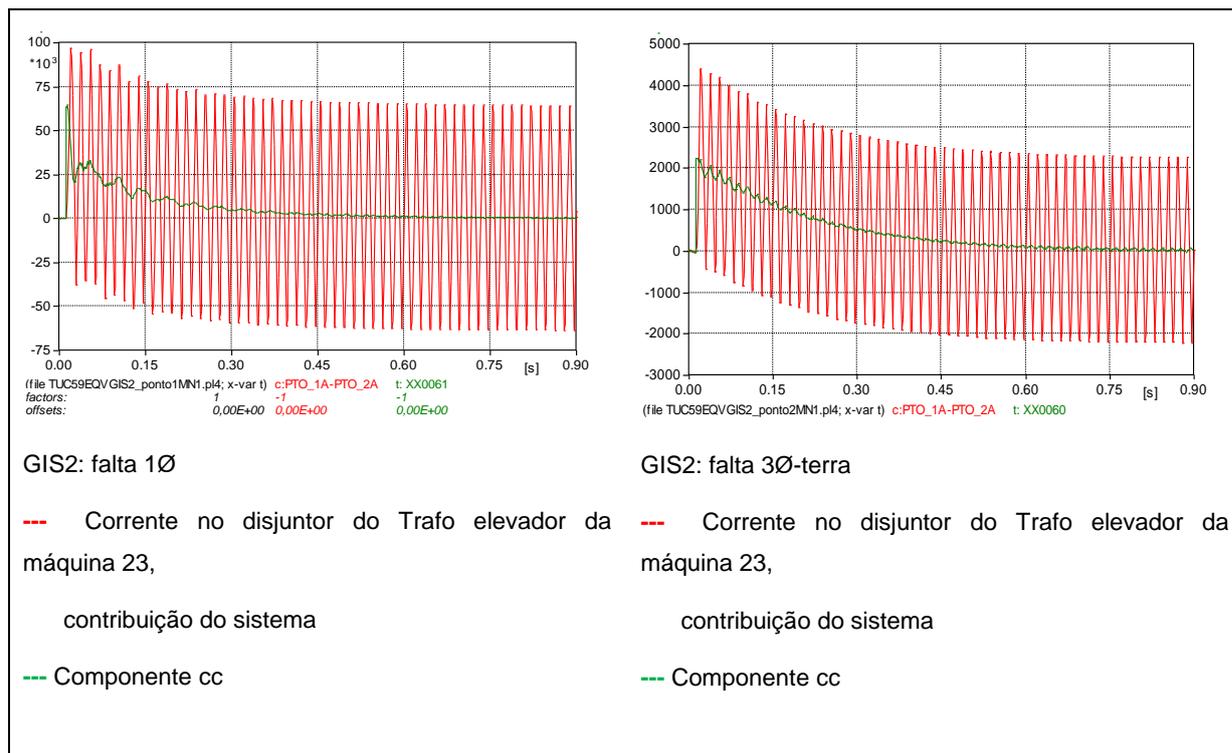


Figura 17. Corrente de curto-circuito nos disjuntores da SE TUC2.

4.2. RELAÇÃO X/R PRÓXIMAS E DISTANTES DA FONTE

A experiência da equipe da Eletrobrás Eletronorte é de, geralmente, encontrar valores de relação X/R inferiores ou próximos a 17 em subestações distantes de usinas. Observando-se isto, este trabalho se propões a fazer a comparação das relações X/R em subestações de energia próximas e distantes de usinas, bem como utilizar a mesma metodologia, com ATP, em uma subestação distante de geração, a fim de se constatar a coerência entre as metodologias dos programas ATP e ANAFAS.

Utilizou-se do caso base do ONS no SAPRE ANAFAS, para aplicar curto-circuito em linhas de transmissão de 500 kV inclusas no sistema Norte-Nordeste.

A partir da ferramenta de cálculo de superação de disjuntores (Fig. 18) obtêm-se os resultados dos níveis de curto-circuito nos disjuntores das referidas subestações e os respectivos valores de relação X/R.

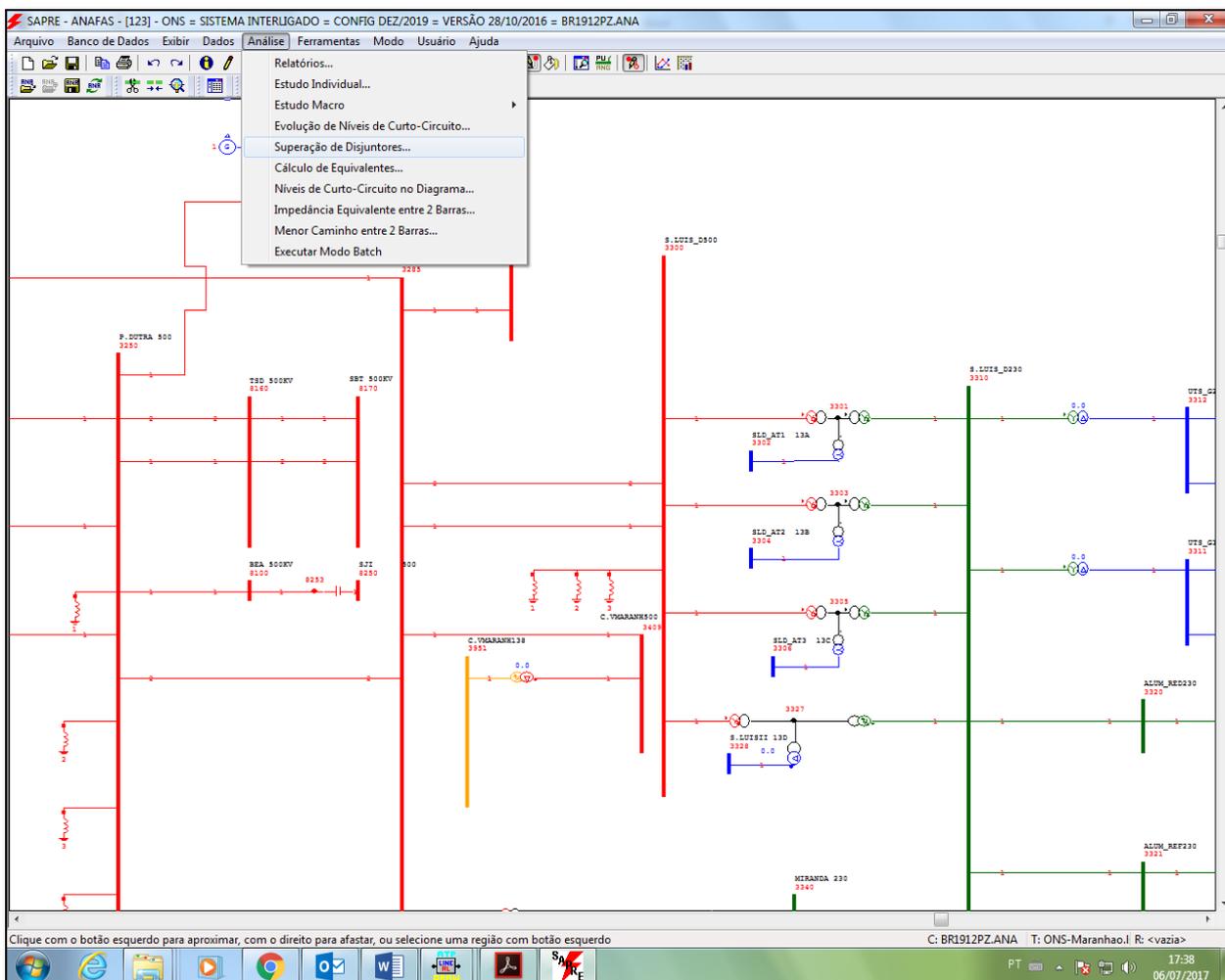


Figura 18. Análise de superação de disjuntores no SAPRE - ANAFAS.

Nesta ferramenta, foram analisados os dados das seguintes subestações 500 kV:

- Tucuruí 1 (PA);
- Tucuruí 2 (PA);
- Marabá (PA);
- Imperatriz (MA);
- Açailândia (MA);
- Presidente Dutra (MA);
- São Luis (MA).

Os resultados estão apresentados na Figura (19).

Relação de barras que terão suas correntes de contribuição analisadas na etapa a seguir deste estudo:
(Todas as que tiverem nível de curto acima de 0.0 % da capacidade do menor disjuntor)
Total: 8

| Identificação da SE | | Nível CC | | | | | | Menor | Mayor % | | | |
|---------------------|-------------|------------|----------|-----------|------|----------|------|---------|---------|-------|---------|----------|
| Barra | | Monofásico | | Trifásico | | BifTerra | | Cap. | da | | | |
| Num. | Nome | Área | VBase | Ncc(kA) | X/R | Ncc(kA) | X/R | Ncc(kA) | X/R | (kA) | Nominal | Situação |
| 3000 | TUCURUI | 500 | 23 500,0 | 39,9 | 38,1 | 35,2 | 32,8 | 38,4 | 36,3 | ***** | 0,0 | |
| 3024 | TUCURUI2 | 500 | 23 500,0 | 46,3 | 19,0 | 46,6 | 16,0 | 46,9 | 17,3 | ***** | 0,0 | |
| 3150 | MARABA | 500 | 23 500,0 | 20,3 | 6,9 | 34,2 | 12,6 | 31,2 | 11,0 | ***** | 0,0 | |
| 3200 | IMPERATR500 | 24 500,0 | 24 500,0 | 22,8 | 9,7 | 29,3 | 10,7 | 27,1 | 10,4 | ***** | 0,0 | |
| 3220 | ACAILAND500 | 24 500,0 | 24 500,0 | 11,7 | 6,3 | 21,6 | 12,1 | 19,6 | 10,6 | ***** | 0,0 | |
| 3250 | P.DUTRA | 500 | 24 500,0 | 17,6 | 7,3 | 24,1 | 12,2 | 22,5 | 10,4 | ***** | 0,0 | |
| 3285 | MIRANDA | 500 | 24 500,0 | 12,3 | 9,5 | 13,8 | 17,9 | 13,6 | 13,4 | ***** | 0,0 | |
| 3300 | S.LUIS_D500 | 24 500,0 | 24 500,0 | 11,1 | 16,5 | 9,4 | 17,2 | 10,6 | 16,6 | ***** | 0,0 | |

Figura 179. Análise de curto-circuito em subestações 500 kV.

Pode-se observar na figura (19) que os valores de curto-circuito bifásico para terra são próximos ou inferiores aos valores do curto trifásico. Como em Kindermann (1997) e em outras bibliografias de curto-circuito afirmam que este tipo de ocorrência é menos comum entre os demais tipos de curtos-circuitos, optou-se por analisar apenas os curtos monofásico e trifásico.

4.2.1. Escolha da Subestação para simular no ATP

Premissas:

Decidiu-se por escolher uma das subestações com nível de tensão da SE Tucuruí, mas que estivesse distante da geração. Tendo em vista a diferença de localização das subestações, fica possibilitado o estudo comparativo dos níveis de curto-circuito e relação X/R de acordo com a localização próxima ou distante do centro gerador.

A SE São Luis, que fica no Estado do Maranhão, está distante da SE/UHE Tucuruí e não possui grandes centros de geração próximos. Como mostra a figura (20):

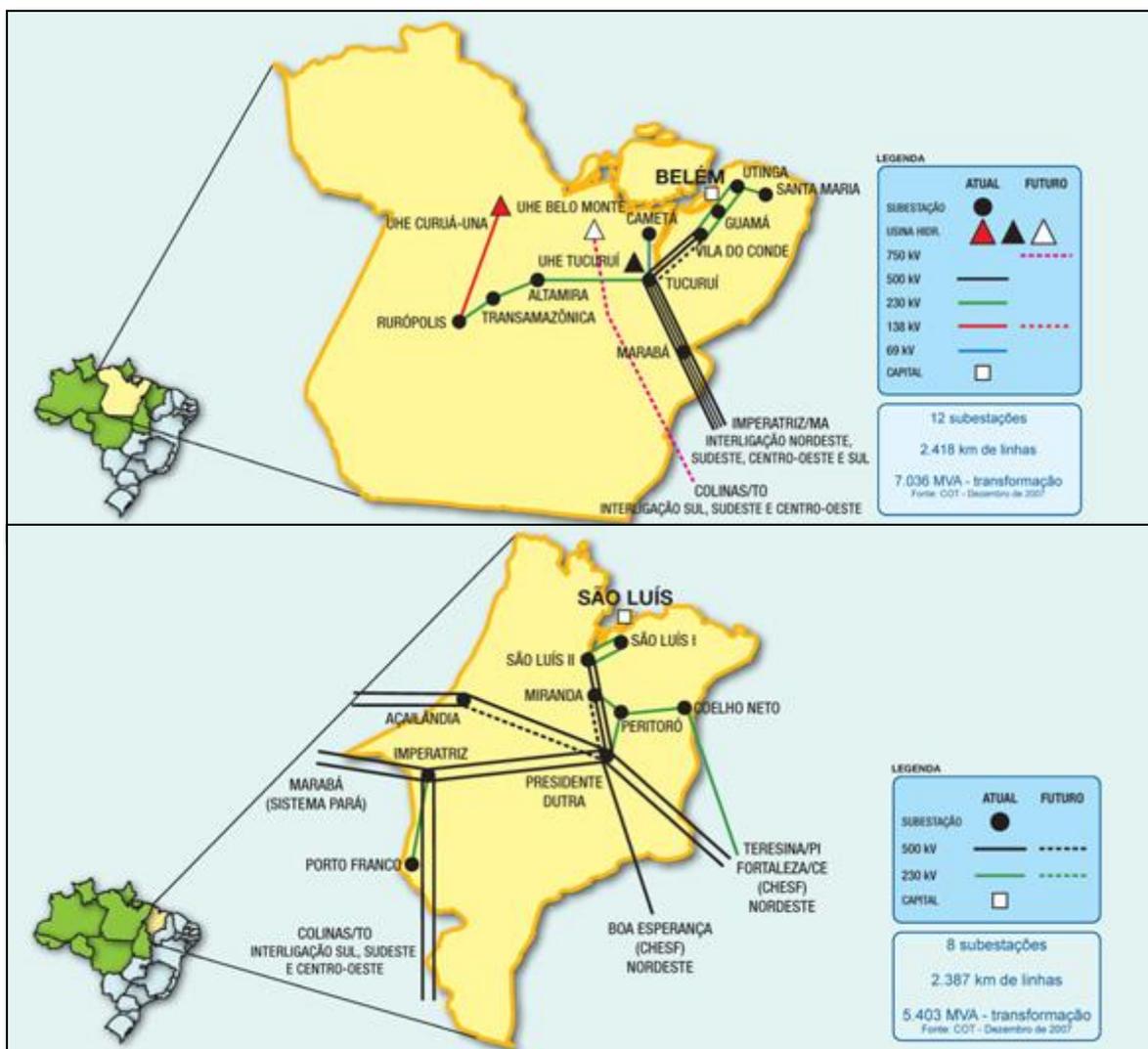
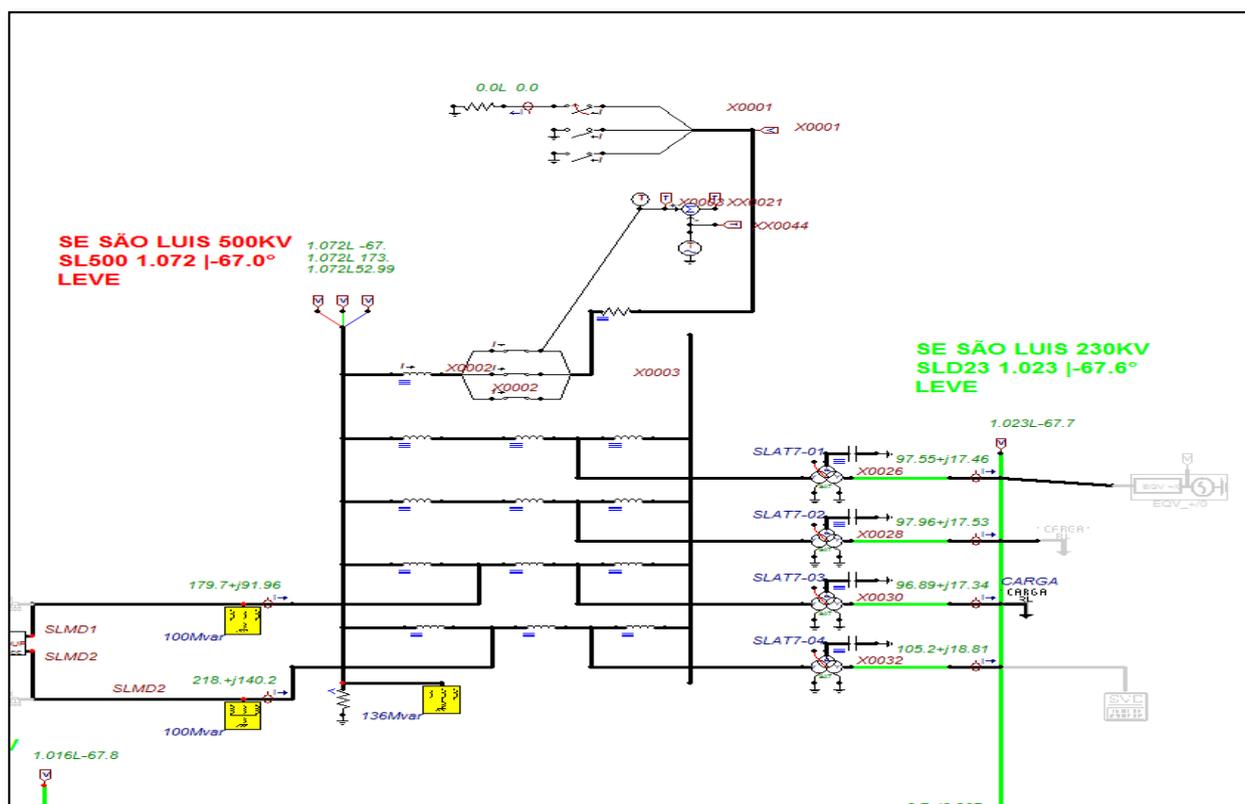
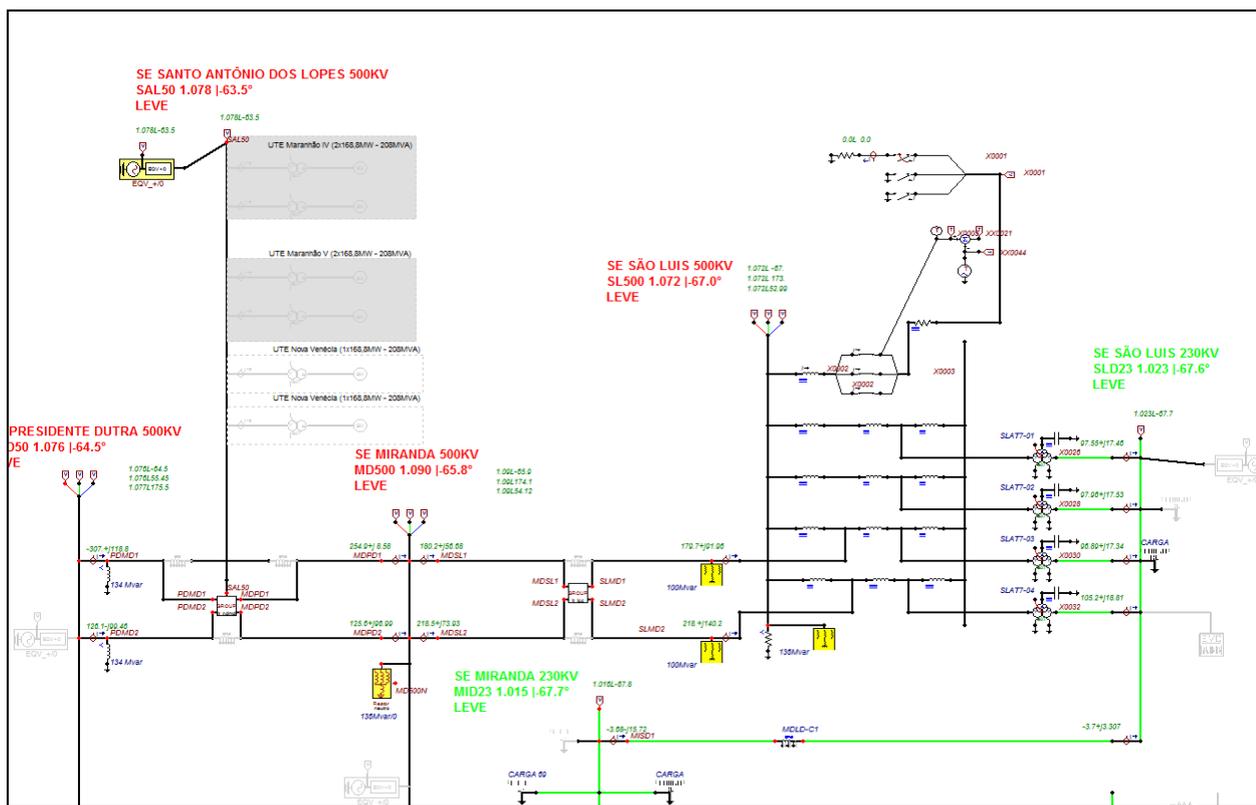


Figura 180. Subestações da Eletronorte nos Estados (a) do Pará e (b) Maranhão. Fonte: Eletronorte, 2017.

Assim sendo, adotou-se o mesmo caso base do ONS, só que agora com maior detalhe da SE São Luis para possibilitar o estudo da corrente de curto-circuito passante pelos disjuntores desta. As figuras (21) e (22) apresentam detalhes de como ficou a representação da SE São Luis 500 kV e as subestações próximas à ela, no programa ATP.



Os resultados da simulação mostram que os valores de corrente de curto-circuito passante pelo disjuntor da SE São Luis são bem reduzidos se comparados aos mesmos dados da SE/UHE Tucuruí. O mesmo ocorre com a relação X/R.

Curto-circuito Monofásico:

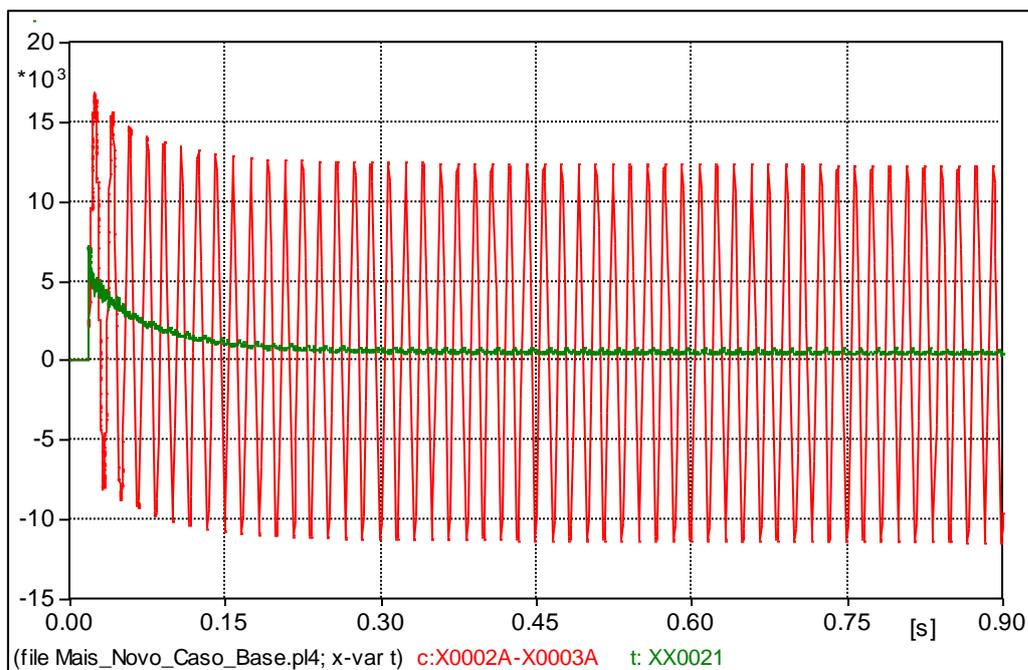


Figura 23. Corrente de curto-circuito monofásico na SE São Luis 500 kV.

Com os resultados obtidos na simulação no ATPDraw foram calculados o percentual da componente CC e a relação X/R.

A Tabela (10) apresenta os cálculos do percentual CC e relação X/R dos curtos-circuitos monofásico e trifásico.

Tabela 10. Dados de curto-circuito na SE São Luis 500 kV.

| Corrente de Curto-circuito | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------|------|--------------|-----------------------------------|-------------------|---------|------|
| Local do Curto | | Monofásico | | | | | Trifásico | | | | |
| | | 1º Pico [kA _p] | Pico após 60ms [kA _p] | Valor Regime [kA] | Idc [%] | X/R | 1º Pico [kA] | Pico após 60ms [kA _p] | Valor Regime [kA] | Idc [%] | X/R |
| | | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] |
| SL500kV | I _{DISJUNTOR} | 23,8 | 16,6 | 11,8 | 19,6 | 13,9 | 23,2 | 15,9 | 12,7 | 8,5 | 13,7 |

Notas:

- [1] - Máximo valor de pico nos instantes iniciais da falta;
- [2] - Máximo valor de pico próximo de 60ms de duração da falta;
- [3] - Valor eficaz, RMS, sem a presença de componente contínua;
- [4] - Percentual da componente CC no 1º pico da corrente assimétrica após o instante de abertura do disjuntor;
- [5] - X/R calculado a partir da componente contínua da corrente de curto.

Curto-circuito Trifásico:

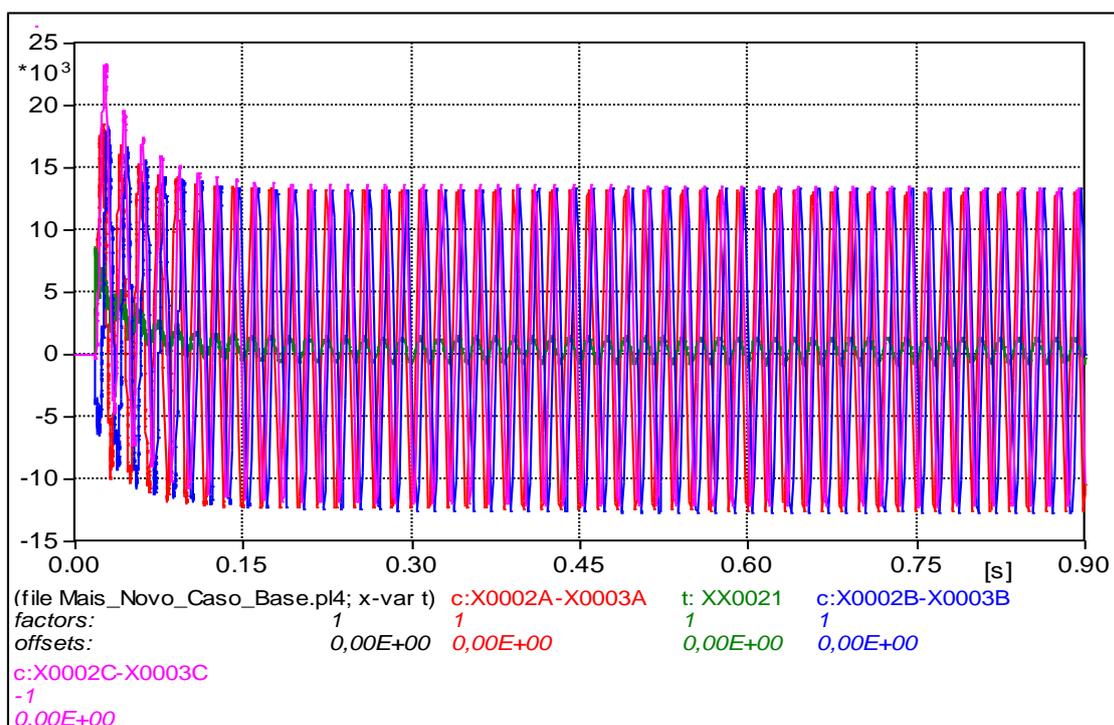


Figura 24. Comportamento da corrente de curto-circuito trifásico.

Adotou-se a fase C (rosa) por apresentar maiores valores de pico de corrente de curto circuito, e então foram calculados o percentual da componente CC e a

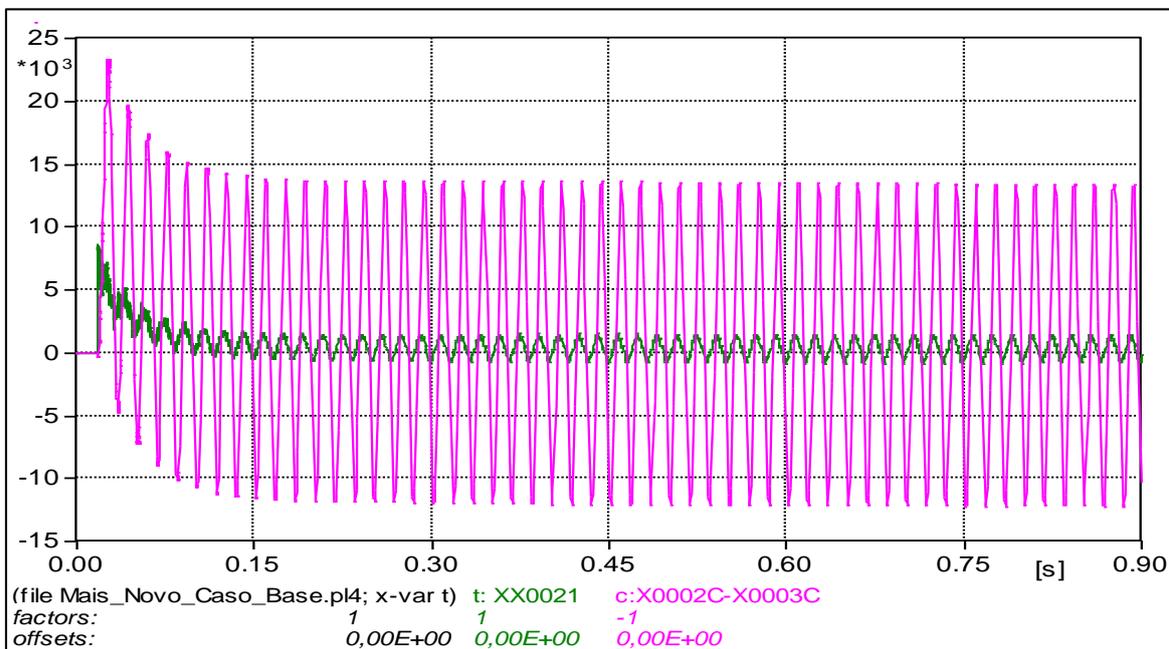


Figura 25. Curto-circuito trifásico na SE São Luis 500 kV - Fase C.

relação X/R.

E então foram estudados os pontos de interesse, como o 4º pico, que é o momento de abertura dos contatos do disjuntor, como apresentado na Figura (26).

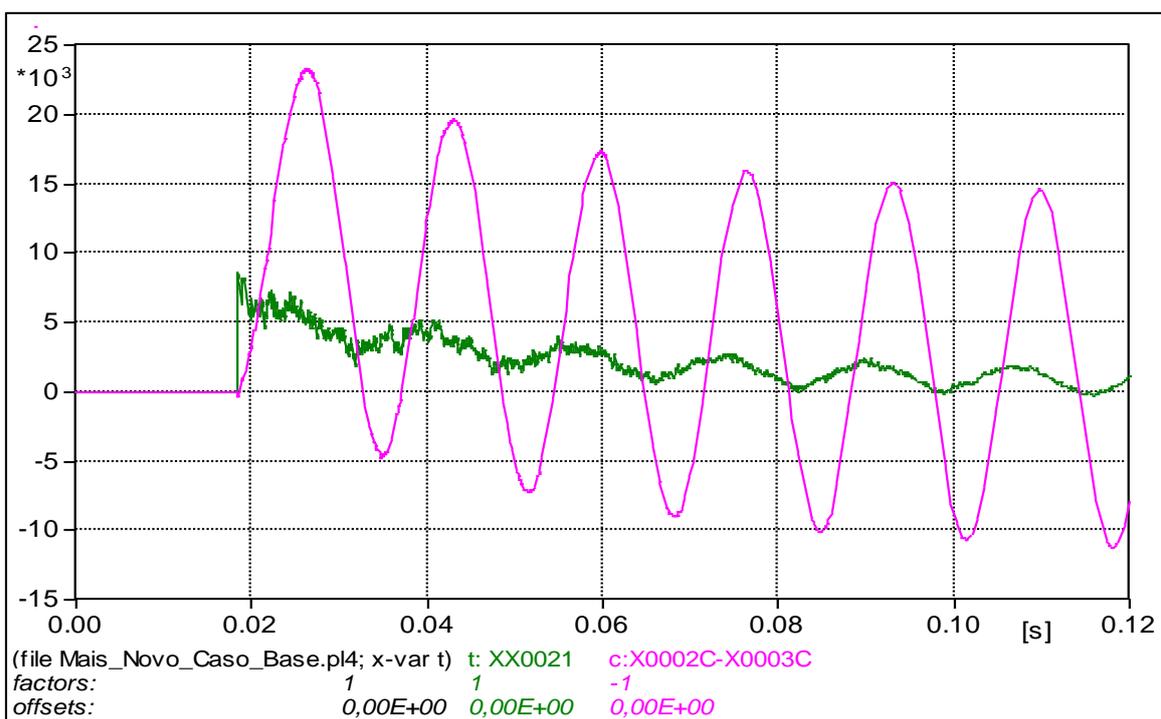


Figura 19. Corrente de curto-circuito trifásico e sua respectiva componente CC.

Em posse destes dados pode-se então comparar os valores da relação X/R do programa SAPRE/ Anafas com os valores do programa ATP, como apresenta a Tabela (11).

Tabela 11. Comparação dos resultados SAPRE/Anafas x ATP.

| Corrente de Curto-circuito | | | | | |
|----------------------------|------------------------|----------------------|------|----------------------|------|
| Local do Curto | Programa Computacional | Monofásico | | Trifásico | |
| | | N _{cc} (kA) | X/R | N _{cc} (kA) | X/R |
| SL500kV | SAPRE/Anafas | 11,1 | 16,5 | 9,4 | 17,2 |
| | ATP | 11,8 | 13,9 | 12,7 | 13,7 |
| TUC1 | SAPRE/Anafas | 39,9 | 38,1 | 35,2 | 32,8 |
| | ATP | 40,0 | 36,7 | 31,1 | 37,3 |
| TUC2 | SAPRE/Anafas | 46,3 | 19,0 | 46,6 | 16,0 |
| | ATP | 49,3 | 27,1 | 44,4 | 25,0 |

Logo, pode-se observar que os níveis de curto-circuito e a relação X/R da SE/UHE Tucuruí 500 kV são consideravelmente maiores que os mesmos parâmetros da SE São Luis 500 kV, como se esperava. Tal fato pode ser justificado pela proximidade da SE/UHE Tucuruí do centro de geração, que recebe influência dos geradores da usina, que possuem elevados valores de relação X/R como afirmado em (DAS, 2009).

Desta forma, cabe afirmar que as contribuições de gerações próximas à subestações devem ser consideradas nos cálculos de especificações de equipamentos, em especial neste caso, os disjuntores.

A relação X/R muito alta pode submeter os disjuntores às solicitações por período de tempo maiores que aquelas que comumente são esperadas pelos equipamentos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o contexto de expansão do sistema elétrico brasileiro, com destaque para a inserção de novas usinas no subsistema Norte-Nordeste e seu impacto nos níveis de curto-circuito na SE/UHE Tucuruí.

Também foi explanado como são as interações entre os agentes do setor elétrico (ONS, EPE, geradoras, transmissoras, etc.) para que seja acompanhada a evolução dos níveis de curto-circuito nas estações, mostrando o papel da Eletrobras Eletronorte neste processo.

O trabalho apresentou os fundamentos para cálculo de curto-circuito tradicionais, exibiu o programa ANAFAS/SAPRE que calcula desta forma, apresentando o curto-circuito nas barras (pior caso, mas pouco incidente) e não a corrente de curto-circuito passante no disjuntor.

Também introduziu a metodologia de cálculo utilizando o ATP, com foco na melhoria da precisão dos cálculos. Destacam-se a modelagem com máquina modelo 59 (reatâncias transitória e subtransitória), a análise gráfica considerando a assimetria da corrente de curto-circuito e instante de abertura dos contatos nos disjuntores (e não na barra).

Foram analisados resultados das simulações feitas pela Eletrobras Eletronorte na SE/UHE Tucuruí. A análise indicou a superação por relação X/R. Também diante da constatação de valores altos de relação X/R, este trabalho fez cálculos comparativos entre subestações próximas e distante de usinas.

Para plotar a componente CC junto à corrente total de curto-circuito, foi utilizada uma fonte cossenoidal de corrente de amplitude e fase idênticas à de regime permanente. Ao injetar esta fonte de sinal contrário, obteve-se a componente CC.

A partir dos resultados obtidos e considerando os fatores de assimetria apresentados, fica evidenciada a importância do estudo da relação X/R para aplicação em disjuntores. Também pode-se perceber a diferença dos valores da relação X/R de acordo com a localização da subestação de energia, sendo que próximo à usina hidrelétrica esta relação se mostrou mais elevada que os parâmetros comuns e recomendados, enquanto na subestação distante do centro de geração apresentou uma relação X/R dentro dos padrões (≤ 17).

Os níveis de curto-circuito e a relação X/R da SE/UHE Tucuruí 500 kV são consideravelmente maiores que os mesmos parâmetros da SE São Luis 500 kV.

A SE/UHE Tucuruí está localizada em um centro de geração e influência dos geradores da usina, que possuem elevados valores de relação X/R. Se forem aplicados os fatores de assimetria relacionados à relação X/R, todos os disjuntores da SE/UHE Tucuruí estariam superados no horizonte 2018.

A relação X/R muito alta pode submeter os disjuntores à solicitações por período de tempo maiores que aquelas que comumente são esperadas pelos equipamentos. As contribuições de gerações próximas à subestações devem ser consideradas nos cálculos de especificações de equipamentos, em especial neste caso, os disjuntores.

O que permite concluir que para realizar a especificação básica de disjuntores é importante utilizar-se de diferentes metodologias e ferramentas, a depender da localização de sua instalação, visto que os disjuntores próximos à geração são submetidos à situações de maiores solicitações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR IEC 60694: 2006. Especificações Comuns para Normas de Equipamentos de Manobra de Alta-Tensão e Mecanismos de Comando (na IEC esta norma recebeu – em 2008 – o número 62271-1).

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa ANEEL nº 443, de 26 de julho de 2011. Estabelece a distinção entre melhorias e reforços em instalações de transmissão sob responsabilidade de concessionárias de transmissão e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2011443.pdf>. Acesso em 20 de julho de 2017.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa ANEEL nº 643, de 16 de dezembro de 2014. Altera a Resolução Normativa nº 443, de 26 de julho de 2011, altera a Resolução Normativa nº 435, de 24 de maio de 2011, aprova a Revisão 1.1 do Submódulo 9.7 dos Procedimentos de Regulação Tarifária – PRORET, revoga a Resolução Normativa nº 491, de 5 de junho de 2012, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/021/resultado/ren2014643.pdf>. Acesso em 20 de julho de 2017.

ANEEL. 2017/01. **ANEEL aprova distinção entre reforços e melhorias em instalações de transmissão.** Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4379&id_area=90. Acesso em 13 de maio de 2017.

ANEEL. 2017/02. Relatório de Acompanhamento Diferenciado de Empreendimentos de Expansão da Rede Básica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relat%C3%B3rio+Trimestral+de+Acompanhamento+Diferenciado+dos+Empreendimentos+de+Transmiss%C3%A3o/46a5edc5-c67c-48fe-b7dc-abeaa023402c>. Acesso em 15 de abril de 2017.

ANSI/IEEE C37.010. Application Guide for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basics, 1999.

BRASIL. ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília, 2008.

BRASIL. 2017. Usina Hidrelétrica de Belo Monte inicia sua operação comercial. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/04/usina-de-belo-monte-inicia-operacao-comercial>>. Acesso em 17 de junho de 2017.

Carta ONS – 1223/100/2016 de 19.08.2016. Disponível em: <https://pops.ons.org.br>. Acesso em 13 de abril de 2017.

CARVALHO, A. C. et al. Superação de Equipamentos de Alta Tensão: Critérios de Análise e Processo de Indicações de Substituições na Rede Básica e Demais Instalações da Transmissão. **XIX SNPTEE, artigo SGE**, v. 97.1997.

CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.dre.cepel.br/>> Acesso em 14 de junho de 2017.

CIDADE. 2017. Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Disponível em: <http://cidadedetucurui.com/inicio/usina_hidreletrica_tucurui/USINA_HIDRELETRICA_TUCURUI.htm>. Acesso em 18 de maio de 2017.

CIGRÉ. Brochura cigré 304 “Guide for Application of IEC 62271-100 and IEC 62271-1 part 1 General Subjects Working Group a3.11 october 2006.

CRUZ, Diogo Pereira Marques. CÁLCULO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO OS EFEITOS DO SOLO NA PROPAGAÇÃO TRANSVERSAL DA ONDA. 2007. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

DARTAWAN, Ketut; ST PIERRE, Conrad. Proposed methods to determine fault point X/R ratio for breaker evaluation. In: **Petroleum and Chemical Industry Conference, 2003. Record of Conference Papers. IEEE Industry Applications Society 50th Annual.** IEEE, 2003. p. 213-221. 2003.

DAS, J. C. Calculations of generator source short-circuit current according to ANSI/IEEE and IEC standards, with EMTP verifications. In: Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2009. PPIC'09. Conference Record of 2009 Annual. IEEE, 2009. p. 205-215.

DUAILIBE, P. Subestações: Tipos. Equipamentos e Proteção—Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckon da Fonseca, 1999.

EEUG. European EMTP-ATP Users Group. Disponível em <<http://eeug-test.hostingkunde.de/>>. Acesso em 19 de junho de 2017.

Eletronorte – Centrale de Tucuruí – Poste Blinde 550 kV – Etude des courants de court – circuit à proximité de la Centrale. Delle – Alstom, Villeurbanne, Departament Haute – Tension. 1978.

Eletronorte. Relatório de geração por Estado. Disponível em <<http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/para/>> Acesso em maio de 2017.

EPE. 2010. Plano de Decenal de Expansão de Energia – PDEE 2010/2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20101129_1.pdf>. Acesso em 13 de maio de 2017.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2016 - Ano base 2015: Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2016.

FERREIRA, Clarissa S.; BORGES, Carmen LT. Solução do problema de superação de disjuntores pela alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito utilizando algoritmos genéticos. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 18, n. 4, p. 501-512, 2007.

FRONTIN, Sergio O. et al. Equipamentos de alta tensão–prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. **Finatec UNB, 1ª Edição, Brasília**, 2013.

GRIGOLETTO, Fernando Antônio. Análise Comparativa entre as Metodologias Ansi e IEC para o Cálculo de Curto-Circuito em Sistemas Industriais. UNIFEI. Dissertação De Mestrado, Setembro 2013.

GUIMARÃES, E. B. de A., NEUMANN, M. T. P. Programa para cálculo de curtocircuito. Projeto Final de Graduação da Universidade Federal do Paraná, 2009.

IEC 62271-100 Edição 2.1 (2012-09). High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: Alternating-current Circuit Breakers.

JADEJA, Prachal; SHRIVASTAVA, Abhijeet. Effects of DC Components on Circuit Breaker. International Journal of Science and Research (IJSR). Issue 10, October 2015.

KINDERMANN, Geraldo. Curto-circuito, 2ª. **Edição–Porto Alegre–Sagra Luzzatto**, 1997.

MACHADO, C. et al. Tucuruí's generator step-up transformer failures due to very-fast transients in GIS. In: Proc. Int. Conf. Power Systems Transients (IPST). p. 290-285. 1997.

MELLO, Danilo Martins de et al. Análise de características de subestações isoladas blindadas agás e comparação frente a projetos convencionais. 2012. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

MME. Ministério de Minas e Energias. Balanço Energético Nacional, 2016 – Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf. Acesso em 13 de maio de 2017.

MONTEIRO, Andréia Maia. Um estudo de dispositivos limitadores de correntes de curto circuito com ênfase no IPC (INTERPHASE POWER CONTROLLER). **COPPE/UFRJ: Dissertação (Mestrado)**, 2005.

MUZY, Gustavo Luiz Castro de Oliveira. Subestações elétricas. Projeto Final (Graduação em Engenharia Elétrica) UFRJ. Rio de Janeiro. 2012.

NERI, Thiago Fernandes. PROTEÇÃO DE PERDA DE SINCRONISMO– APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL BRASILEIRO. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

Norte Energia. Biblioteca de Imagens UHE Belo Monte. Disponível em <http://bancoimagem.norteenergiasa.com.br/bancoimg/#!/?page_id=2290>. Acesso em 18 de junho de 2017.

Norte Energia. Usina Hidrelétrica de Belo Monte. Disponível em <<http://norteenergiasa.com.br/site/portugues/usina-belo-monte/>>. Acesso em 18 de junho de 2017.

Nota Técnica ONS NT 134/2014 – Análise de Curto-Circuito de Disjuntores da SE Tucuruí 500 kV, de 02.09.2014.

Nota Técnica ONS NT 0099/2016 – Análise de Superação da UHE/SE 500 kV Tucuruí 1ª e 2ª Etapas, de 16.08.2016.

ONS. 2014. Critérios para Análise de Superação de Equipamentos e Instalações de Alta Tensão. Rev.I, fevereiro de 2015. Disponível em:

http://www.ons.org.br/download/administracao_transmissao/engenharia_transmissao/CriteriosdeSuperac%C3%A3o_GTAS.pdf. Acesso em 14 de abril de 2017.

ONS, 2015. Dados Relevantes do ano de 2015. Disponível em <http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADOS_2015/html/4-2.html>. Acesso em 15 de maio de 2017.

ONS, 2017. Mapas do SIN. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em 15 de julho de 2017.

PINTO, Lúcio Flávio. De Tucuruí a Belo Monte: a história avança mesmo. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, v. 7, n. 3, p. 777-782, 2012.

PRIKLER, László; HØIDALEN, Hans Kristian. ATPdraw Version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista-Users' Manual. European EMTP ATP Users User Group, 2009.

Relatório ASA II, Alstom, Siemens, ABB: TUF-E-GIS 4063 “Cálculo da corrente de curto-circuito, X/R e TRT”.

Relatório RE EPPT- 1.002/17 - UHE/SE Tucuruí: análise da limitação de curtos-circuitos, de 31.03.2017.

Relatório Técnico – ONS RE2.1/090-2003 - Critérios para a especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada.

SANTOS, Milton. **Atlas nacional do Brasil**. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.

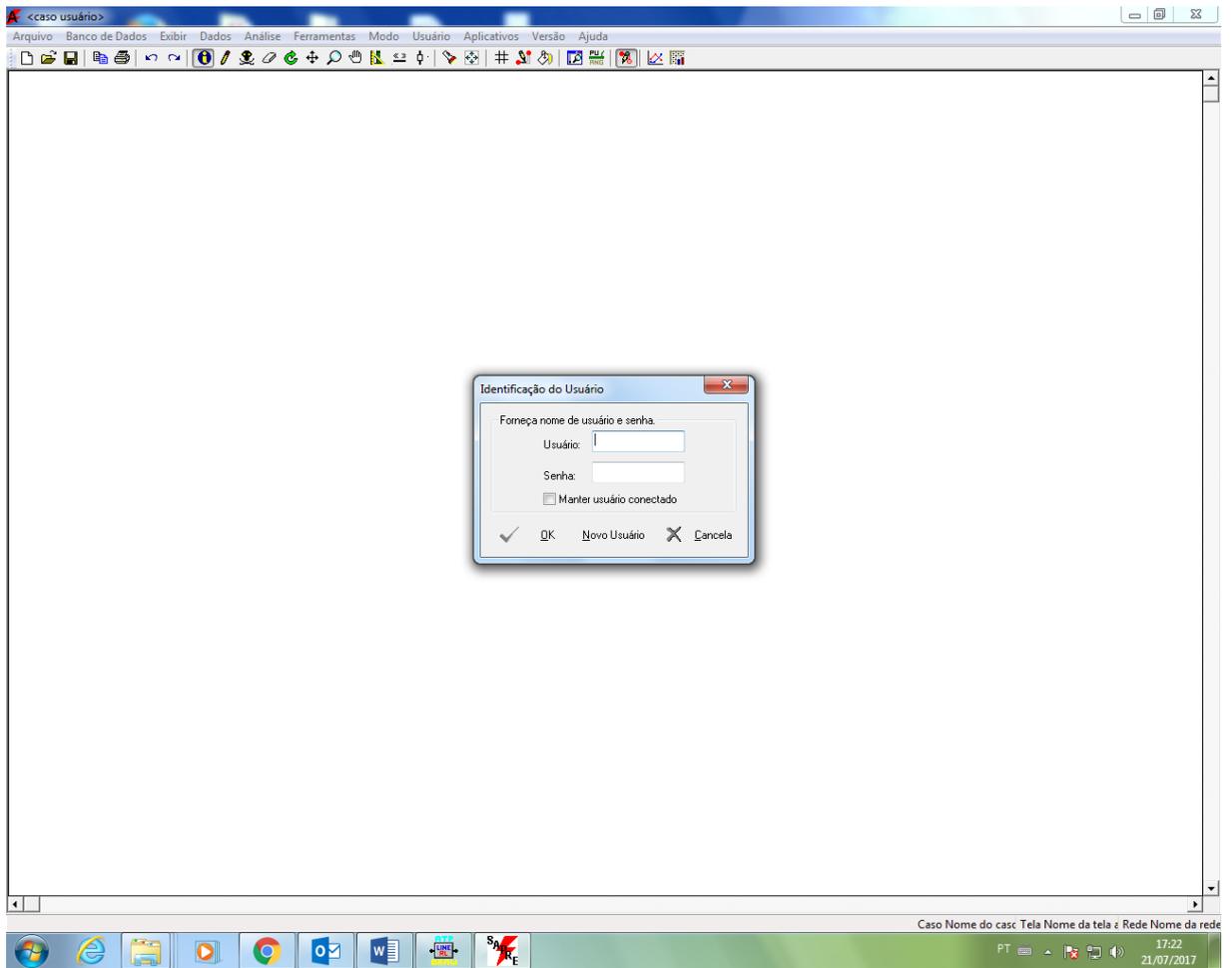
SINDER, Daniel. Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão. 2007. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

ANEXO I: Manual com instruções para cálculo dos equivalentes dentro da base de curto-circuito do software ANAFAS no ambiente gráfico SAPRE.

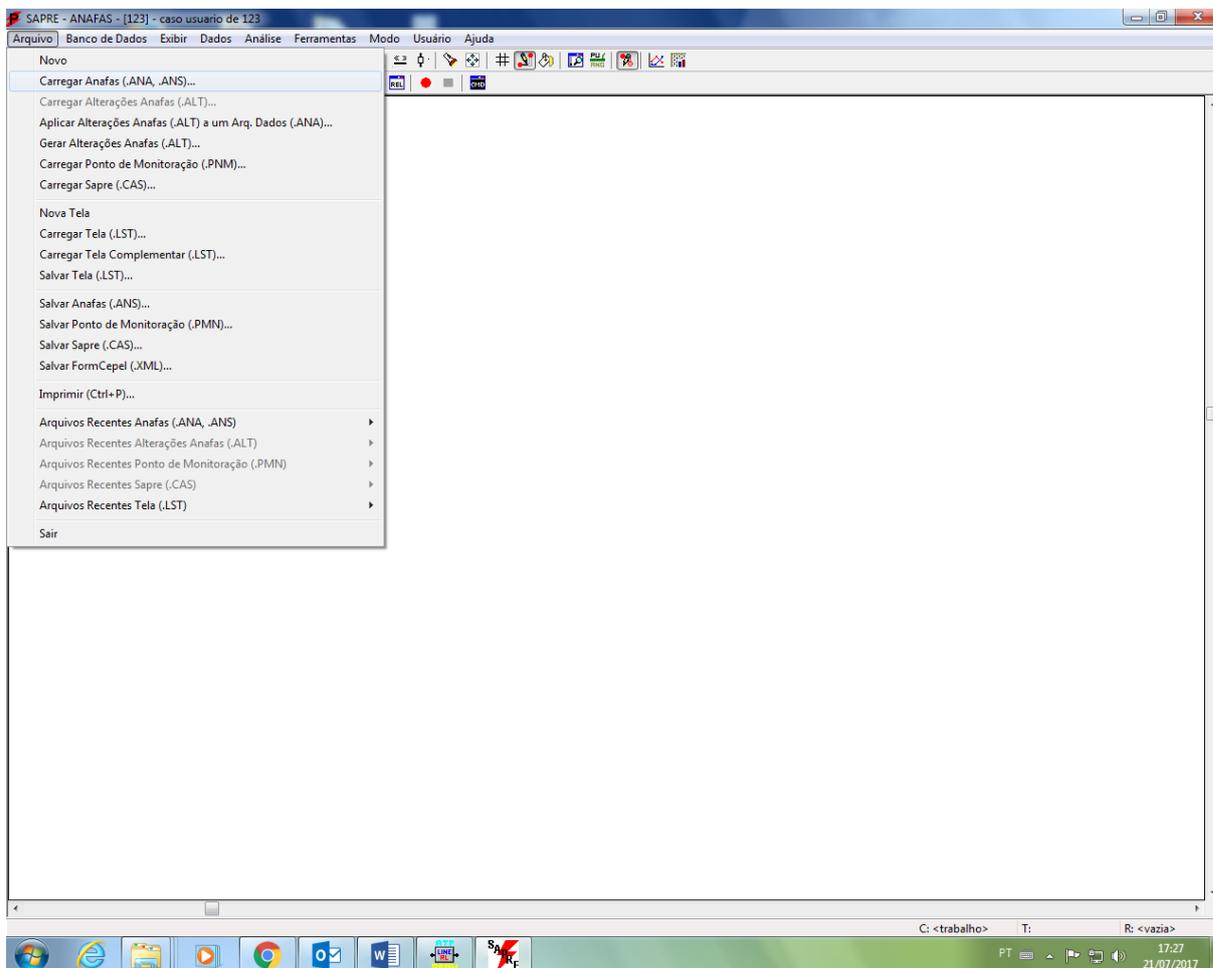
Os equivalentes de curto-circuito obtidos no SAPRE podem ser utilizados no APT com a ressalva de que os valores do SAPRE estão em percentual na base de 100MVA. Os valores precisam ser convertidos para ohms (Ω) para serem usados na transição do SAPRE para ATP ou PSCAD.

Passo 1 – Abrir o Programa de curto-circuito do CEPEL de nome SAPRE, fazer login.

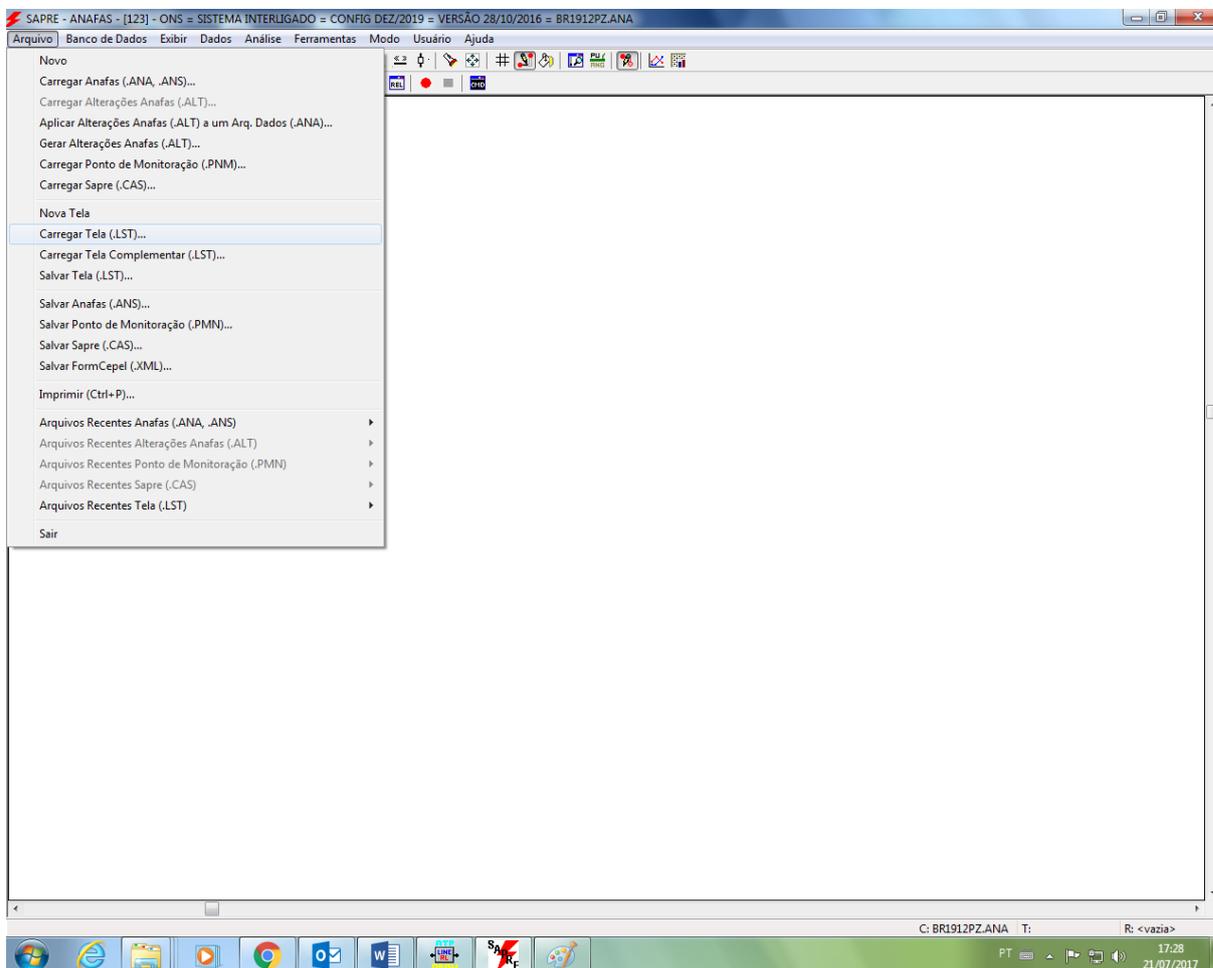




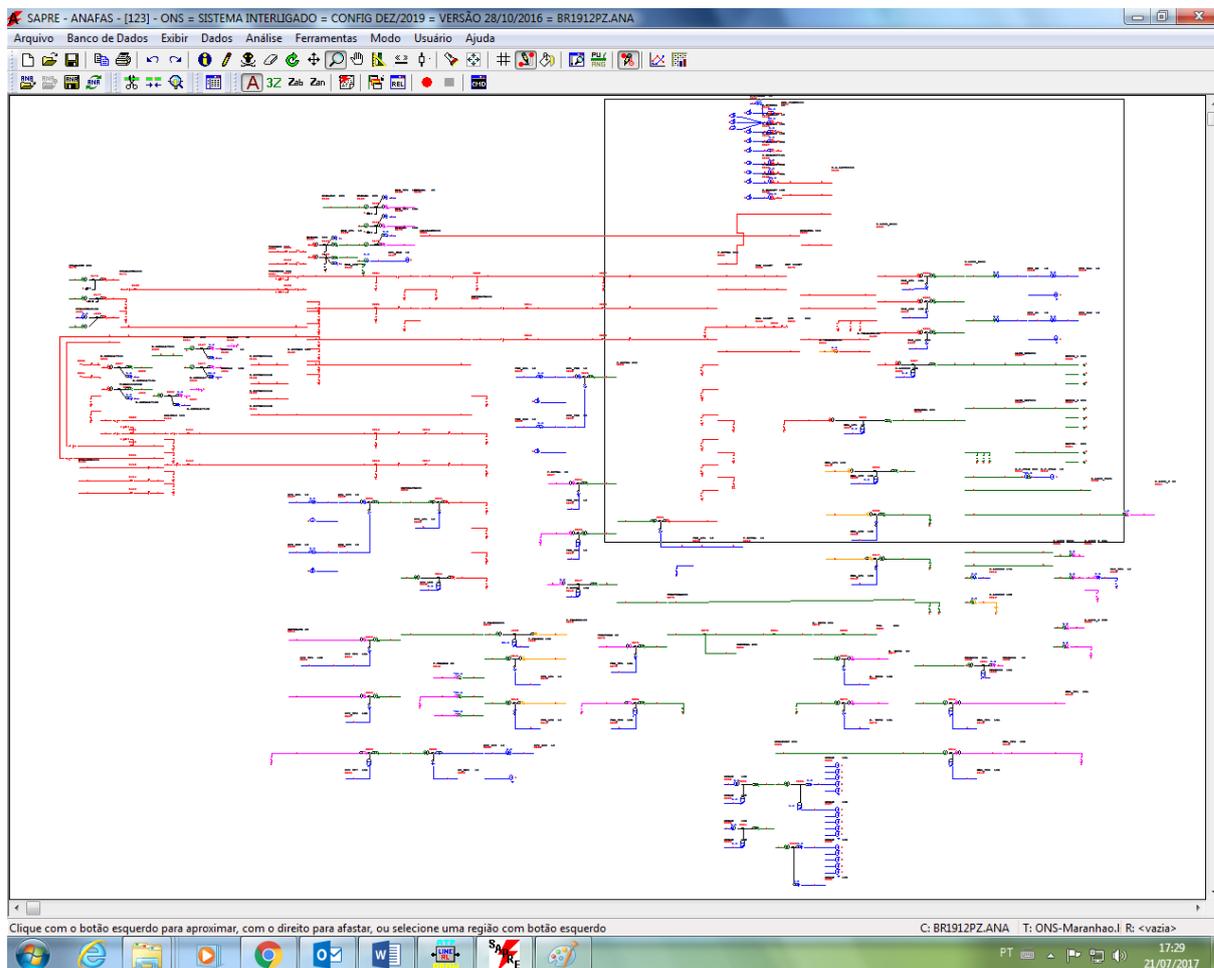
Passo 2 – Ir para o menu <Arquivo>, selecionar a opção <Carregar Anafas> e abrir o arquivo da base de dados do SAPRE de extensão .ANA disponibilizado pelo ONS.



Passo 3 – Ir novamente ao menu <Arquivo> e desta vez selecionar a opção <Carregar Tela> e abrir o arquivo da base de dados do SAPRE de extensão .LST disponibilizado pelo ONS.

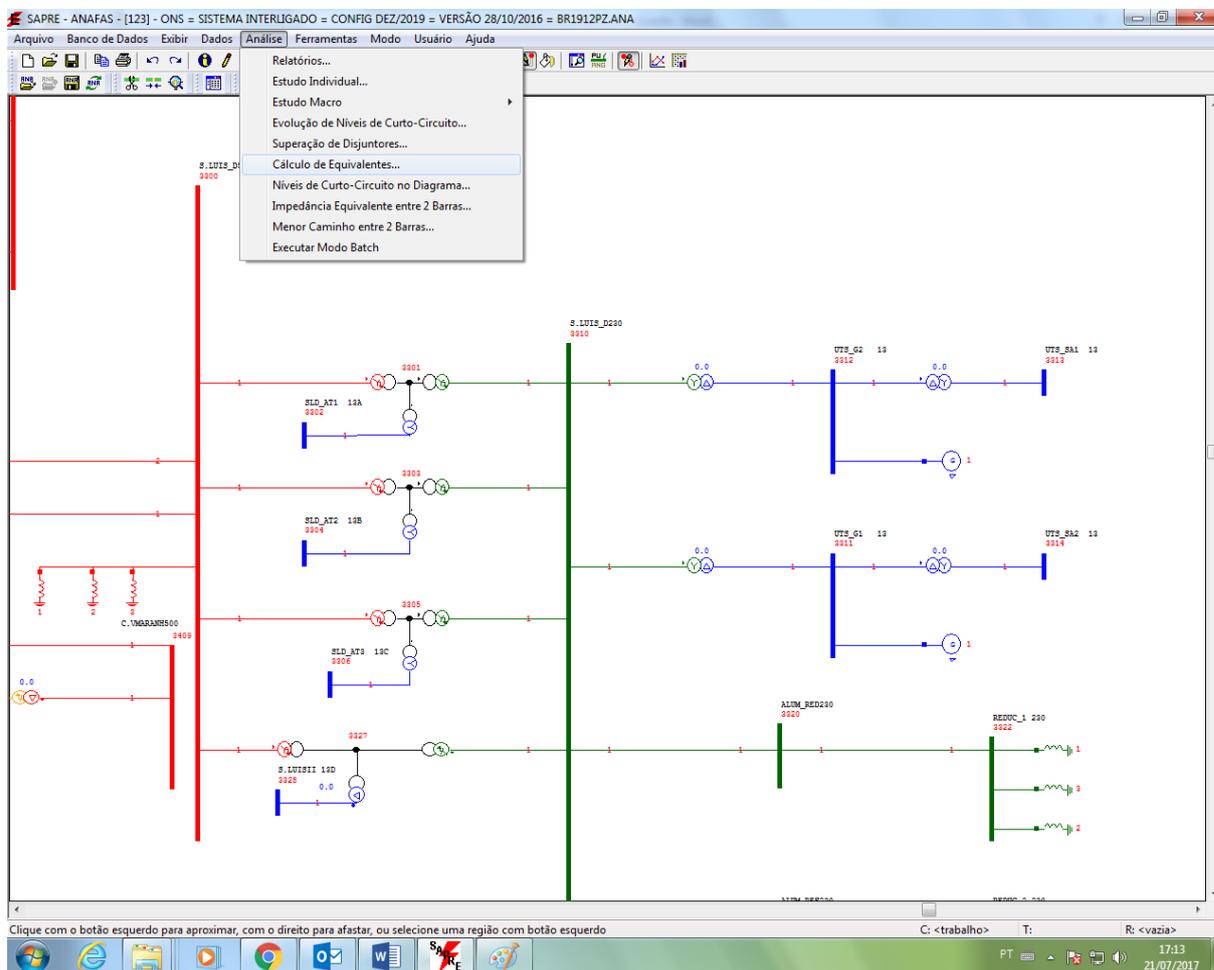


Feito isso a tela ficará como mostra a figura a seguir:

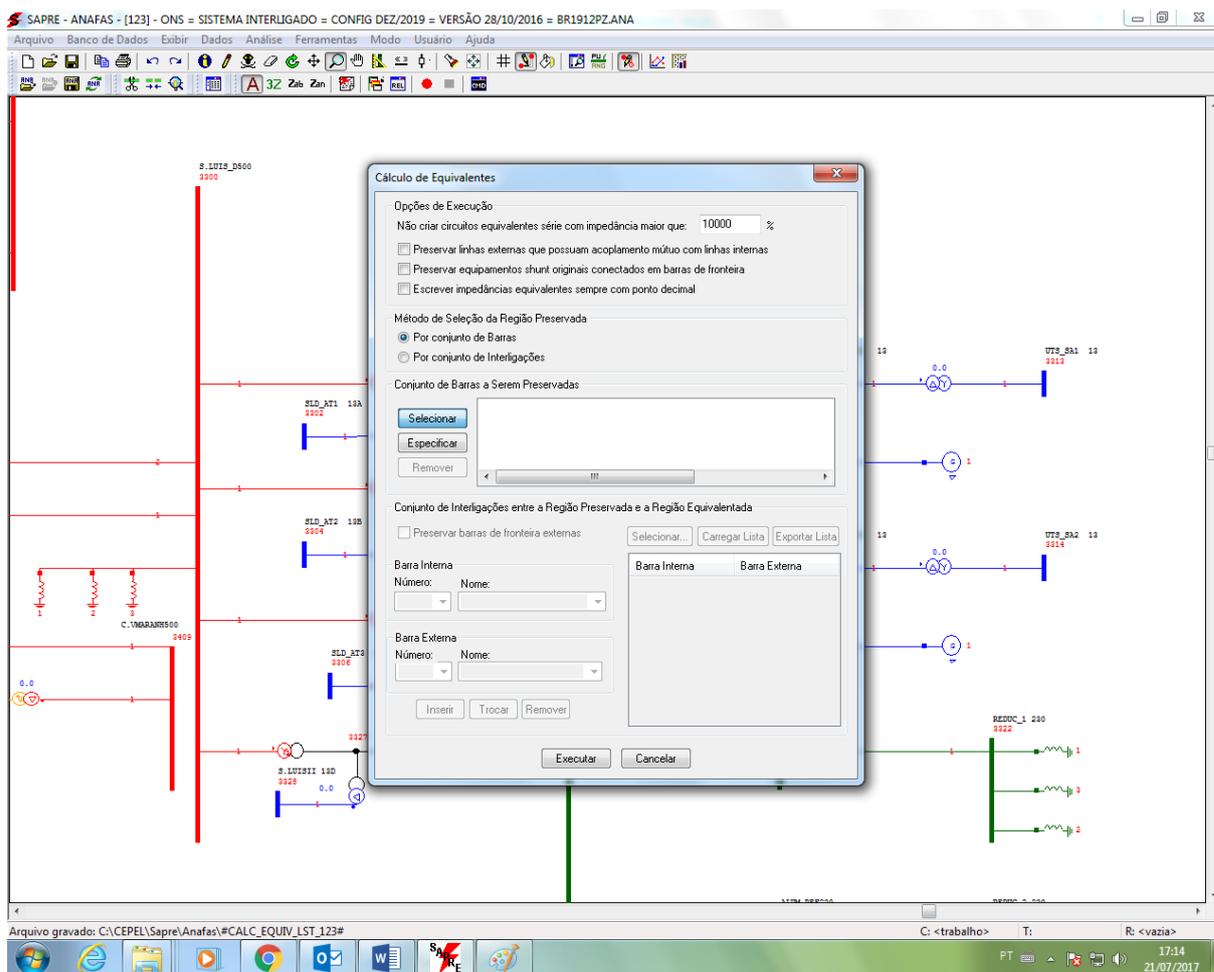


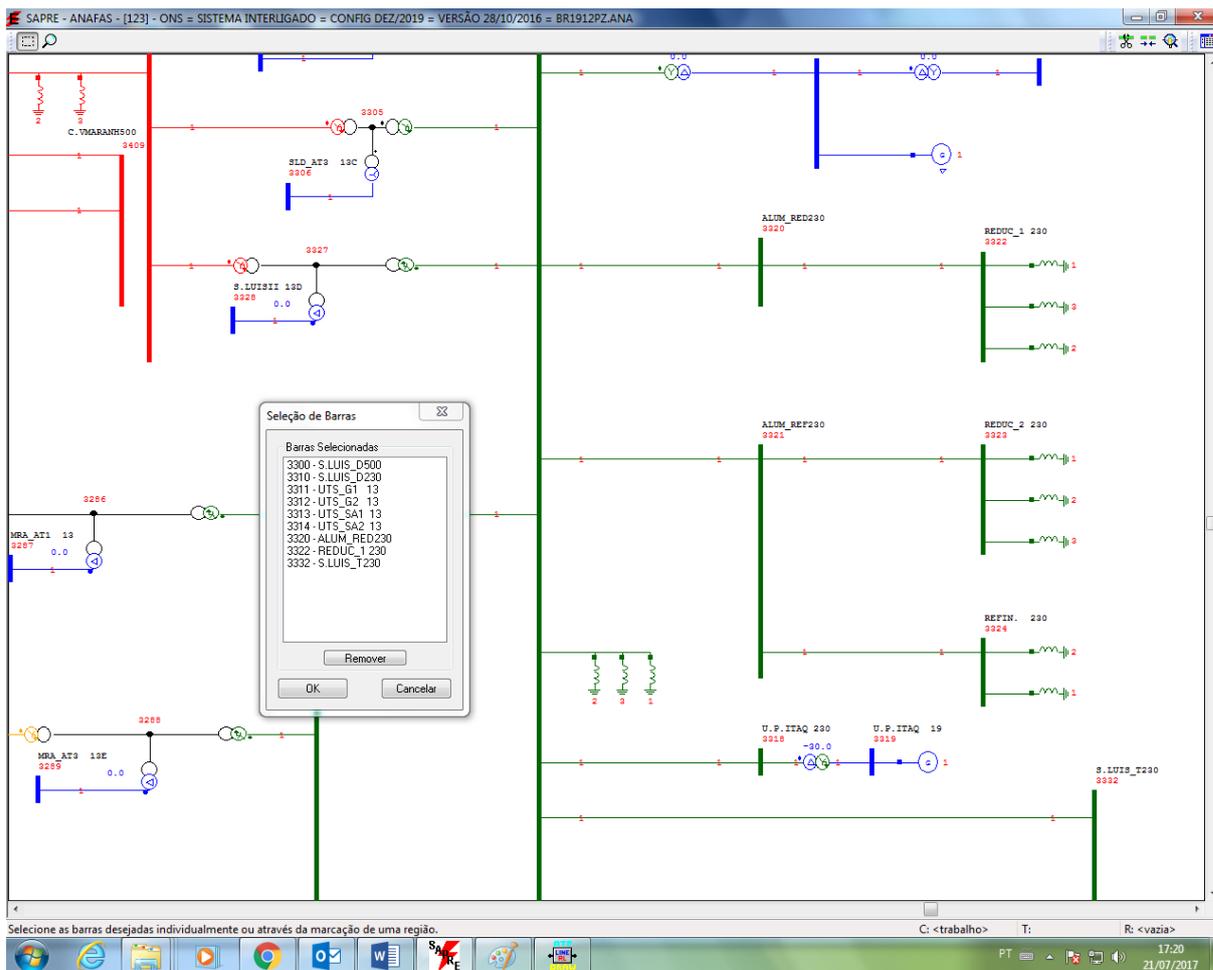
Então, basta ampliar o circuito nos pontos de interesse para melhor visualização.

Passo 4 – Para cálculo dos equivalentes de curto circuito, ir até a barra de ferramentas do SAPRE e selecionar a opção <Análise>, em seguida a opção <Cálculo de Equivalentes>.



Passo 5 – Uma janela irá surgir e o usuário deve selecionar se deseja realizar o cálculo dos equivalentes de curto circuito por conjunto de barras ou interligações. Então deve selecionar as Barras que deseja manter no diagrama por meio da opção <Selecionar>, em seguida clicar nas barras a serem preservadas no desenho.





Ao término da seleção de barras, clicar em <OK> e então o programa realizará a simulação, gerando um relatório e uma nova tela apenas com as barras selecionadas. O relatório é parecido com a figura a seguir, que mostra apenas detalhe, visto que o relatório pode conter inúmeras páginas.

ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2019 = VERSÃO 28/10/2016 = BR1912PZ.ANA

SAPRE - REDE:<vazia> CASO:BR1912PZ.ANA
 ESTUDO DE SUPERACÃO DE DISJUNTORES

ARQUIVO DE DADOS: #DT_ANF_123#

OPÇÕES DE IMPRESSÃO:

- Imprimir 5 primeiras tabelas do estudo? NÃO
- Imprimir relação de barras em estado ALERTA e relação de barras em estado SUPERADO? NÃO
- Percentual de superação para a segunda etapa do estudo:
 Barras com mais de 0.0 % de superação.
- Imprimir valores com vírgula ao invés de ponto decimal? SIM

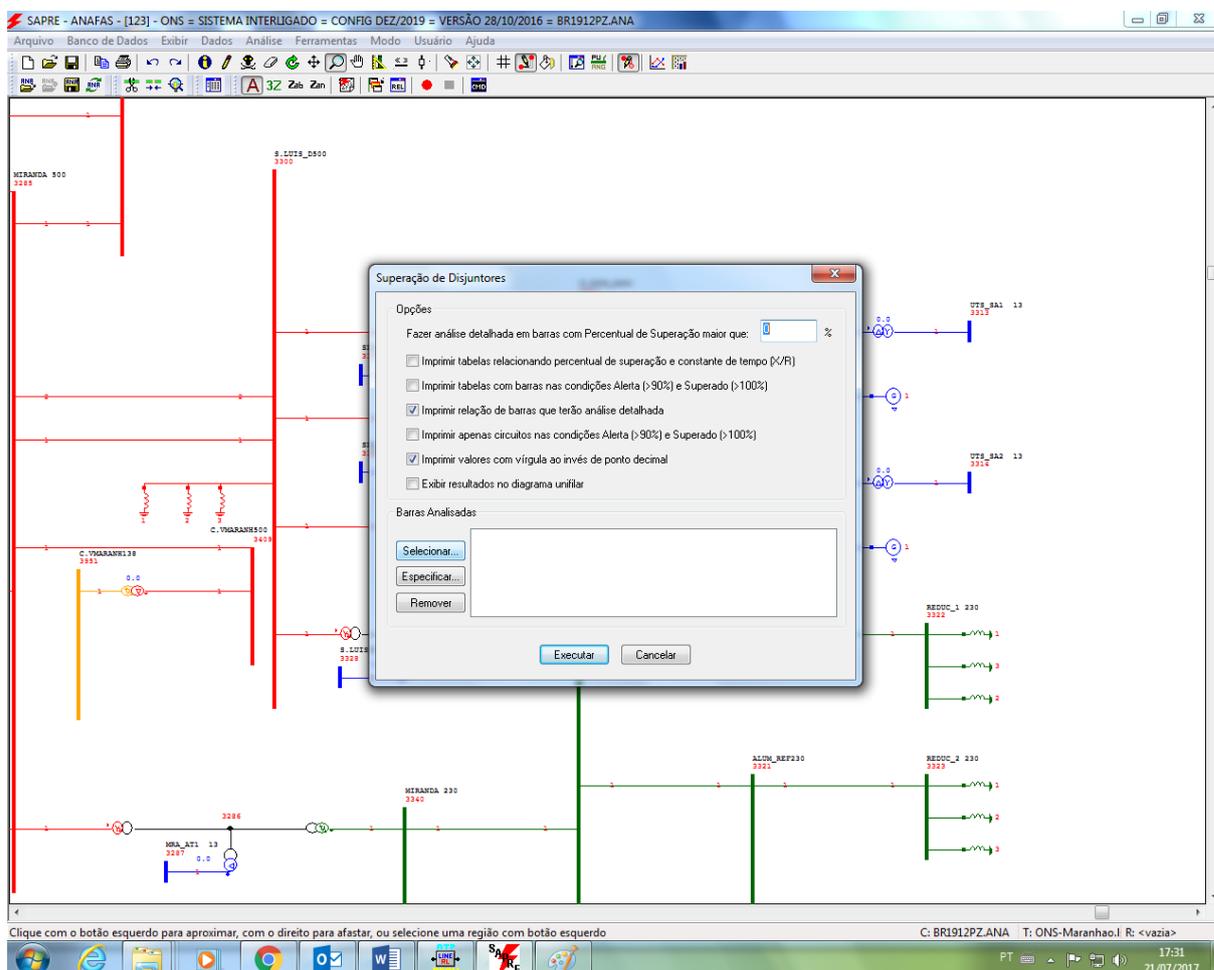
Relação de barras que terão suas correntes de contribuição analisadas na etapa a seguir deste estudo:

(Todas as que tiverem nível de curto acima de 0.0 % da capacidade do menor disjuntor)

Total: 8

| Identificação da SE | | | Nível CC | | | | | | Menor | Maior % | |
|---------------------|--------------|------------|------------|------|-----------|------|----------|------|---------|---------|----------|
| Barra | | | Monofásico | | Trifásico | | BifTerra | | Disjun. | Cap. | % |
| Num. | Nome | Área VBase | Ncc(kA) | X/R | Ncc(kA) | X/R | Ncc(kA) | X/R | (kA) | Nominal | Situação |
| 3000 | TUCURUI 500 | 23 500,0 | 39,9 | 38,1 | 35,2 | 32,8 | 38,4 | 36,3 | ***** | 0,0 | |
| 3024 | TUCURUI2 500 | 23 500,0 | 46,3 | 19,0 | 46,6 | 16,0 | 46,9 | 17,3 | ***** | 0,0 | |

Passo 2 – Uma janela irá surgir e o usuário deve selecionar quais as barras ele deseja estudar a superação de disjuntores. Após a seleção das barras e clicar em <Executar> o programa irá carregar a simulação e emitir um relatório.



SAPRE - ANAFAS - [123] - ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2019 = VERSÃO 28/10/2016 = BR1912PZ.ANA

Seleção de Barras

Barras Selecionadas

- 3000 - TUCURUI 500
- 3024 - TUCURUI2 500
- 3150 - MARABA 500
- 3200 - IMPERATR500
- 3220 - ACAILAND500
- 3250 - P. DUTRA 500
- 3285 - MIRANDA 500
- 3300 - S. LUIS_D500
- 8160 - TSD 500KV
- 8170 - SBT 500KV

Remover

OK Cancelar

Selecione as barras desejadas individualmente ou através da marcação de uma região.

C: BR1912PZ.ANA T: ONS-Maranhao.I R: <vazia>

PT 17:32 21/07/2017

SAPRE - ANAFAS - [123] - ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2019 = VERSÃO 28/10/2016 = BR1912PZ.ANA

Arquivo Banco de Dados Exibir Dados Análise Ferramentas Modo Usuário Ajuda

Superação de Disjuntores

Opções

- Fazer análise detalhada em barras com Percentual de Superação maior que: %
- Imprimir tabelas relacionando percentual de superação e constante de tempo (X/R)
- Imprimir tabelas com barras nas condições Aleta (>90%) e Superado (>100%)
- Imprimir relação de barras que terão análise detalhada
- Imprimir apenas circuitos nas condições Aleta (>90%) e Superado (>100%)
- Imprimir valores com vírgula ao invés de ponto decimal
- Exibir resultados no diagrama unifilar

Barra Analisadas

| | |
|----------------|-----------|
| Selecionar... | BARR 3000 |
| | BARR 3024 |
| | BARR 3150 |
| Especificar... | BARR 3200 |
| | BARR 3220 |
| | BARR 3250 |
| Remover | BARR 3285 |

Executar Cancelar

Clique com o botão esquerdo para aproximar, com o direito para afastar, ou selecione uma região com botão esquerdo

C: BR1912PZ.ANA T: ONS-Maranhão.I R: <vazia>

PT 17:33 21/07/2017

SAPRE - ANAFAS - [123] - ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2019 = VERSÃO 28/10/2016 = BR1912PZ.ANA (Não está respondendo)

Arquivo Banco de Dados Exibir Dados Análise Ferramentas Modo Usuário Ajuda

Superação de Disjuntores

Opções

Fazer análise detalhada em barras com Percentual de Superação maior que: 0 %

Imprimir tabelas relacionando percentual de superação e constante de tempo (X/R)

Imprimir

Imprimir

Imprimir

Imprimir

Exibir

Barras Analisadas

Selecionar

Especificar

Remover

BARR 3230
BARR 3250
BARR 3205

Executar Cancelar

Executando ANAFAS...

Clique com o botão esquerdo para aproximar, com o direito para afastar, ou selecione uma região com botão esquerdo

C: BR1912PZ.ANA T: ONS-Maranhão.I R: <vazia>

17:33
21/07/2017

SAPRE - ANAFAS - [123] - ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2019 = VERSÃO 28/10/2016 = BR1912PZ.ANA

Arquivo Banco de Dados Exibir Dados Análise Ferramentas Modo Usuário Ajuda

Resultados

Arquivo Procurar Visualizar lin:1 col:1

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica Pag. 1
ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas

ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2019 = VERSÃO 28/10/2016 = BR1912PZ.ANA

SAPRE - REDE:<vazia> CASO:BR1912PZ.ANA
E S T U D O D E S U P E R A Ç Ã O D E D I S J U N T O R E S

ARQUIVO DE DADOS: #DI_ANF_123#

OPÇÕES DE IMPRESSÃO:

- Imprimir 5 primeiras tabelas do estudo? NÃO
- Imprimir relação de barras em estado ALERTA e relação de barras em estado SUPERADO? NÃO
- Percentual de superação para a segunda etapa do estudo: Barras com mais de 0.0 % de superação.
- Imprimir valores com vírgula ao invés de ponto decimal? SIM

Relação de barras que terão suas correntes de contribuição analisadas na etapa a seguir deste estudo: (Todas as que tiverem nível de curto acima de 0.0 % da capacidade do menor disjuntor)

Total: 8

| Identificação da SE | Nível CC | Menor Maio Cap. da |
|---------------------|----------|--------------------|
| 4 | | |

Clique com o botão esquerdo para aproximar, com o direito para afastar, ou selecione uma região com botão esquerdo

C: BR1912PZ.ANA T: ONS-Maranhao.I R: <vazia>

PT 17:45 21/07/2017

Resultados

Arquivo Procurar Visualizar

lin1 col-3999

etapa a seguir deste estudo:
(Todas as que tiverem nível de curto acima de 0.0 % da capacidade do menor disjuntor)
Total: 8

| Identificação da SE | | Nível CC | | | | | | Menor Maior % | | | | |
|---------------------|--------------|------------|-------|-----------|------|----------|------|----------------------|-------|------|---------|----------|
| Barra | | Monofásico | | Trifásico | | Bifterra | | Cap. da Disjun. Cap. | | | | |
| Num. | Nome | Área | VBase | Ncc(kA) | X/R | Ncc(kA) | X/R | Ncc(kA) | X/R | (kA) | Nominal | Situação |
| 3000 | TUCURUI 500 | 23 500,0 | 39,9 | 38,1 | 35,2 | 32,8 | 38,4 | 36,3 | ***** | 0,0 | | |
| 3024 | TUCURUI2 500 | 23 500,0 | 46,3 | 19,0 | 46,6 | 16,0 | 46,9 | 17,3 | ***** | 0,0 | | |
| 3150 | MARABA 500 | 23 500,0 | 20,3 | 6,9 | 34,2 | 12,6 | 31,2 | 11,0 | ***** | 0,0 | | |
| 3200 | IMPERATR500 | 24 500,0 | 22,8 | 9,7 | 29,3 | 10,7 | 27,1 | 10,4 | ***** | 0,0 | | |
| 3220 | ACAILAND500 | 24 500,0 | 11,7 | 6,3 | 21,6 | 12,1 | 19,6 | 10,6 | ***** | 0,0 | | |
| 3250 | F.DUTRA 500 | 24 500,0 | 17,6 | 7,9 | 24,1 | 12,2 | 22,5 | 10,4 | ***** | 0,0 | | |
| 3285 | MIRANDA 500 | 24 500,0 | 12,3 | 9,5 | 19,9 | 17,9 | 19,6 | 13,4 | ***** | 0,0 | | |
| 3300 | S.LUIS_D500 | 24 500,0 | 11,1 | 16,5 | 9,4 | 17,2 | 10,6 | 16,6 | ***** | 0,0 | | |

2) Contribuições de corrente pelos diversos disjuntores de cada barra com corrente de curto total acima de 0.0 % da sua menor capacidade de interrupção:

| Identificação da SE | | Nível CC | | | | | |
|---------------------|-------------|------------|-------|-----------|-------|----------|-------|
| Barra | | Monofásico | | Trifásico | | Bifterra | |
| Num. | Nome | Área | VBase | Ncc(kA) | X/R | Ncc(kA) | X/R |
| 3000 | TUCURUI 500 | 23 500,0 | 39,92 | 38,1 | 35,25 | 32,8 | 38,41 |

| Identificação do Circuito | | Cap. Interr. | Corrente de contribuição | | | | | | Relação ICC/IOCS | | | | |
|---------------------------|---------------|--------------|--------------------------|----|-----------|-----------------|----------------|---------------|------------------|-------|--------|----------|------|
| N BT | Nome BT | NC | NomeCI | T | IOCS (kA) | Monofásico (kA) | Trifásico (kA) | Bifterra (kA) | Cond. Monof. | Trif. | Bifter | Situação | |
| 3024 | TUCURUI2 500 | | RELI | ND | 31,90 | 3 | 27,75 | 3 | 30,59 | 3 | 0,00 | 0,00 | |
| 3025 | SE TUCURUI500 | | AUTC | ND | 39,04 | 3 | 34,67 | 3 | 37,60 | 3 | 0,00 | 0,00 | |
| 3100 | V.CONDE 500 | 2 | TV2C | ND | 38,89 | 3 | 34,17 | 3 | 37,41 | 3 | 0,00 | 0,00 | |
| 3155 | AAMB_IC 500A | | TCM1 | ND | 37,94 | 3 | 33,04 | 3 | 36,40 | 3 | 0,00 | 0,00 | |
| 3156 | AAMB_IC 500B | | TCM2 | ND | 37,99 | 3 | 32,99 | 3 | 35,95 | 3 | 0,00 | 0,00 | |
| 3001 | G-1 TUC 13 | | TF-1 | T | ND | 38,88 | 2 | 33,87 | 3 | 37,29 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3002 | G-2 TUC 13 | | TF-2 | T | ND | 38,90 | 2 | 33,76 | 3 | 37,21 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3003 | G-3 TUC 13 | | TF-3 | T | ND | 38,87 | 2 | 33,85 | 3 | 37,28 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3004 | G-4 TUC 13 | | TF-4 | T | ND | 38,94 | 2 | 33,95 | 3 | 37,36 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3005 | G-5 TUC 13 | | TF-5 | T | ND | 38,88 | 2 | 33,86 | 3 | 37,29 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3006 | G-6 TUC 13 | | TF-6 | T | ND | 38,80 | 2 | 33,76 | 3 | 37,20 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3007 | G-7 TUC 13 | | TF-7 | T | ND | 38,87 | 2 | 33,85 | 3 | 37,28 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3008 | G-8 TUC 13 | | TF-8 | T | ND | 38,93 | 2 | 33,94 | 3 | 37,35 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3009 | G-9 TUC 13 | | TF-9 | T | ND | 38,88 | 2 | 33,87 | 3 | 37,29 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3010 | G-10 TUC 13 | | TF10 | T | ND | 38,79 | 2 | 33,75 | 3 | 37,20 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3011 | G-11 TUC 13 | | TF11 | T | ND | 38,93 | 2 | 33,94 | 3 | 37,35 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 3012 | G-12 TUC 13 | | TF12 | T | ND | 38,93 | 2 | 33,94 | 3 | 37,35 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | | IFTU | H | ND | 39,11 | 2 | 35,25 | 2 | 37,84 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 2 | IFTU | H | ND | 39,11 | 2 | 35,25 | 2 | 37,84 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 3 | IFTU | H | ND | 39,09 | 2 | 35,25 | 2 | 37,83 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 4 | IFTU | H | ND | 39,10 | 2 | 35,25 | 2 | 37,83 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 5 | IFTU | H | ND | 39,10 | 2 | 35,25 | 2 | 37,84 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 6 | IFTU | H | ND | 39,10 | 2 | 35,25 | 2 | 37,83 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 7 | IFTU | H | ND | 39,09 | 2 | 35,25 | 2 | 37,83 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 8 | IFTU | H | ND | 39,09 | 2 | 35,25 | 2 | 37,83 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 9 | IFTU | H | ND | 39,11 | 2 | 35,25 | 2 | 37,84 | 2 | 0,00 | 0,00 |
| 0 | REFERENCIA | 10 | IFTU | H | ND | 39,09 | 2 | 35,25 | 2 | 37,83 | 2 | 0,00 | 0,00 |

PT 17:45 21/07/2017