



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAYNNE STERFÂNIA AGUIAR DE MELO

**ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA: Estudo Para Integração De
Empreendimento De Geração Centralizada Fotovoltaica Às Instalações De
Transmissão.**

Recife

2022

RAYNNE STERFÂNIA AGUIAR DE MELO

**ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA: Estudo Para Integração De
Empreendimento De Geração Centralizada Fotovoltaica Às Instalações De
Transmissão.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof^o. Dr. Augusto Cesar Cavalcanti de Oliveira

Recife
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Melo, Raynne Sterfânia Aguiar de.

ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA: Estudo Para Integração De
Empreendimento De Geração Centralizada Fotovoltaica Às Instalações De
Transmissão. / Raynne Sterfânia Aguiar de Melo. - Recife, 2022.

85 : il., tab.

Orientador(a): Augusto Cesar Cavalcanti de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2022.

Inclui referências, apêndices.

1. Geração Fotovoltaica. 2. Fluxo de Potência. 3. ANAREDE. 4. Geração
Centralizada. 5. Rede Básica. I. Oliveira, Augusto Cesar Cavalcanti de.
(Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

RAYNNE STERFÂNIA AGUIAR DE MELO

**ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA: Estudo Para Integração De
Empreendimento De Geração Centralizada Fotovoltaica Às Instalações De
Transmissão.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 26/10/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto Cesar Cavalcanti de Oliveira (Orientador)
Departamento de Engenharia Elétrica - CTG/UFPE

Prof. Dr. José Filho da Costa Castro
Departamento de Engenharia Elétrica - CTG/UFPE

Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas
Departamento de Engenharia Elétrica - CTG/UFPE

Dedico este trabalho a toda minha família,
em especial minha filha Marina, minha
fonte inesgotável de força e amor, e aos
meus pais Sandra e Ronaldo, sem os
quais eu nada seria ou teria alcançado.

RESUMO

O ano de 2021 foi marcado pela crise hídrica enfrentada pelo setor de energia elétrica no Brasil, que além de causar uma alta no preço da energia, trouxe mais fortemente a necessidade de uma maior diversificação na matriz elétrica brasileira que depende majoritariamente das fontes hídricas. A energia solar fotovoltaica, por sua vez, se mostra cada vez mais competitiva e viável num país onde são verificados os maiores índices de radiação solar e a expectativa é de grande crescimento. No entanto, essas mudanças trazem consigo grandes desafios para o setor de planejamento de energia. Dessa forma, torna-se cada vez mais importante a execução de estudos e a elaboração de estratégias voltadas para a viabilização e integralização deste perfil de geração em larga escala no sistema interligado nacional. A análise de fluxo de potência corresponde a uma parte das etapas de acesso de uma central geradora ao SIN, identificando os impactos técnicos da integração de geração fotovoltaica e avaliando a viabilidade de conexão considerando o critério de variabilidade de tensão.

Palavras-chave: Fotovoltaica; Geração Centralizada, Fluxo de Potência, ANAREDE.

ABSTRACT

The year 2021 was marked by the water crisis faced by the electricity sector in Brazil, which in addition to causing a rise in energy prices, brought more strongly the need for greater diversification in the Brazilian electricity matrix that depends mostly on water sources. Photovoltaic solar energy, in turn, is increasingly competitive and viable in a country where the highest levels of solar radiation are verified, and the expectation is for great growth. However, these changes bring with them major challenges for the energy planning industry. In this way, it becomes increasingly important to carry out studies and develop strategies aimed at the feasibility and integration of this large-scale generation profile in the national interconnected system. The power flow analysis corresponds to a part of the access stages of a generating plant to the SIN, identifying the technical impacts of the integration of photovoltaic generation and evaluating the feasibility of connection considering the voltage variability criterion.

Keywords: Photovoltaic Generation; Centralized Generation; Power Flow; ANAREDE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Indicadores sociais e consumo de energia.	13
Figura 2: Matriz elétrica Brasileira.....	15
Figura 3: Dados Hidrológicos de volume útil - Reservatório Emborcação.....	16
Figura 4: Evolução da Capacidade Instalada Existente e Contratada do SIN.	17
Figura 5: Síntese dos níveis de irradiação solar por região.	18
Figura 6: Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil.	18
Figura 7: Expansão em capacidade e em energia de MMGD.	19
Figura 8: Expansão da Matriz Elétrica Brasileira, JULHO/2022.	20
Figura 9: Estrutura de bandas de energia.....	24
Figura 10: Composição do Painel fotovoltaico.	25
Figura 11: Composição de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.....	25
Figura 12: Curva Característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100Wp.	26
Figura 13: Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula de silício cristalino sob 25°C.	27
Figura 14: Legislação e Ato autorizativo de acordo relacionados ao tipo de acessante.....	31
Figura 15: Faixas de operação da central geradora em regime de frequência não nominal....	34
Figura 16: Faixa de geração/absorção de potência reativa no ponto de conexão da central geradora.	35
Figura 17: Requisito para atendimento ao fator de potência na faixa operativa de tensão no ponto de conexão.	35
Figura 18: Área selecionada para instalação da central geradora.....	42
Figura 19: Distância entre o ponto de conexão e a área selecionada para instalação da central geradora.	42
Figura 20: Duração dos patamares da carga utilizados para simulação.	43
Figura 21: Mapa indicativo da capacidade remanescente do SIN.....	45
Figura 22: Conexão do empreendimento a SE RECIFE II – 500 kV.....	46
Figura 23: Parametrização do gerador.....	46
Figura 24: Parametrização da barra de geração.....	46
Figura 25: Parametrização do transformador da rede média tensão.....	47

Figura 26: Parametrização da rede média tensão.	47
Figura 27: Parametrização do transformador alta tensão.	48
Figura 28: Relatório de Monitoração de tensão – Violação de tensão no cenário Carga Leve e Norte Seco sem empreendimento.	50
Figura 29: Relatório de Monitoração de tensão – Violação de tensão no cenário Carga Leve e Norte Seco com empreendimento.	50
Figura 30: Primeira vizinhança do ponto de conexão SE RECIFE II – 500kV.	52
Figura 31: Representação no WEBMAP das LTs a serem desligadas na simulação das contingências.	53
Figura 32: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 1.....	57
Figura 33: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 2.....	57
Figura 34: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 3.....	58
Figura 35: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 4.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Tabela de Estudos de Integração do Empreendimento às Instalações de Transmissão.	32
Tabela 2: Prazos para emissão do parecer de acesso.....	33
Tabela 3: Limites de tensão para cada tensão nominal de operação	34
Tabela 4: Dados sobre área e dimensionamento de potência máxima instalada.	43
Tabela 5: Barras Selecionadas para monitoração e seus respectivos limites de tensão.	49
Tabela 6: Lista de Contingências.....	53
Tabela 7: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 1.	54
Tabela 8: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 2.	54
Tabela 9: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 3.	55
Tabela 10: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 4.	55
Tabela 11: Variação de Tensão da SE RECIFE II para perda tempestiva da UFV.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CBIE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CRECESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
eV	Elétron - volt
I_{MP}	Corrente de Máxima Potência
I_{sc}	Corrente de Curto-Circuito
LT	Linha de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	Plano de Ampliações e reforços
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PMP	Ponto de Máxima Potência
P_{MP}	Ponto de Máxima Potência
RMT	Rede Média Tensão
SE	Subestação
SFCRs	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFIs	Sistemas Fotovoltaicos Independentes
SIN	Sistema Interligado Nacional
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
TR	Transformador
UFV	Usina Fotovoltaica
V_{oc}	Tensão de Circuito Aberto

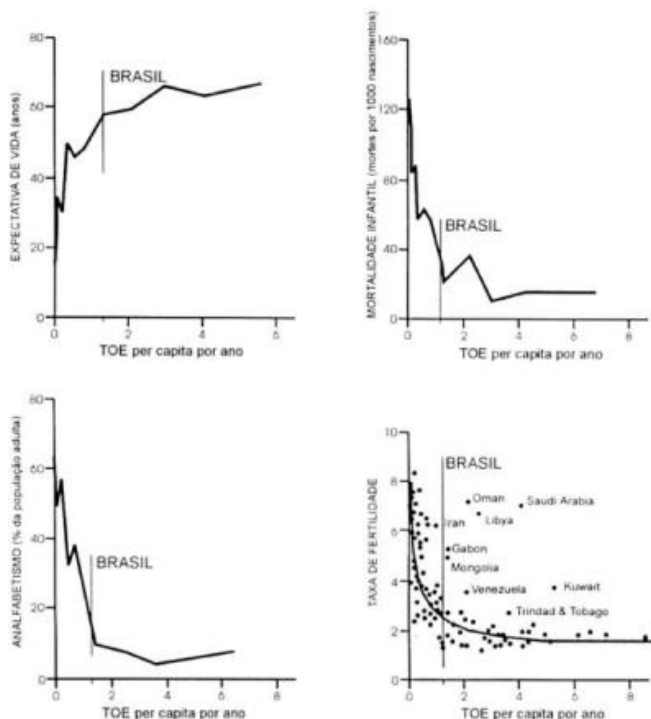
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Geral.....	21
1.1.2	Específicos	21
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	ASPECTOS GERAIS DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ..	23
2.1.1	Efeito Fotovoltaico	23
2.1.2	Sistema de Geração Fotovoltaica.....	24
2.1.2.1	<i>Módulo fotovoltaico.....</i>	<i>24</i>
2.1.2.2	<i>Inversores.....</i>	<i>27</i>
2.2	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CENTRALIZADA	28
2.2.1	Procedimentos de Rede	29
2.2.1.1	<i>Acesso ao Sistema de Transmissão.....</i>	<i>30</i>
2.2.1.2	<i>Requisitos Técnicos Mínimos para Conexão às Instalações de Transmissão de uma Central Geradora Fotovoltaica</i>	<i>33</i>
2.2.2	Estudo Elétrico	35
2.2.2.1	<i>Fluxo de Potência.....</i>	<i>36</i>
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	41
3.1	INTRODUÇÃO.....	41
3.2	BASE DE DADOS	43
3.3	CONEXÃO DO EMPREENDIMENTO	44
3.4	ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS.....	51
3.4.1	Cenário 1	54
3.4.2	Cenário 2	54
3.4.3	Cenário 3	55
3.4.4	Cenário 4	55
3.5	PERDA TEMPESTIVA DA POTÊNCIA TOTAL DO EMPREENDIMENTO ..	56
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica *per capita* de um país está intrinsicamente relacionado ao nível de desenvolvimento socioeconômico dele. O Dossiê de Recursos Naturais elaborado pelo Goldemberg, relaciona na figura abaixo quatro indicadores sociais para diversos países – taxa de analfabetismo, mortalidade infantil, expectativa de vida e taxa de fertilidade total – com o consumo de energia comercial *per capita*. Onde mostra que países com consumo de energia comercial *per capita* abaixo de uma Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP) por ano, possui baixa expectativa de vida e altas taxas de mortalidade infantil, analfabetismo e fertilidade total. Consumos a partir de 2 TEP, apresentam melhores indicadores sociais, como no caso de países desenvolvidos. Dessa forma, é possível compreender como o cenário de investimentos no setor de energia é um fator determinante para o desenvolvimento de um país (GOLDEMBERGE, 1998).

Figura 1: Indicadores sociais e consumo de energia.



Fonte: Dossiê de Recursos Naturais. (GOLDEMBERGE, 1998)

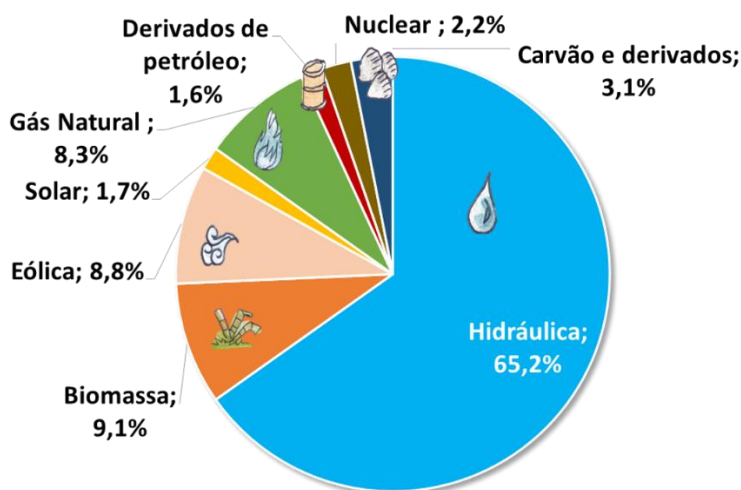
Países em desenvolvimento tendem a apresentar taxa de crescimento no consumo de energia elétrica maior em relação aos países desenvolvidos, os quais algumas vezes podem apresentar inclusive recuo nesse consumo, através de processos produtivos otimizados e políticas de eficiências energética, que também já são consequência de uma maior preocupação com a degradação do meio ambiente. Os impactos causados pela intensa emissão de gases do efeito estufa, a partir da revolução industrial, onde houve o uso extensivo de combustíveis fósseis, veio a motivar acordos como o Protocolo de Kioto, um acordo internacional que busca a diminuição da emissão de gases de efeito estufa. Estes gases são os principais causadores das alterações climáticas identificadas como umas das maiores ameaças ambientais, sociais e econômicas que o planeta e a humanidade enfrentam na atualidade.

Dessa forma, a produção de energia – em particular a energia elétrica – passa a buscar um desenvolvimento mais sustentável, com a utilização em maior escala de diversificadas fontes renováveis, atendendo aos critérios e demandas ambientais. Uma das questões fundamentais para o desenvolvimento sustentável está na inovação e desenvolvimento de tecnologias de conversão e aproveitamento de recursos energéticos naturais (Pereira et al, 2017).

O setor elétrico Brasileiro, é caracterizado por uma diversificada participação de fontes renováveis, incluindo hidráulica, biomassa, eólica e solar, sendo a hídrica a fonte mais amplamente aproveitada, correspondendo a cerca de 65% da matriz elétrica brasileira (EPE, 2021).

A participação das hidroelétricas na matriz elétrica brasileira torna o sistema elétrico brasileiro singular no que tange aos aspectos de impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a hidroeletricidade, assim como todas as fontes renováveis de energia, está sujeita à influência de fatores climáticos de modo que a energia armazenada (representada pelo nível de água acumulada no reservatório) em períodos de seca pode atingir valores críticos sob o ponto de vista de segurança energética (Pereira et al, 2017).

Figura 2: Matriz elétrica Brasileira.



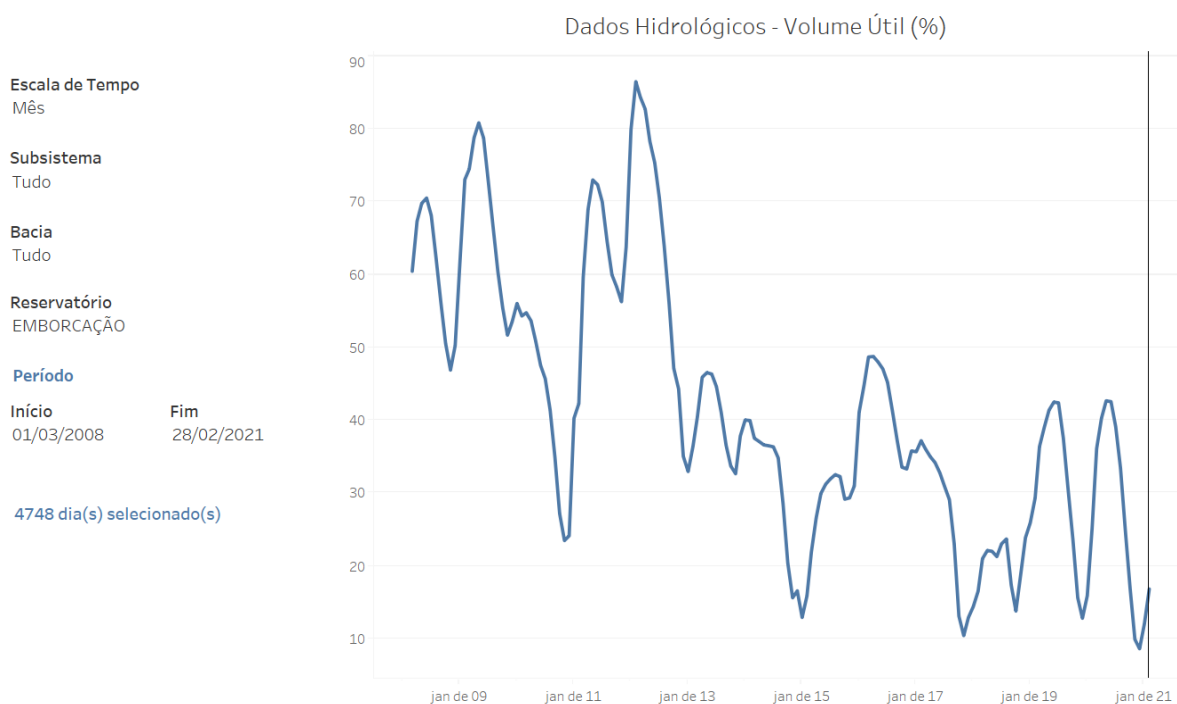
FONTE: Balanço Energético Nacional (EPE, 2021).

Apesar da supremacia e importância da fonte hidráulica para o setor elétrico brasileiro, vinte anos após a crise do Apagão, em 2001, o Brasil enfrentou uma nova crise hídrica decorrente do baixo número de chuvas nos meses de agosto de 2020 a julho de 2021, fazendo com que a energia armazenada nos reservatórios fosse insuficiente para atender a demanda no período seco. Fazendo análise do ponto de vista da oferta, essa crise, de certa forma foi uma crise anunciada, uma vez que, desde 2014 os grandes reservatórios do Sudeste/Centro-Oeste não chegaram a ultrapassar 50% da sua capacidade máxima. A Figura 3, mostra dados hidrológicos da usina Hidrelétrica Emborcação, umas das maiores do Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (ONS, 2021). Essa nova crise evidencia ainda mais a necessidade de uma maior diversificação da matriz elétrica, com melhor aproveitamento das outras fontes renováveis, trazendo maior segurança ao setor.

Associada a crise hídrica, o setor também foi impactado pela pandemia da Covid-19, que acabou por mudar os perfis de consumo, modificando as variáveis de planejamento energético. Inicialmente reduziu o consumo industrial e comercial com a redução e/ou paralização das atividades em vários seguimentos dos setores, e aumentou o consumo residencial. Posteriormente, com o retorno das atividades e a busca pela retomada do crescimento da economia, a necessidade de repor os

estoques consumidos e atender as novas demandas, apresentou taxas de crescimento no consumo de energia superiores as taxas verificadas antes da pandemia. Esse cenário traz como o principal desafio do setor elétrico encontrar o equilíbrio entre a oferta de geração, prejudicada pela escassez hídrica, e o consumo de energia elétrica determinado pela retomada econômica (CASTRO; BRANDÃO; CASTRO, Bianca, 2021). Dessa forma, é evidenciada ainda mais a necessidade de uma maior diversificação da matriz elétrica, que reduz a dependência majoritária da geração hidroelétrica com melhor aproveitamento da complementariedade entre outras fontes renováveis.

Figura 3: Dados Hidrológicos de volume útil - Reservatório Emborcação.

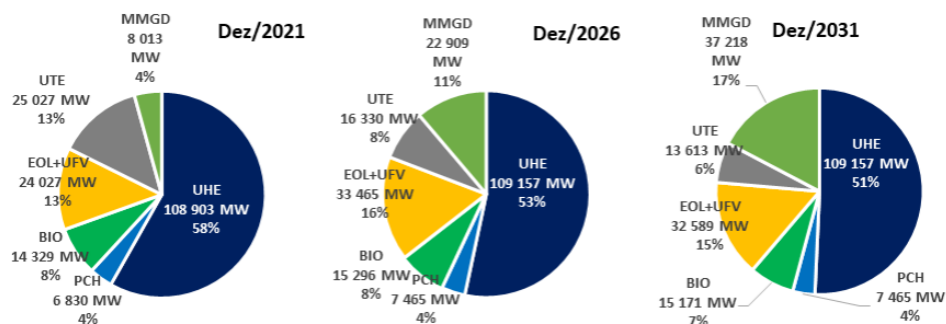


Fonte: Dados Hidrológicos/Volumes (ONS, 2021).

Em 2021, no contexto de crise hídrica, o setor de energia elétrica passa a incorporar novas perspectivas para os estudos de expansão centralizada, com destaque para uma maior diversificação da matriz através dos investimentos a outras energias renováveis além da hidroelétrica. Essa nova perspectiva busca cada vez mais estratégias para viabilizar a integração e o escoamento de geração das diversas

fontes energéticas, dentre elas a solar e eólica, as quais vem apresentando protagonismo cada vez maior no ambiente de contratação livre (EPE, 2021).

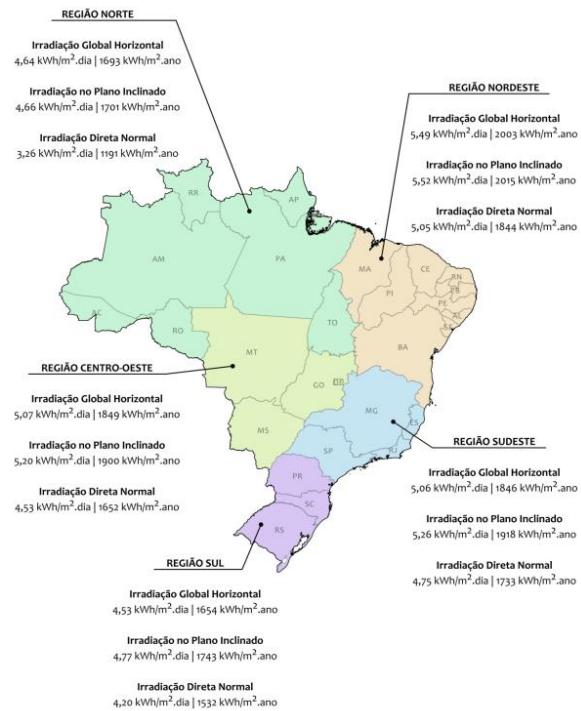
Figura 4: Evolução da Capacidade Instalada Existente e Contratada do SIN.



Fonte: PDE 2031. (EPE, 2021)

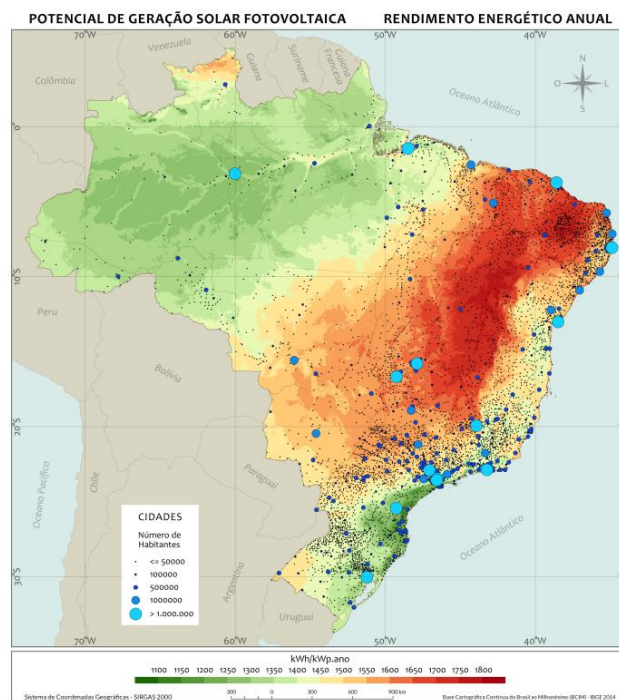
Atendendo as demandas ambientais e as necessidades de segurança energética, a geração Centralizada Solar Fotovoltaica tem se consolidado como uma das fontes renováveis de geração de energia elétrica mais promissoras para ampliação do suprimento elétrico brasileiro, por se tratar não apenas de uma fonte limpa e renovável, mas também cada vez mais competitiva. Apesar do crescimento considerável nos últimos anos, os números ainda são muito aquém quando levado em consideração o grande potencial da tecnologia, principalmente num país onde é possível identificar altos índices de irradiação solar, e as necessidades do Brasil. “Índices elevados de irradiação solar direta na superfície ocorrem em grande parte do Nordeste Brasileiro e são os principais requisitos para a viabilidade desta tecnologia de geração” (Pereira et al, 2017).

Figura 5: Síntese dos níveis de irradiação solar por região.



Fonte: Atlas Nacional de Energia Solar (Pereira et. Al.,2017).

Figura 6: Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil.

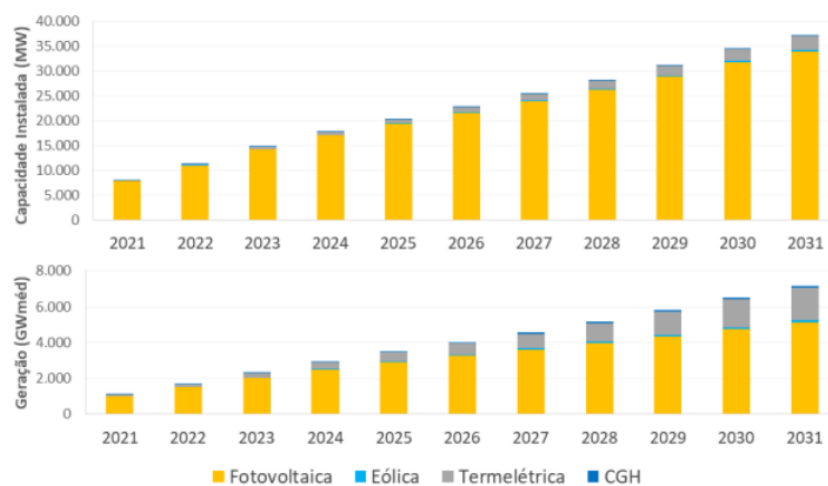


Fonte: Atlas Nacional de Energia Solar (Pereira et. Al.,2017).

A geração e comercialização da energia solar fotovoltaica se dá sob duas modalidades: geração distribuída e geração centralizada. A geração distribuída consiste em usinas de menor porte, com potência instalada de até 5MW (ANEEL, 2012). A queda nos preços dos equipamentos utilizados na geração fotovoltaica possibilitou a crescente adoção desta modalidade de geração, que apresentou um crescimento exponencial a partir de 2016. Essa queda, torna o valor da energia gerada nos telhados das unidades consumidoras cada vez mais competitivo com os preços das tarifas de energia elétrica convencionais fornecida pelas concessionárias.

Esse mercado vem crescendo de forma expressiva na última década, a geração fotovoltaica distribuída, por exemplo, em 2021 foi a segunda fonte com maior adição de capacidade instalada na matriz elétrica brasileira. Projeções feitas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para 2031, evidenciam que a geração fotovoltaica distribuída continuará ocupando lugar de destaque no seguimento de geração distribuída em relação as outras fontes (EPE, 2021).

Figura 7: Expansão em capacidade e em energia de MMGD.



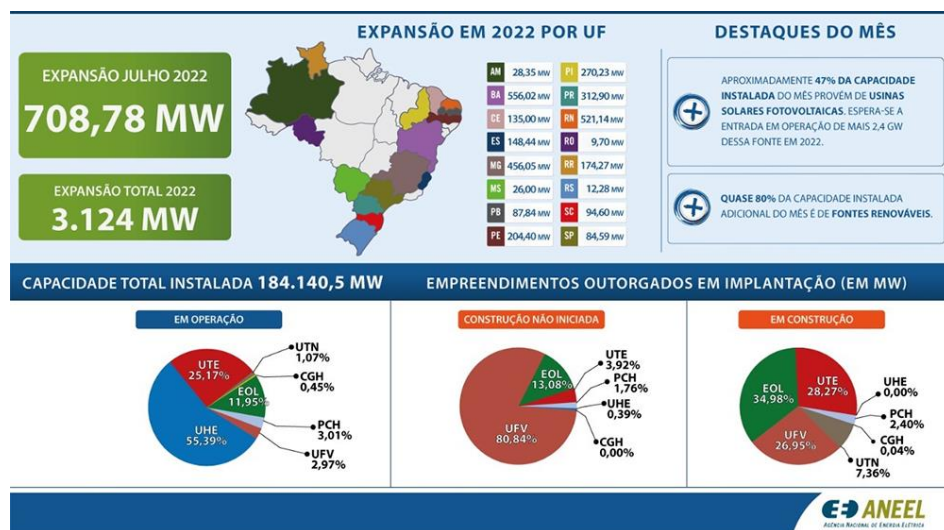
Fonte: PDE 2031 (EPE,2021).

A geração centralizada fotovoltaica se dá a partir de usinas de grande porte tipicamente instaladas em solo sob estruturas metálicas fixas ou com ou com seguimento da trajetória aparente do sol em um eixo, com potência instalada superior a 5MW. Uma discussão importante que está em pauta na Câmara dos Deputados,

pelo projeto de Lei nº414/2021, pode definir uma maior perspectiva de crescimento para a geração centralizada fotovoltaica, ainda não considerada nas projeções feitas pela EPE, essa discussão gira em torno da eliminação dos limites de carga e tensão do mercado livre de energia para todos os consumidores, promovendo uma liberação total do mercado incluindo baixa tensão. Onde, hoje, está limitada a vender para clientes com demanda acima de 500 kW(Crestane, 2022).

A Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), levando em consideração a perspectiva de abertura total do mercado, prevê no horizonte de 10 anos uma potência instalada de 30 GW, projeção três vezes maior que a do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, que em 10 anos prevê um crescimento de 134%, chegando a 10,38 GW. O que, portanto, evidencia a consolidação de uma tendência já mostrada: a priorização da livre contratação em detrimento dos leilões de mercado regulado (Crestane, 2022).

Figura 8: Expansão da Matriz Elétrica Brasileira, JULHO/2022.



Fonte: (ANEEL, 2022)

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Tendo em vista as limitações do sistema elétrico nacional, a viabilidade da integração de um empreendimento de geração à rede básica é conduzida pelas etapas compreendidas nos procedimentos de rede, definidos pelo ONS. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo de fluxo de potência no ponto de conexão a ser integrado por uma central geradora fotovoltaica, visando verificar o comportamento da rede elétrica em regime permanente. De forma geral, avaliando os níveis de tensão nos barramentos e demais componentes da rede de transmissão.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- A) Apresentar os passos necessários para o acesso de um empreendimento a rede básica;
- B) Apresentar as diretrizes e premissas para estudos de fluxo de potência;
- C) Modelar e simular no *Software* ANAREDE a conexão de um empreendimento à SE RECIFE II, levando em consideração dados de potência instalada a partir do dimensionamento para uma área pré-definida.
- D) Apresentar os resultados provenientes da simulação e fazer a análise dos impactos da integração do empreendimento ao referente ponto de conexão de acordo com a análise de fluxo de potência, com ênfase na variabilidade de tensão.

1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em quatro capítulos, sendo o primeiro de constituição introdutória, onde são abordadas as motivações e objetivos para o estudo.

O segundo capítulo constitui a fundamentação teórica para embasamento ao desenvolvimento do trabalho, onde são abordados aspectos gerais da geração fotovoltaica, procedimentos estabelecidos por norma para integração de uma central geradora a rede básica e uma breve contextualização sobre o estudo de fluxo de potência.

O terceiro capítulo descreve a metodologia e o desenvolvimento do estudo de fluxo de potência, bem como os resultados obtidos. Por fim é apresentada, no capítulo quatro, a conclusão do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ASPECTOS GERAIS DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida a partir do Efeito Fotovoltaico, o qual consiste em transformar, de forma direta, a luz em eletricidade, a partir de dispositivo fabricado com material semicondutor, as células e módulos fotovoltaicos, principais componentes responsáveis por esse processo de conversão (CEPEL; CRESESB, 2014).

2.1.1 Efeito Fotovoltaico

O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica se baseia na natureza dos materiais semicondutores, os quais possuem uma banda de valência totalmente preenchidas de elétrons e uma banda de condução vazia a temperatura de 0 kelvin (zero absoluto), se comportando como um isolante nessas condições.

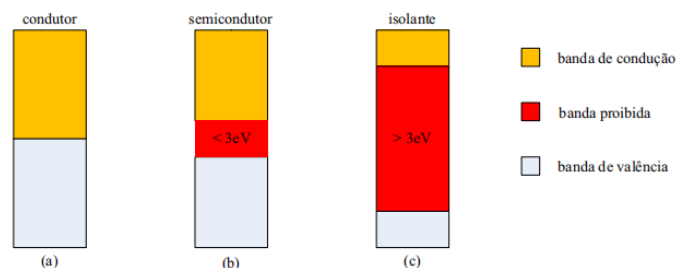
A Figura 9 diferencia de forma ilustrativa os materiais semicondutores dos materiais condutores e isolantes. Nos materiais semicondutores existe uma banda proibida (também chamada de *bandagap*) a qual pode atingir 3 eV (elétron-volt), essa diferença de potencial que surge nas extremidades do material é decorrente da absorção da luz solar. A absorção da energia proveniente do sol provoca uma excitação térmica nos elétrons da banda de valência para banda de condução, conferindo aos materiais semicondutores características condutoras com o aumento da temperatura. Sendo esta, a propriedade fundamental dos materiais semicondutores para fabricação das células e módulos fotovoltaicos, a de formar pares de lacunas-elétrons a partir da incidência de fótons (CEPEL; CRESESB, 2014).

Essas lacunas e elétrons foto gerados constituem o efeito fotocondutivo, no entanto, para o aproveitamento das correntes e tensões elétricas é necessária a construção de uma junção PN, feita através da dopagem controlada do material semicondutor, com dopantes que podem ser doadores (dopantes do tipo n) ou receptores (dopantes do tipo p) de elétrons. Essa dopagem gera o campo elétrico necessário para separação os portadores de carga a partir da alteração das

propriedades elétricas do material intrínseco, facilitando a movimentação dos elétrons a temperatura ambiente (CEPEL; CRESESB, 2014).

O efeito fotovoltaico, por sua vez, consiste no surgimento de uma diferença de potencial entre os dois materiais de propriedades elétricas diferentes devido à incidência de luz na região de junção entre os mesmos.

Figura 9: Estrutura de bandas de energia.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CEPEL; CRESESB, 2014).

2.1.2 Sistema de Geração Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos variam de acordo com sua complexidade e aplicação, eles podem ser classificados como *on-grid*, sistemas conectados à rede elétrica, sistemas *off-grid*, que consistem em sistema isolados da rede e que dispõem de dispositivos de armazenamento de energia, ou ainda os sistemas podem operar das duas formas.

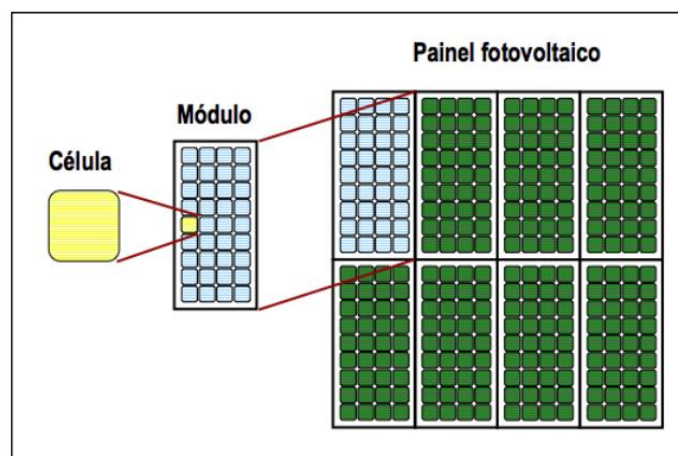
O presente trabalho abordará, de forma específica, os sistema *on-grid*, uma vez que será feito um estudo de conexão à rede.

2.1.2.1 Módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é constituído de células fotovoltaicas, que individualmente possuem tensão muito baixa, e, portanto, são geralmente conectadas em série para que sejam atingidos valores de tensões adequados para constituição dos módulos. As células fotovoltaicas diferem de acordo o material e o seu processo de fabricação.

A associação feita entre as células para constituição de um módulo pode ser série ou paralela, de acordo com a tensão e corrente que pretende ser utilizada, o que determina também o número de células a serem utilizadas. Após as conexões elétricas estabelecidas entre as células, elas são encapsuladas com material rígido responsável pela proteção mecânica compondo o módulo fotovoltaico (CEPEL-CRESESB, 2014).

Figura 10: Composição do Painel fotovoltaico.



Fonte: Módulos Fotovoltaicos: Características e Associações (CARNEIRO, 2010).

Figura 11: Composição de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.

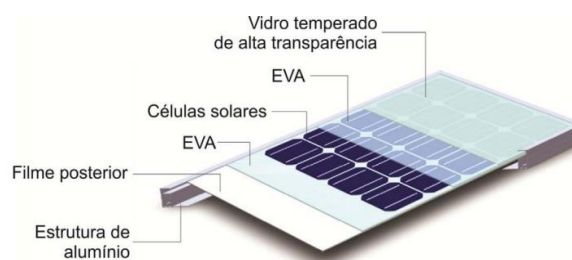


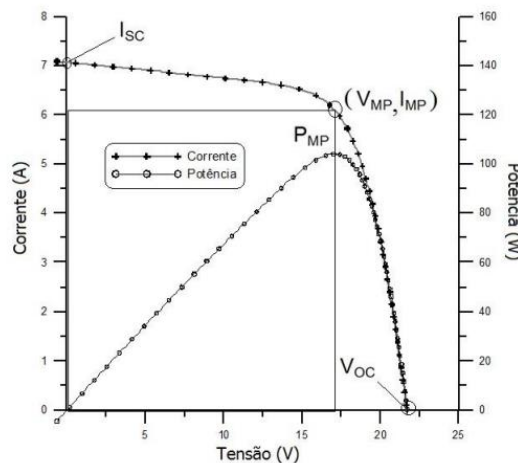
Figura 3.23 - Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.

Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CEPEL; CRESESB, 2014).

Os módulos fotovoltaicos possuem características elétricas intrínsecas ao seu processo de fabricação, geralmente caracterizado pela potência (Wp) que são definidas a partir de ensaios a condições de irradiância de 1.000 W/m² e temperatura de 25 °C. De forma mais completa, um módulo é caracterizado pelo traçado de sua curva I-V, ilustrada da Figura 12. Traçando concomitantemente a curva P-V, é possível

obter o ponto de máxima potência e dessa forma os parâmetros que caracterizam um módulo são obtidos a partir de uma determinada condição de radiação, temperatura e massa de ar. Os seguintes parâmetros podem ser identificados na Figura 12, que consistem no ponto de máxima potência (P_{MP}), tensão de máxima potência (V_{MP}), corrente de máxima potência (I_{MP}), tensão de circuito aberto (V_{OC}) e corrente de curto-circuito (I_{SC}). Quanto mais aproxima da forma retangular a curva I-V, melhor é a qualidade do módulo e sua eficiência é o parâmetro que define o quão efetivo é o processo de conversão da energia solar em energia elétrica, ou seja, representa a relação entre a potência elétrica produzida e a potência na energia solar incidente (CEPEL; CRESESB, 2014).

Figura 12: Curva Característica I-V e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de 100Wp.

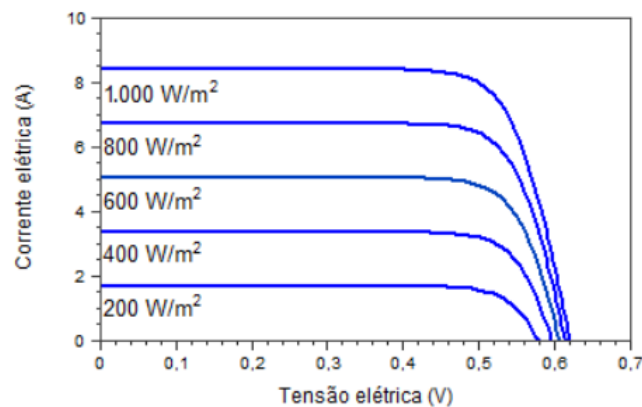


Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CEPEL-CRESESB, 2014).

Para se obter os painéis de potência mais elevada, os módulos fotovoltaicos são conectados em séries e/ou paralelo, de acordo com a finalidade de utilização, configuração da instalação e propriedade elétricas dos demais componentes do sistema, ou seja, de acordo com a tensão e corrente desejada.

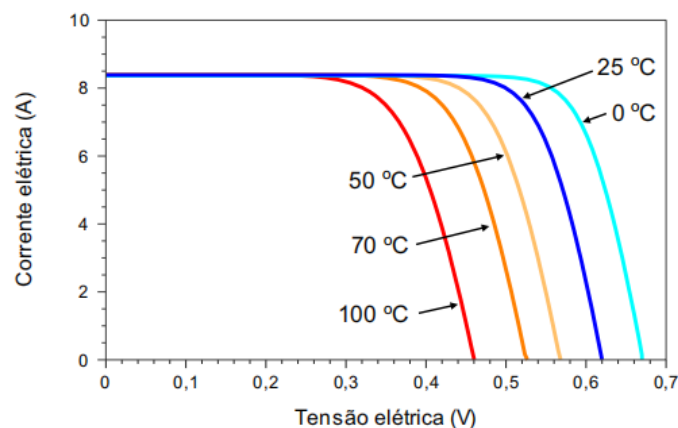
Os principais fatores externos que interferem no desempenho das células fotovoltaicas são a temperatura ambiente de operação e a intensidade de irradiância solar, medida em W/m^2 . Como é possível observar nas Figuras 13 e 14.

Figura 13: Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula de silício cristalino sob 25°C.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CEPEL; CRESESB, 2014).

Figura 14: Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1.000W/m², espectro AM1,5)



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CEPEL; CRESESB, 2014).

2.1.2.2 Inversores

A energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos não se dá em corrente alternada, como a energia gerada deve estar adequada as cargas a serem alimentadas e a rede a qual o sistema será conectado, são necessários dispositivos que fornecem energia elétrica em corrente alternada, a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua, estes dispositivos são os inversores de frequência. A utilização dos inversores pode ocorrer de duas formas: Em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs) e em sistemas fotovoltaicos independentes (SFIs), que

embora tenham o mesmo princípio de funcionamento, se diferenciam para atender critérios de segurança e qualidade (CEPEL; CRECESB,2014).

Os inversores para SFCRs são classificados em basicamente: **Inversores Centrais**, que são inversores de grande com potências numa faixa de kWp a MWp; **Inversores String**, que são os mais usados nas instalações residenciais e comerciais, variando de acordo com a potência e número de entradas com MPPTS diferentes; e os **microinversores**, os quais ficam conectados diretamente aos módulos e permitem uma menor quantidade de módulos associada a sua entrada. O uso dos microinversores é recomendado para instalações de menor porte, principalmente em telhados que possua várias inclinações e sombreamento, uma vez que cada entrada do microinversor possui um MPPT.

O MPPT (Maximum Power Point Tracking) é um sistema eletrônico integrado que consiste em rastrear o ponto de máxima potência de operação do arranjo fotovoltaico, fazendo com que a conversão cc-ca ocorra no seu ponto ótimo, melhorando de forma significativa a eficiência do sistema. Como a eficiência dos módulos varia, principalmente, de acordo com temperatura e a irradiância de operação, os módulos de uma *string* conectados a um único MPPT precisam estar submetidos as mesmas condições destas variáveis.

2.2 Geração Fotovoltaica Centralizada

A geração centralizada é compreendida como geração através de usinas de grande porte com grande capacidade instalada de geração de energia, que geralmente encontra-se geograficamente distante da carga. Ao longo dos anos a energia solar fotovoltaica centralizada passa a ser a mais competitiva nos leilões do mercado regulado, apresentando o menor preço em cinco dos seis leilões realizados a partir de 2019 (FOTOVOLT, 2022). Os leilões de energia, por sua vez, são processos licitatórios que tem como objetivo instituir e regulamentar a comercialização de energia elétrica, determinando os termos para atendimento de demanda em determinados períodos (CBIE,2020).

Segundo a associação europeia do setor solar, o Brasil é apontado como o quinto país do mundo com mais alta projeção de energia solar fotovoltaica em potência adicional na matriz elétrica, levando em consideração as modalidades de geração

distribuída e centralizada. Dados de até junho de 2022 mostram mais de 5 GW operacionais nas centrais geradoras fotovoltaicas (FOTOVOLT, 2022).

A alta projeção prospectada para os próximos anos da geração fotovoltaica no Brasil ainda está muito aquém da sua capacidade se levarmos em consideração os índices de irradiação apresentados em todo território brasileiro. É possível observar um atraso na expansão dessa fonte no setor elétrico brasileiro frente a outros países com incidências solares inferiores. Esse atraso decorre, principalmente, da ausência de políticas energéticas de incentivos a esta modalidade de geração na definição do planejamento energético e na regulação dos mercados de energia, e da ausência de investimentos, sobretudo no âmbito de desenvolvimento tecnológico e pesquisa na área. Apenas no ano de 2014 houve a primeira contratação de energia solar de geração pública centralizada.

Apesar das grandes vantagens da fonte solar fotovoltaica, a inserção desta fonte de geração requer novas práticas de planejamento e operação das redes elétricas por conta da sua característica intermitente, grande influência climática (variabilidade de produção), sistema anti-ilhamento nos equipamentos de geração, baixa capacidade de armazenamento comparada a outras fontes e uma tecnologia ainda com capacidade de rendimento relativamente baixo.

2.2.1 Procedimentos de Rede

O acesso das centrais geradoras ao sistema de transmissão inicialmente requer a obtenção de outorgas de concessão, que são atos destinados a conceder a agentes privados a responsabilidade por produzir, transmitir e distribuir energia elétrica para todo o país (ANEEL, 2016). Esse requerimento é regulamentado de acordo com o tipo de acessante, e após ANEEL emitir Resolução Autorizativa, o acessante estará apto a formalizar a solicitação de acesso às instalações de transmissão ao ONS (ONS, 2020).

Os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização para exploração, bem como à alteração da capacidade instalada de centrais geradoras Eólicas, Fotovoltaicas, Termelétricas e outras fontes alternativas e à comunicação de implantação de centrais geradoras com capacidade instalada

reduzida estão dispostos na RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 876, DE 10 DE MARÇO DE 2020.

“Os procedimentos de rede são as regras propostas pelo ONS para as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica integrantes do Sistema Interligado Nacional – SIN [...]” (ONS, 2021a) .

As instruções e os processos para viabilização do acesso às instalações de transmissão, compreendendo a conexão e seu uso, estão dispostos no módulo 3 dos procedimentos de rede.

2.2.1.1 Acesso ao Sistema de Transmissão

As principais etapas para conexão de uma usina na rede básica de acordo com os Procedimentos de Rede, consistem em:

i. Informações Básicas sobre o Empreendimento

Esta etapa consiste no acessante estabelecer as informações técnicas básicas do empreendimento, como o tipo de empreendimento quanto a fonte primária de energia, potência nominal prevista, localização, entre outras, e estabelecer também cronograma de entrada de operação do empreendimento para fornecer ao ONS no ato da consulta de acesso.

ii. Consulta de Acesso

Embora não obrigatória esta etapa é importante, pois é nela que o ONS fornece as informações básicas sobre o sistema elétrico de interesse e indica as diretrizes de planejamento para a realização dos estudos de integração do empreendimento ao sistema elétrico. A consulta de acesso é basicamente uma comunicação informal, mas que fica registrada no sistema da ONS, e visa esclarecer ao acessante os processos e requisitos para o acesso e conexão às instalações sob responsabilidade das transmissoras. A consulta de acesso é feita através do SGAccesso, plataforma da ONS onde são feitas também a demais solicitações.

iii. Seleção do Ponto de Conexão

A escolha do ponto onde a usina será conectada à rede básica envolve estudos de fatores econômicos, técnicos, ambientais, identificação de área restritas, entre

outros aspectos. Todos os estudos relativos a esta etapa são de responsabilidade do acessante, e eles devem levar em consideração o critério de mínimo custo global e estar em conformidade com Plano de Ampliações e Reforços (PAR) e/ou com o Plano Decenal de Expansão (PDE) de acordo com o cronograma estabelecido. O acessante deve selecionar o ponto que apresentara alternativa de conexão de menor custo de investimento nas instalações de conexão e na rede pública, considerando os custos de perdas elétricas. (ONS, 2020)

iv. Obter Ato Autorizativo para Acesso

A solicitação do ato autorizativo deverá ser encaminhada para o órgão responsável de acordo com o tipo de acessante. Após a ANEEL emitir a correspondente Resolução Autorizativa, o acessante está apto para formalizar ao ONS a sua solicitação de acesso às instalações de transmissão.

Figura 14: Legislação e Ato autorizativo de acordo relacionados ao tipo de acessante

TIPO	LEGISLAÇÃO	INSTITUIÇÃO	ATO AUTORIZATIVO
Consumidor livre ou autoprodutor com carga maior que a sua geração	Decreto Presidencial 5.597/2005 Resolução Normativa ANEEL nº 722/2016	MME*(1ª fase) e ANEEL**(2ª fase)	Portaria do MME e Resolução Autorizativa da ANEEL
Central geradora termelétrica ou autoprodutor com geração maior que a sua carga	Resolução Normativa ANEEL nº 876/2020	ANEEL	Resolução Autorizativa da ANEEL
Central geradora solar fotovoltaica			
Central geradora eólica			
Usina Hidrelétrica	Lei nº 9.427/1996 , dentre outras	ANEEL	Contrato de Concessão
Pequena Central Hidrelétrica (PCH)	Resolução Normativa ANEEL nº 876/2020	ANEEL	Resolução Autorizativa da ANEEL
Aproveitamento hidrelétrico de 1 a 50 MW, sem característica de PCH	Resolução Normativa ANEEL nº 412/2010	ANEEL	Resolução Autorizativa da ANEEL

* Antes da formalização da solicitação de acesso no ONS.

**Após a emissão do Parecer de Acesso pelo ONS.

Fonte: Acesso ao sistema de transmissão em 10 passos (ONS, 2020).

O documento que precede o ato autorizativo é o Despacho de Registro do Requerimento de Outorga (DRO), esse documento, embora não obrigatório, permite que o acessante dê continuidade aos estudos referentes a implementação do empreendimento e facilita a obtenção das licenças e documentos necessários para solicitação de Outorga de Autorização.

v. Solicitação de Acesso

Após a ANEEL emitir a correspondente Resolução Autorizativa, o acessante está apto para formalizar ao ONS a sua solicitação de acesso às instalações de transmissão. No entanto, esta etapa ocorre em subetapas que consiste em:

- A. Ato autorizativo
- B. Descrição da Solicitação
- C. Estudos de integração
- D. Dados e informações

vi. Realizar os Estudos de Integração

Os estudos requeridos nesta etapa irão variar de acordo com o tipo de acessante e de empreendimento, os quais são de responsabilidade do acessante. Para a realização desses estudos deverão ser utilizados os casos de referência do ONS mais atualizados de acordo com a data de entrada em operação do empreendimento.

Tabela 1: Tabela de Estudos de Integração do Empreendimento às Instalações de Transmissão.

EMPREENDIMENTO	ESTUDOS NECESSÁRIOS
Distribuidora de energia elétrica	O novo ponto de suprimento deve estar recomendado em estudo de planejamento da expansão do sistema elétrico, devidamente respaldado por análises sistêmicas, técnicas e econômicas realizadas ou avalizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE)
	Se necessário, o ONS poderá solicitar ao acessante a elaboração dos seguintes estudos em caráter complementar: fluxo de potência; curto-circuito e estabilidade dinâmica, no caso em que há gerador(es) ou motor(es) que possa(m) impactar o desempenho do sistema de transmissão
Consumidor livre ou autoprodutor de energia elétrica	Análise de fluxo de potência
	Análise de curto-circuito
	Análise da estabilidade eletromecânica, no caso em que há geração própria ou motor(es) com potência instalada acima de 5 MW
Central geradora hidrelétrica ou termelétrica	Estudo de qualidade de energia elétrica (QEE), no caso em que há cargas com características não lineares nas instalações do acessante
	Análise de fluxo de potência
	Análise de curto-circuito
Central geradora eólica	Análise da estabilidade eletromecânica
	Análise de fluxo de potência
	Análise de curto-circuito
	Análise da estabilidade eletromecânica
Central geradora solar fotovoltaica	Estudo de qualidade de energia elétrica (QEE)
	Análise de fluxo de potência
	Análise de curto-circuito
	Análise da estabilidade eletromecânica (rejeição a usina)
	Estudo de qualidade de energia elétrica (QEE)

Fonte: Acesso ao sistema de transmissão em 10 passos (ONS, 2020).

vii. Submeter a Solicitação no Sistema Computacional SGAccesso

Além de todas as autorizações e documentos requeridos, na solicitação devem estar descritas as seguintes informações:

- Nome do empreendimento, sua localização (município, estado);
- Ponto de conexão no sistema de transmissão objeto da solicitação;
- Data de primeira sincronização (no caso de central geradora) e de entrada em operação comercial;
- Nome por extenso do solicitante, com informações para contato;
- Motivação.

Após submissão da solicitação de acesso ao ONS, não existindo nenhuma pendência impeditiva por parte do acessante, é emitido o parecer de acesso dentro dos prazos estabelecidos na tabela a seguir.

Tabela 2: Prazos para emissão do parecer de acesso.

ACESSO	PRAZO	
	Admissibilidade	Emissão do Parecer de Acesso
Permanente	Em até 30 (trinta) dias contados da data do protocolo de entrada da solicitação de acesso permanente para uso da rede	Acesso sem necessidade de ampliações, reforços ou melhorias nas instalações de transmissão: em até 30 (trinta) dias
		Acesso com necessidade de reforços e/ou melhorias nas instalações de transmissão: em até 120 (cento e vinte) dias
		Acesso com necessidade de ampliações nas instalações de transmissão: em até 1 (um) ano
Flexível	Instantânea	Em até 30 (trinta) dias, contados a partir da data do protocolo de entrega da solicitação de acesso no ONS
Temporário		
Reserva de Capacidade		
Importação e/ou exportação de energia		

Fonte: Acesso ao sistema de transmissão em 10 passos (ONS, 2020).

2.2.1.2 Requisitos Técnicos Mínimos para Conexão às Instalações de Transmissão de uma Central Geradora Fotovoltaica

O tópico 5 do submódulo 2.10 dos procedimentos de rede trata sobre os requisitos técnicos para conexão de centrais geradoras fotovoltaicas, onde são estabelecidos condições e faixas de operação para central geradora. De acordo com

o submódulo supracitado, a central geradora eólica ou fotovoltaica não deve produzir variação de tensão superior a 5% no ponto de conexão das instalações sob responsabilidade de transmissora no caso de manobra parcial ou total, tempestiva ou não, do parque gerador. A Tabela 1 apresenta os limites de tensão de operação normal e em emergência para o estudo de fluxo de potência.

Tabela 3: Limites de tensão para cada tensão nominal de operação

Tensão nominal de operação ⁽¹⁾	Condição operativa normal		Condição operativa sob contingências	
	(kV)	(pu) ⁽²⁾	(kV)	(pu) ⁽²⁾
< 230	–	0,95 a 1,05	–	0,90 a 1,05
230	218 a 242	0,95 a 1,05	207 a 242	0,90 a 1,05
345	328 a 362	0,95 a 1,05	311 a 362	0,90 a 1,05
440	418 a 460	0,95 a 1,046	396 a 460	0,90 a 1,046
500	500 a 550	1,00 a 1,10	475 a 550	0,95 a 1,10
525	500 a 550	0,95 a 1,048	475 a 550	0,90 a 1,048
765	690 a 800	0,90 a 1,046	690 a 800	0,90 a 1,046

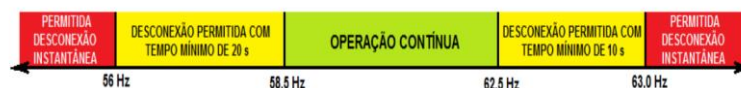
(1) Valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é designado.

(2) Valores em pu tendo como base a tensão nominal de operação.

Fonte: Submódulo 2.10 – Procedimentos de Rede (ONS, 2021b)

A Figura 15 resume as condições e faixas de operação em regime de frequência não nominal.

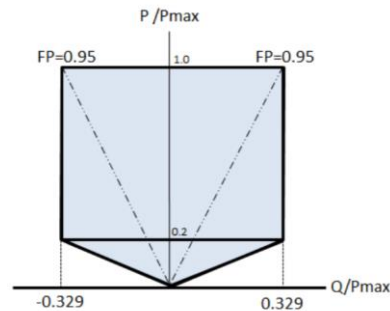
Figura 15: Faixas de operação da central geradora em regime de frequência não nominal.



Fonte: Submódulo 2.10 – Procedimentos de Rede (ONS, 2021b)

As faixas de fator de potência de operação em regime permanente dos geradores, estão ilustradas na Figura 16. Quando os geradores não estejam produzindo potência ativa, a central de fotovoltaica deve operar de modo que se disponibilize ao SIN a capacidade de geração/absorção de potência reativa, a fim de haver injeção/absorção nula no ponto de conexão. Ou seja, a central deve ser capaz de operar no modo de controle de tensão, controle de potência reativa e controle de fator de potência.

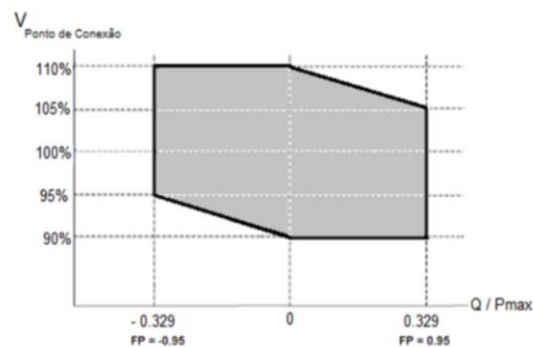
Figura 16: Faixa de geração/absorção de potência reativa no ponto de conexão da central geradora.



Fonte: Submódulo 2.10 – Procedimentos de Rede (ONS, 2021b)

A injeção de potência reativa em regime permanente, no ponto de conexão, deve ser garantida numa determinada faixa de operação de tensões como estão definidas na Figura 17.

Figura 17: Requisito para atendimento ao fator de potência na faixa operativa de tensão no ponto de conexão.



Fonte: Submódulo 2.10 – Procedimentos de Rede (ONS,2021b)

2.2.2 Estudo Elétrico

Como demonstrado na Tabela 1 o processo de integração de uma central geradora solar fotovoltaica a rede básica exige estudos de pré-conexão. Neste trabalho será abordada uma análise de fluxo de potência, estudo de grande importância para o planejamento do sistema elétrico de potência e que serve de base para outros estudos como análise de sensibilidade e estudo de Qualidade de Energia Elétrica.

2.2.2.1 Fluxo de Potência

Questões importantes relacionados aos sistemas elétricos como despacho econômico de energia, planejamento e expansão do sistema, problemas de controle e operação tem como base o estudo de fluxo de potência, justificando sua grande importância prática para tornar a operação do setor elétrico mais otimizada, segura e econômica.

2.2.2.1.1 Definição

O fluxo de potência (ou fluxo de carga) consiste no cálculo do estado de operação da rede elétrica, para determinadas condições de carga, geração, topologia e restrições operacionais. O estudo de fluxo de carga feito a partir de equações e inequações, obtidas a partir da Primeira Lei de Kirchhoff, é considerado um modelo estático do sistema, ou seja, as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possa ignorar os transitórios. (MONTICELLI, 1983) A identificação dos impactos técnicos da integração de geração fotovoltaica pode ser feita por meio da análise de fluxo de potência, que consistem em resolver o circuito elétrico da rede.

Na formulação básica para os problemas de fluxo de potência, cada barra da rede é parametrizada a partir de quatro variáveis, onde duas delas entram como dados do problema e duas serão incógnitas, de acordo com quais dados de entrada estão associadas as barras, as barras podem ser classificadas em três tipos:

- BARRA PQ, onde são fornecidos dados de geração líquida de potência ativa e injeção líquida de potência reativa, e calculados dados de magnitude e ângulo de tensão na barra; representando as barras de cargas;
- BARRA PV, onde são dados fornecidos dados de geração líquida potência ativa e magnitude de tensão, e são calculados valores de injeção líquida de potência reativa e ângulo de tensão na barra, representando as barras de geração;
- BARRA DE REFERÊNCIA OU *SWING*, onde a magnitude e ângulo de tensão são dados do problema, e a geração líquida de potências ativa e

injeção líquida de potência reativa são calculadas, estabelecendo a função de referência angular para o sistema e fechar o balanço de potência, uma vez que nas equações de fluxo de potência é imposta a conservação da potência ativa e reativa nos nós do sistema. (MONTIELLI, 1983)

Cada barra do sistema terá duas equações baseadas na conservação da potência, ou seja, as potências ativas e reativa injetadas em uma barra devem ser iguais a soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra. As equações descritas abaixo representam as equações correspondentes a uma barra genérica k ligada a uma barra genérica m , em um sistema com n barras.

$$P_K = V_K \left\{ \sum_{m=1}^n V_m [G_{km} \times \cos(\theta_{km}) + B_{km} \times \text{sen}(\theta_{km})] \right\} \quad (1)$$

$$Q_K = V_K \left\{ \sum_{m=1}^n V_m [G_{km} \times \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \times \cos(\theta_{km})] \right\} \quad (2)$$

Em que:

$k = 1 \dots n$, onde n é o número de barras do sistema;

V_k : módulo da tensão na barra k ;

V_m : módulo da tensão na barra m ;

G_{km} : condutância da linha que liga a barra k a barra m ;

B_{km} : susceptância da linha que liga a barra k a barra m ;

θ_{km} : diferença angular entre as fases das tensões nas barras k e m ;

O conjunto de inequações necessário para o estudo de fluxos de carga é obtido a partir das restrições de operação, como por exemplo as restrições nas magnitudes das tensões nas barras e limites nas injeções de potência reativas nas barras PV.

2.2.2.1.2 Métodos de Solução de Fluxo de Potência

O cálculo do fluxo de potência é feito a partir da modelagem de todos os componentes do sistema em equações e inequações. Os geradores e cargas são considerados como parte externa do sistema e são modelados a partir de injeções de potência. A parte interna do sistema é composta pelos demais componentes (PEQUENO, 2010).

Em geral, se faz o uso de métodos computacionais desenvolvidos especificamente para solução das equações e inequações algébricas que consistem no modelo estático da rede, para o cálculo do fluxo de potência (MONTICELLI, 1983). No cenário Brasileiro, a ferramenta computacional mais utilizada para análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente, é o programa ANAREDE, desenvolvido pelo Centro de pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL).

A solução de problemas de fluxo de potência requer a utilização de ferramentas iterativas. Os métodos utilizados pelo ANAREDE para o cálculo de fluxo de potência estão listados abaixo, no entanto, o método utilizado para análise deste trabalho foi o método de Newton-Raphson, o qual é abordado de forma mais detalhada.

Método Desacoplado Rápido: O método desacoplado rápido, como o próprio nome já sugere, baseia-se no desacoplamento $P\theta - QV$, com isso, a resolução é feita adotando um esquema de resolução que resolve de forma alternada o subproblema $P\theta$, utilizando valores atualizados de V e o subproblemas QV , utilizando os valores atualizados de θ .

Fluxo de Potência Linearizado: Este método analisa apenas a potência ativa e é baseado no acoplamento $P\theta$.

Método de Newton-Raphson: O método de Newton-Raphson é um método geralmente utilizado para sistema grandes, e tem como vantagem ser um método robusto que converge quase sempre e com poucas iterações, a depender da dimensão do sistema. Esse método é baseado na linearização de uma função a partir de uma condição inicial, utilizando a expansão em série de Taylor em torno da condição inicial X_0 . É utilizada a matriz Y_{BARRA} e a partir desta, montada a matriz jacobiana. A aplicação desse método consiste em:

A partir do equacionamento básico demonstrado pelas equações (1) e (2), calcula-se o gradiente de potência:

$$\Delta P_k = P_k^{especificado} - P_k^{calculado} \quad (3)$$

$$Q_k = Q_k^{especificado} - Q_k^{calculado} \quad (4)$$

A partir da matriz Jacobiana, definida por:

$$J = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{d\theta} & \frac{dP}{dV} \\ \frac{dQ}{d\theta} & \frac{dQ}{dV} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (5)$$

É feita a resolução do sistema matricial que corresponde a linearização:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(i)} = -J^{(i)} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)} \quad (6)$$

Onde:

$$\begin{aligned} H_{(n-1)(n-1)} &= \frac{dP}{d\theta} & N_{(n-1)(l)} &= \frac{dP}{dV} \\ M_{(l)(n-1)} &= \frac{dQ}{d\theta} & L_{(l)(l)} &= \frac{dQ}{dV} \end{aligned}$$

E n representa o número total de barras e l o número de barras PQ.

Posteriormente as variáveis são atualizadas para a próxima iteração até que o sistema convirja, sendo a Jacobiana atualizada a cada iteração.

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i)} + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)} \quad (7)$$

Algoritmo da Solução:

1) Montar a matriz Y_{BARRA}

2) Estabelecer as condições iniciais das variáveis de estado: $\theta^{(0)}$ $V^{(0)}$ e $i = 0$.

3) Calcular ΔP_k e ΔQ_k a partir das equações (3) e (4) e verificar a convergência.
Se $\max \Delta P_k \leq \varepsilon_p$ e $\max \Delta Q_k \leq \varepsilon_q$ parar.

4) Fazer $i = i + 1$. Montar a jacobiana de $J^{(i)}$.

5) Solucionar o sistema linearizado descrito na equação (6).

6) Atualizar a solução do problema a partir da equação (7)

7) Voltar ao passo 3.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Mediante a contextualização teórica abordada nos capítulos anteriores, o presente trabalho propõe um estudo de Fluxo de Potência para conexão de um empreendimento fictício a SE Recife II no barramento de 500 kV utilizando a *software* ANAREDE. Por se tratar de um estudo fictício, alguns dados estarão limitados a considerações previamente estabelecidas.

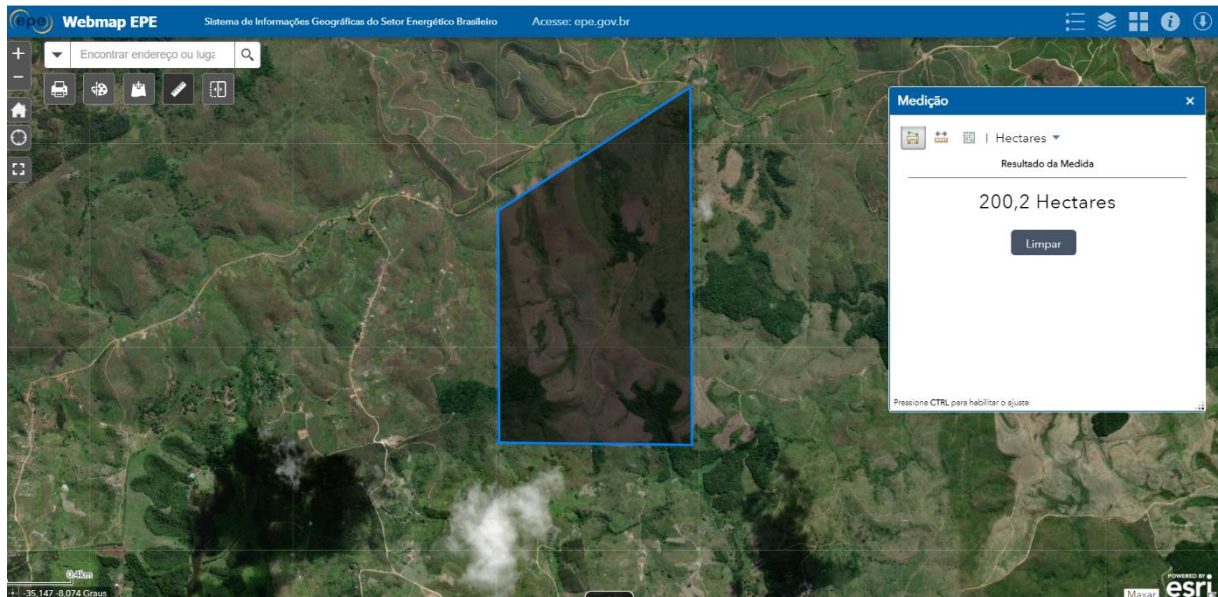
De acordo com o submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede, os estudos de fluxo de potência são efetuados para verificar o comportamento da rede elétrica em regime permanente. De forma geral, avalia-se se os níveis de tensão nos barramentos e os carregamentos nas linhas, transformadores e demais componentes da rede de transmissão.

3.1 Introdução

A fim de viabilizar o estudo, algumas informações requeridas para ele foram pré-definidas, levando em consideração que todas as etapas iniciais de acesso ao sistema de transmissão não foram executadas. Inicialmente fora definida uma área para instalação da central geradora, localizada no município de Moreno-PE (8° 4'45.02"S, 35° 9'10.33"O) demonstrada na Figura 18.

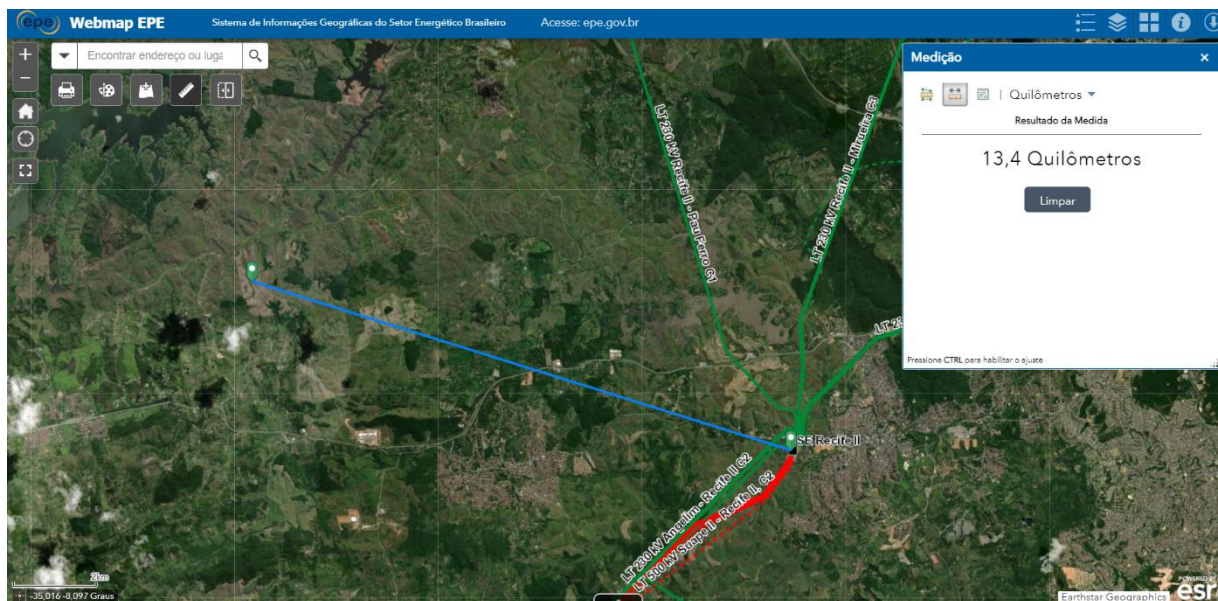
A escolha da localização e área para instalação do empreendimento é feita a partir de estudos que avaliam a aptidão daquela área para o devido fim, estes estudos levam em consideração fatores climáticos, de geolocalização dentro do SIN, proximidades a centros urbanos e via de acesso, ou seja, são levados em consideração fatores ambientais, econômicos e técnicos. Neste trabalho a área escolhida é considerada apta para instalação e a localização leva em consideração apenas distância entre a central e o ponto de conexão. Partindo do princípio de que o custo e as perdas de uma linha de transmissão são proporcionais a sua extensão, foi escolhida uma área próxima a localização da SE RECIFE II, que é definida como ponto de conexão. Dessa forma, considera-se a disponibilidade física para conexão de novo empreendimento a esta SE.

Figura 18: Área selecionada para instalação da central geradora.



Fonte: Webmap (EPE, 2022)

Figura 19: Distância entre o ponto de conexão e a área selecionada para instalação da central geradora.



Fonte: Webmap (EPE, 2022)

A partir da área definida para instalação do empreendimento foi feita a estimativa da potência instalada. Como o estudo de fluxo de potência prevê a análise dos cenários mais críticos, será utilizada na simulação a máxima potência instalada com 100% de penetração na rede básica.

Tabela 4: Dados sobre área e dimensionamento de potência máxima instalada.

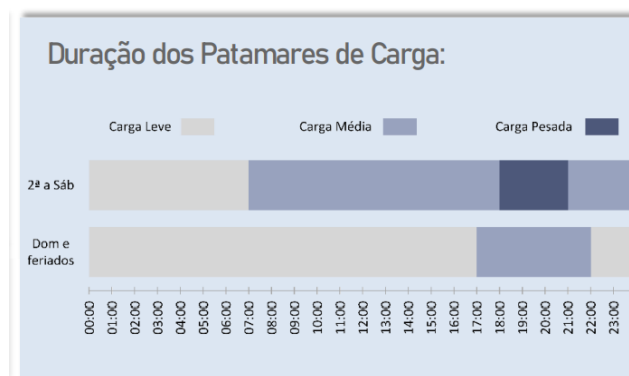
Área definida	200,2 HECTARES = 2.002.000 m ²
Área ocupada pelos módulos (Considerando espaçamento)	3,5 m ²
Quantidade de módulos	572.000 módulos
Quantidade de módulos	572.000 módulos
Potência do módulo	500 W

Fonte: Autora.

3.2 Base de dados

A base de dados do sistema elétrico utilizada para o estudo foi a disponibilizada pela EPE em sua plataforma digital na internet. A base de dados de fluxo de potência é disponibilizada em arquivos.SAV a serem executados no programa ANAREDE, estão disponíveis os dados para os três patamares de carga e dois graus (úmido e seco) de hidraulicidade para a região Norte no horizonte decenal. Os patamares de carga são uma aproximação da curva de carga e estão demonstrados na Figura 20 com seus respectivos horários. Os cenários hidrológicos levam em consideração a predominância da elevada potência instalada em usinas hidroelétricas na região Norte, tornando os fluxos na rede dependentes da sua sazonalidade.

Figura 20: Duração dos patamares da carga utilizados para simulação.



Fonte: Informe técnico para Base de dados (EPE, 2021).

A geração solar fotovoltaica ocorre de maneira mais significativa durante o patamar de carga média, uma vez que a incidência solar é maior neste período. Essa particularidade faz com que essa geração possa ser considerada nula nos outros patamares de carga. Podendo ser considerada não nula no patamar de carga leve, pelo início da manhã e em domingos e feriados. Para os devidos fins deste trabalho, serão simuladas a penetração máxima da central geradora para os patamares de carga leve e média, nos dois cenários hidrológicos a fim de obter os resultados para as condições mais críticas.

A base de dados utilizada segue a seguinte ordem:

- a) Cenário 1: Carga leve e Norte Seco;
- b) Cenário 2: Carga leve e Norte Úmido;
- c) Cenário 3: Carga média e Norte Seco;
- d) Cenário 4: Carga média e Norte Úmido;

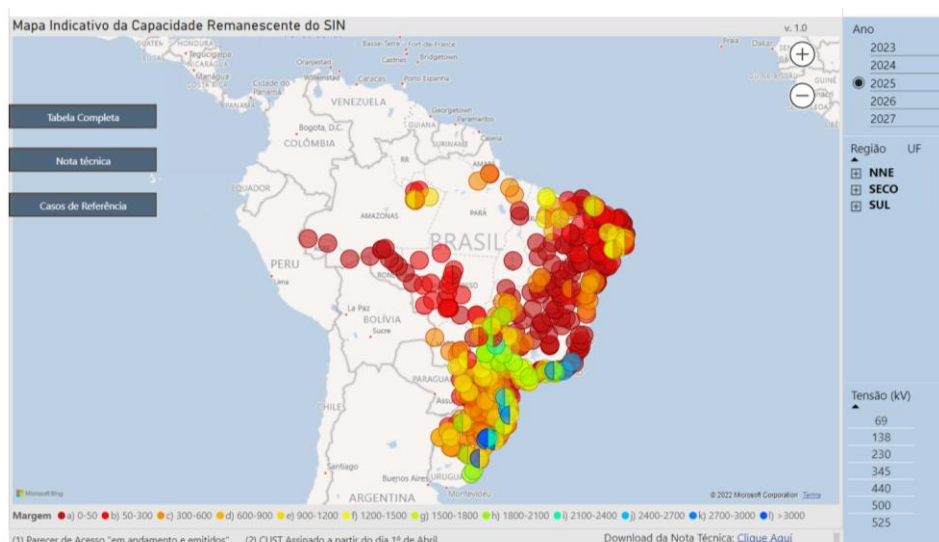
Nos quatro cenários foi feita simulação para horizonte de 2025, ano considerado para o empreendimento entrar em operação, e elaborado o diagrama de parte do sistema. A representação por diagrama do ponto de conexão, da primeira vizinhança do mesmo e da primeira vizinhança das barras que estão diretamente conectadas a SE RECIFE II 500kV, traz uma facilidade para análise visual da área de interesse no estudo. Foram simulados o fluxo de potência para o sistema sem a inserção da central geradora fotovoltaica e com a inserção da central geradora.

3.3 Conexão do Empreendimento

Os inversores geralmente utilizados nas centrais geradoras fotovoltaicas fornecem uma tensão numa faixa de 600 a 800 V em corrente alternada. A fim de diminuir as perdas decorrentes do transporte da potência elétrica, estes inversores são agrupados e conectados a eletrocentros, onde, através de alguns equipamentos, os níveis de tensão são elevados a níveis de média tensão, geralmente 34,5 kV, e são transportadas pelos condutores da rede média tensão (RMT) até a subestação coletora.

A conexão com a rede básica pode ocorrer de duas formas: por seccionamento de linha existente ou conexão direta. A segunda opção deve levar em consideração aspectos como distância entre ponto de conexão e usina, bem como disponibilidade física da subestação, ou seja, é necessário verificar a disponibilidade de expansão e a capacidade remanescente de escoamento da energia na SE selecionada. O conceito de capacidade remanescente ou “margem” é a folga, existente ou futura, no sistema de transmissão para acomodar uma quantidade adicional de geração que poderá ser injetada no ponto de conexão” (ONS, 2022). A Figura a seguir mostra o mapa interativo disponibilizado pelo ONS com os quantitativos de margens para os leilões de energia.

Figura 21: Mapa indicativo da capacidade remanescente do SIN.



Fonte: (ONS, 2022).

Estes são dados fornecidos a partir de notas técnicas de leilão apresentada pela EPE para barramentos candidatos de empreendimentos reais. Referente a disponibilidade de expansão os barramentos são classificados de acordo com a disponibilidade ou não de conexão de novas linhas, sejam eles por motivos técnicos e/ou físicos. Para os devidos fins acadêmicos deste trabalho, foi considerado que o ponto de conexão escolhido atendia todas estas especificações técnicas e físicas para conexão do empreendimento.

A Figura 22 mostra a conexão da central geradora fotovoltaica ao barramento de 500kV da SE RECIFE II. Os parâmetros inseridos nos equipamentos podem ser observados da Figura 23 a Figura 27.

Figura 22: Conexão do empreendimento a SE RECIFE II – 500 kV.



Fonte: Autora.

Figura 23: Parametrização do gerador.

Dados de Limites de Geração de Potência Ativa (DGER)

Barra: Número: 99995 Nome: UFV - 250MW

Geração Ativa

Atual: 250.0 MW

Mínima: 0.0 MW

Máxima: 99999 MW

Fator de Participação

Potência Ativa: 0.0 %

Potência Reativa: 100.0 %

Fator de Serviço da Corrente

Armadura: 0.0 %

Rotor: 0.0 %

Reatância: 0.0 %

Estatismo: 0.0 %

Fator de Potência: 0.0

Potência Aparente: 0.0 MVA

Ângulo de Carga: 0.0 Graus

Botões: Inserir, Alterar, Limpar, Fechar

Fonte: ANAREDE.

Figura 24: Parametrização da barra de geração.

Dados de Barra CA (DBAR)

Número: 99995 Nome: UFV - 250MW

Tensão: 250.0 p.u. Ângulo: 0.0 graus

Grupo de Tensão: 0

Grupo Base de Tensão: 0

Barra Controlada: 0

Modo de Visualização: 0 - Normal

Geração Relativa

Mínima: 0.0 Mvar

Máxima: 0.0 Mvar

Shunt

Equivalente: 0.0 Mvar

Individuado (DBSH): 0.0 Mvar

Aggregadores

1 - Estado	2 - Estado Para	3 - Região	4 - Tipo de Geração	5 - Classificação L
16 - Pernambuco	16 - Pernambuco	2 - Nordeste	8 - Usina Fotovolt...	1 - Rede Básica

Primeira Vizinhança: Número: 0 Nome: 0

Botões: Inserir, Alterar, Remover, Limpar, Fechar

Fonte: ANAREDE.

Figura 25: Parametrização do transformador da rede média tensão.

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito

Barra De: 99995 Nome: UFV - 286MW ☒ Ligado

Barra Para: 99996 Nome: RMT - 34.5 ☒ Ligado

Número: 1 ☒ Circuitos existentes

Barra Proprietária

☒ De

☐ Para

Barra Controlada

☐ Direção De

☐ Direção Para

☒ Ligado

Capacidade

Normal: 9999 MVA

Emergência: 9999 MVA

Equipamento: 9999 MVA

Resistência: %

Reatância: 3.5849 %

Susceptância: Mvar

Tap

Especificado: 1.

Mínimo:

Máximo:

Defasamento: graus

Steps:

Manobrável:

☐ Controle Congelado

Agregadores

1 - Estado	2 - Estado_Para	3 - Região	4 - Tipo de Ge...	5 - Classificaç...
16 - Pernambu...	16 - Pernambu...	2 - Nordeste	8 - Usina Foto...	1 - Rede Básica

Tensão Barra

p.u.

Tensão Especificada:

Shunt Equivalente

Injeção De: Mvar

Injeção Para: Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)

Injeção De: Mvar

Injeção Para: Mvar

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

Fonte: ANAREDE.

Figura 26: Parametrização da rede média tensão.

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito

Barra De: 99996 Nome: RMT - 34.5 ☒ Ligado

Barra Para: 99997 Nome: COLETORA ☒ Ligado

Número: 1 ☒ Circuitos existentes

Barra Proprietária

☒ De

☐ Para

Barra Controlada

☐ Direção De

☐ Direção Para

☒ Ligado

Capacidade

Normal: 9999 MVA

Emergência: 9999 MVA

Equipamento: 9999 MVA

Resistência: .3665 %

Reatância: 1.9327 %

Susceptância: .0045 Mvar

Tap

Especificado:

Mínimo:

Máximo:

Defasamento: graus

Steps:

Manobrável:

☐ Controle Congelado

Agregadores

1 - Estado	2 - Estado_Para	3 - Região	4 - Tipo de Ge...	5 - Classificaç...
16 - Pernambu...	16 - Pernambu...	2 - Nordeste	8 - Usina Foto...	1 - Rede Básica

Tensão Barra

p.u.

Tensão Especificada:

Shunt Equivalente

Injeção De: Mvar

Injeção Para: Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)

Injeção De: 0 Mvar

Injeção Para: 0 Mvar

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

Fonte: ANAREDE.

Figura 27: Parametrização do transformador alta tensão.

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito

Barra De: 99998 Nome: UFV ☒ Ligado

Barra Para: 99997 Nome: COLETORA ☒ Ligado

Número: 1 ☒ Circuitos existentes

Barra Proprietária

☒ De

☐ Para

Barra Controlada

☐ Direção De

☐ Direção Para

☒ Ligado

Capacidade

Normal: 360 MVA

Emergência: 360 MVA

Equipamento: 360 MVA

Resistência: 0 %

Reatância: 3.888 %

Susceptância: 0 Mvar

Tap

Especificado: 1

Mínimo:

Máximo:

Defasamento: 0 graus

Steps:

Manobrável:

☐ Controle Congelado

Agregadores

1 - Estado	2 - Estado_Para	3 - Região	4 - Tipo de Ge...	5 - Classificaç...
16 - Pernambu...	16 - Pernambu...	2 - Nordeste	8 - Usina Foto...	1 - Rede Básica

Tensão Barra

p.u.

Tensão Especificada

Shunt Equivalente

Injeção De: 0 Mvar

Injeção Para: 0 Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)

Injeção De: 0 Mvar

Injeção Para: 0 Mvar

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

Fonte: ANAREDE.

Para os cenários descritos no tópico 3.2, foram simulados o fluxo de potência, utilizando o método de Newton, para o SIN sem o empreendimento e com o empreendimento. A partir da convergência dos casos foi utilizada a ferramenta do ANAREDE de Dados de Monitoração Seleccionada para fazer monitoração de tensão na área de interesse representada no diagrama. A ferramenta de monitoração permite que sejam especificadas, individualmente e por área e/ou tensão (kV), barras, gerações e circuitos a serem considerados durante o processo de comparação dos valores calculados com seus limites (CEPEL, 2021). A monitoração foi feita nas barras seleccionadas na área de interesse. As barras seleccionadas e seus respectivos limites de tensão estão demonstrados na Tabela a seguir.

Tabela 5: Barras Selecionadas para monitoração e seus respectivos limites de tensão.

Barra Monitorada		Operação normal		Operação em emergência	
Número da Barra	Nome da Barra	Valor Mínimo de Tensão (pu)	Valor Máximo de Tensão (pu)	Valor Mínimo de Tensão (pu)	Valor Mínimo de Tensão (pu)
11201	SANTA2-AL230	0.950	1.050	0.900	1.050
11244	CGRD2A-PB230	0.950	1.050	0.900	1.050
12104	PERNA3-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
12202	JABOAT-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
141	SUAPE--PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
17001	ANGELI-PE013	0.950	1.050	0.900	1.050
17006	S.JOSEUTE013	0.950	1.050	0.900	1.050
17016	ITAENGUTE013	0.950	1.050	0.900	1.050
21051	RNEST--PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
21110	FIAT---PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
240	ANGELI-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
241	RECIFE-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
245	SRITA2-PB230	0.950	1.050	0.900	1.050
247	GOIANI-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
249	PIRAPA-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
250	MIRUEI-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
252	RIBEIR-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
253	SUAPE3-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
254	JOAIRA-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
255	TACAIM-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
256	LCARRO-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
260	PAU-FE-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
261	MIRUE2-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
342	MESSIA-AL230	0.950	1.050	0.900	1.050
349	GARANH-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
353	SUAPE2-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
422	ALDEIA-PE230	0.950	1.050	0.900	1.050
500	PAF4---BA500	1.000	1.100	1.000	1.100
504	XINGO--SE500	1.000	1.100	1.000	1.100
541	RECIFE-PE500	1.000	1.100	1.000	1.100
542	MESSIA-AL500	1.000	1.100	1.000	1.100
543	SUAPE2-PE500	1.000	1.100	1.000	1.100
544	CGRD3--PB500	1.000	1.100	1.000	1.100
549	GARANH-PE500	1.000	1.100	1.000	1.100
566	PAU-FE-PE500	1.000	1.100	1.000	1.100
640	ANGELI-PE069	0.950	1.050	0.900	1.050
641	ANGELI-AL069	0.950	1.050	0.900	1.050
660	PAU-FE-PE069	0.950	1.050	0.900	1.050
741	RCDCS--PE000	0.800	1.200	0.800	1.200
841	RCD-1-SIN013	0.950	1.050	0.900	1.050
941	RCD-2-SIN013	0.950	1.050	0.900	1.050

Fonte: Autora.

É possível observar a partir dos resultados que ocorre violação dos limites de tensão no Cenário 1: Carga Leve e Norte Seco, sem o empreendimento. Ao conectar a UFV há uma melhora nos parâmetros de tensão, mas ainda é verificada violação de tensão de acordo com os limites estabelecidos na Tabela 3. Não há violação de tensão para os outros cenários nas barras monitoradas.

Figura 28: Relatório de Monitoração de tensão – Violação de tensão no cenário Carga Leve e Norte Seco sem empreendimento.

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V11.06.02

EPE DECENAL 2031 LEVE ** ANO 2025 ** NORTE SECO - SEM UFV

MONITORACAO DE TENSÃO SELECIONADA

NUM.	BARRA NOME	ARE	MIN	MOD.	MAX	TENSÃO VIOLACAO (PU)	SHUNTBAR (Mvar)	SHUNTLIN (Mvar)	SEVERIDADE
504	XINGO--SE500	5	1.000	1.172	1.100	0.072			*****
500	PAF4---BA500	5	1.000	1.167	1.100	0.067			*****
540	ANGEL2-PE500	2	1.000	1.152	1.100	0.052	-300.00	-450.00	*****
549	GARANH-PE500	2	1.000	1.152	1.100	0.052	-450.00	-400.00	*****
543	SUAPE2-PE500	2	1.000	1.150	1.100	0.050		-100.00	*****
542	MESSIA-AL500	2	1.000	1.148	1.100	0.048		-150.00	*****
541	RECIFE-PE500	2	1.000	1.146	1.100	0.046		-100.00	*****
566	PAU-FE-PE500	2	1.000	1.142	1.100	0.042	-250.00	-180.00	*****
544	CGRD3--PB500	2	1.000	1.137	1.100	0.037	-300.00	-300.00	****
----- IND SEVER.			251.8	-----					

Fonte: Autora.

Figura 29: Relatório de Monitoração de tensão – Violação de tensão no cenário Carga Leve e Norte Seco com empreendimento.

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V11.06.02

EPE DECENAL 2031 LEVE ** ANO 2025 ** NORTE SECO - COM UFV

MONITORACAO DE TENSÃO SELECIONADA

NUM.	BARRA NOME	ARE	MIN	MOD.	MAX	TENSÃO VIOLACAO (PU)	SHUNTBAR (Mvar)	SHUNTLIN (Mvar)	SEVERIDADE
504	XINGO--SE500	5	1.000	1.166	1.100	0.066			*****
500	PAF4---BA500	5	1.000	1.161	1.100	0.061			*****
540	ANGEL2-PE500	2	1.000	1.148	1.100	0.048	-300.00	-450.00	*****
549	GARANH-PE500	2	1.000	1.148	1.100	0.048	-450.00	-400.00	*****
543	SUAPE2-PE500	2	1.000	1.145	1.100	0.045		-100.00	*****
542	MESSIA-AL500	2	1.000	1.143	1.100	0.043		-150.00	*****
541	RECIFE-PE500	2	1.000	1.141	1.100	0.041		-100.00	*****
566	PAU-FE-PE500	2	1.000	1.139	1.100	0.039	-250.00	-180.00	****
544	CGRD3--PB500	2	1.000	1.136	1.100	0.036	-300.00	-300.00	****
----- IND SEVER.			207.9	-----					

Fonte: Autora.

No relatório das grandezas monitoradas é apresentado um índice de severidade que corresponde ao desvio quadrático médio em relação aos limites estabelecidos para a grandeza que está sendo monitorada. (ANAREDE, 2021)

$$IS = \sum_{1}^n (VIOL)^2 \times 10^4 \quad (31)$$

Onde:

n = Número de violações

$VIOL = (V - V_{\min})$ ou $(V - V_{\max})$

Na análise de fluxo de potência, foram identificadas violações apenas no Cenário de Carga Leve e Norte Seco, onde é possível observar que o índice de severidade das violações das tensões é maior no sistema sem empreendimento, com 251,8 de índice, do que no sistema com o empreendimento conectado, apresentando 207,9 de índice.

3.4 Análise de Contingências

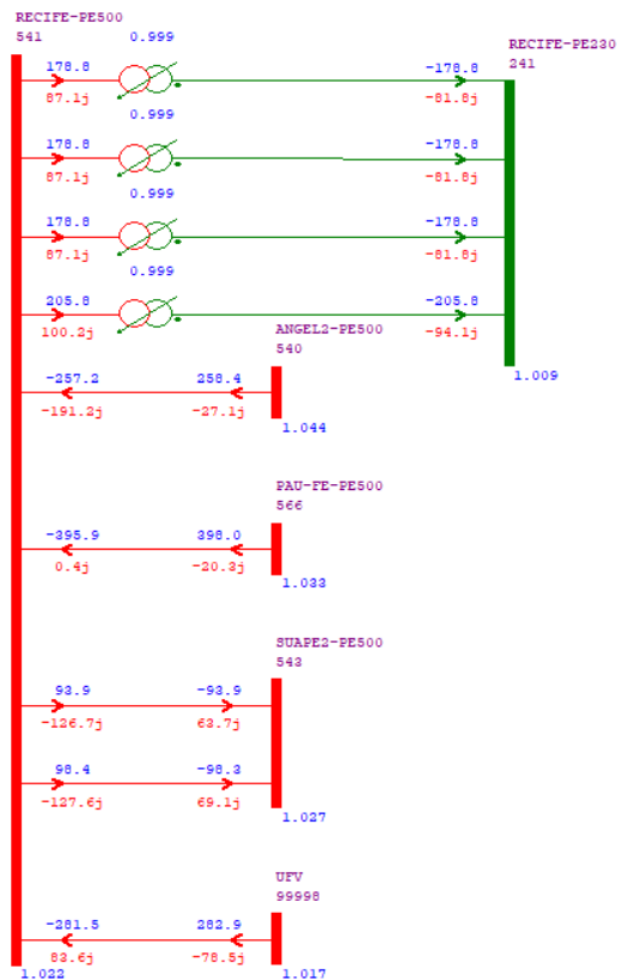
A análise de segurança em sistemas de potência é o processo de identificar violações nos limites de operação, onde a informação obtida pode ser usada para a operação segura e planejamento. Uma falha em qualquer equipamento do sistema durante a operação influencia na segurança do sistema, essa falha constitui o conceito de contingências.

A ferramenta de Análise de Contingências do ANAREDE consiste em fazer a monitoração do estado operativo da rede elétrica a partir da solução de fluxo de potência para cada contingência de forma sequencial. A simulação das contingências pode ser feita de forma programada, onde uma sequência de contingências é pré-estabelecida pelo operador e é possível executar contingências múltiplas, e de forma automática, onde são executadas contingências simples baseadas do critério n-1. Este trabalho estará limitado a análises de contingências simples utilizando o critério

n-1, onde será desligado um elemento por vez, executado manualmente o fluxo de potência e feita a monitoração das tensões.

Para fins acadêmicos de exemplificação foi estabelecida uma lista de contingências a serem executadas levando em consideração a primeira vizinhança do ponto de conexão e alguns fatores limitantes, que são disponibilizados no Mapa Indicativo da Capacidade Remanescente do SIN. Vale salientar que para a conexão de um empreendimento real, esta etapa requer um estudo mais detalhado com a execução de uma quantidade de contingências que preveja todas as possíveis intercorrências a fim de trazer uma maior segurança no planejamentos das operações do sistema.

Figura 30: Primeira vizinhança do ponto de conexão SE RECIFE II – 500kV.



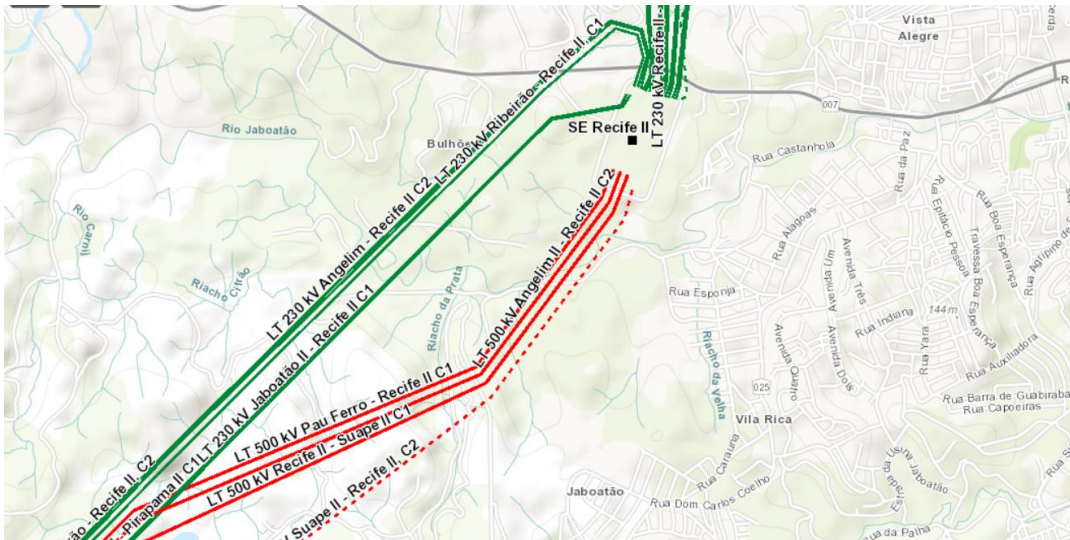
Fonte: Base de dados para Fluxo de Potência (EPE, 2022).

Tabela 6: Lista de Contingências

Contingências (n-1)	
1	LT 500kV Pau ferro – Recife II C1
2	LT 500kV Recife II - Suape II C1
3	TF 4 Recife II 500kV - Recife II 500kV
4	LT 500kV Angelim II – Recife II C2

Fonte: Autora

Figura 31: Representação no WEBMAP das LTs a serem desligadas na simulação das contingências.



Fonte: WEBMAP (EPE,2022).

Nas tabelas a seguir estão listados os índices de severidade das contingências para cada cenário simulado. É possível verificar que no Cenário 1 o índice de severidade é diminuído com as contingências 1, 2 e 4, e mantido praticamente igual para a contingência 3. Mas não é possível verificar grandes variações no índice de severidade. Vale salientar que, como descrito anteriormente, esta é uma análise mais crítica para os cenários de carga leve, uma vez que foi simulada a potência máxima de geração da central geradora fotovoltaica, o que é verificado apenas em domingos e feriados. Nos cenários 2 e 4 ocorreria violação nos limites de tensão apenas para a contingência 4, no cenário 3 não foram encontradas violações de tensão entre as barras monitoradas.

3.4.1 Cenário 1

Tabela 7: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 1.

Cenário: Carga Leve e Norte Seco	
Contingências	Índice de Severidade
Sem contingências	207.9
1	185.8
2	172.6
3	207.0
4	80.3

Fonte: Autora.

3.4.2 Cenário 2

Tabela 8: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 2.

Cenário: Carga Leve e Norte Úmido	
Contingências	Índice de Severidade
Sem contingências	0
1	0
2	0
3	0
4	12.9

Fonte: Autora.

3.4.3 Cenário 3

Tabela 9: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 3.

Cenário: Carga Média e Norte seco	
Contingências	Índice de Severidade
Sem contingências	0
1	0
2	0
3	0
4	0

Fonte: Autora.

3.4.4 Cenário 4

Tabela 10: Índice de severidade das violações de tensão no cenário 4.

Cenário: Carga Leve e Norte Úmido	
Contingências	Índice de Severidade
Sem contingências	0
1	0
2	0
3	0
4	9.5

Fonte: Autora.

Além do relatório de monitoração selecionada, a identificação das violações dos limites estabelecidos para os equipamentos do sistema pode ser feita de forma visual a partir da interface gráfica do *software* ANAREDE, que possui três filtros de análise

gráfica que facilita a identificação das violações. Em relação a tensão na barra, quando seu valor fica abaixo de seu limite mínimo estipulado no grupo limite de tensão, a barra ficará hachurada por linhas azuis, indicando subtensão, já quando ocorre a violação do limite máximo, a barra ficará hachurada por linhas vermelhas, indicando sobretensão. De forma análoga segue para gerador, nos casos de violação de potência reativa, e circuitos nas violações dos limites de carregamento de linha e de equipamentos.

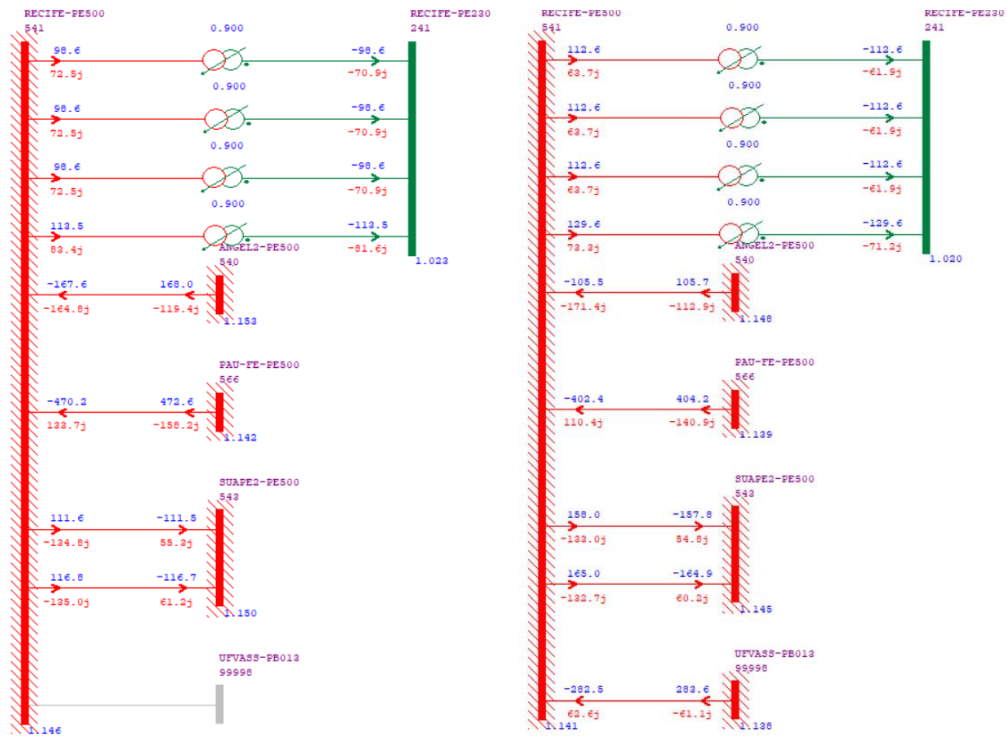
Ao executar o fluxo de potência para todos os casos e contingências listadas, não foram identificadas através da interface gráfica violações nos geradores, transformadores e circuitos da área de interesse representada no digrama, portanto os relatórios de monitoração de fluxos e geração não foram gerados. Os diagramas seguem como anexo ao final do trabalho.

3.5 Perda Tempestiva da Potência Total do Empreendimento

Como mencionado no tópico 2.2.1.2, a central geradora fotovoltaica não deve produzir variação de tensão superior a 5% no ponto de conexão no caso de manobra parcial ou total, tempestiva ou não, do parque gerador.

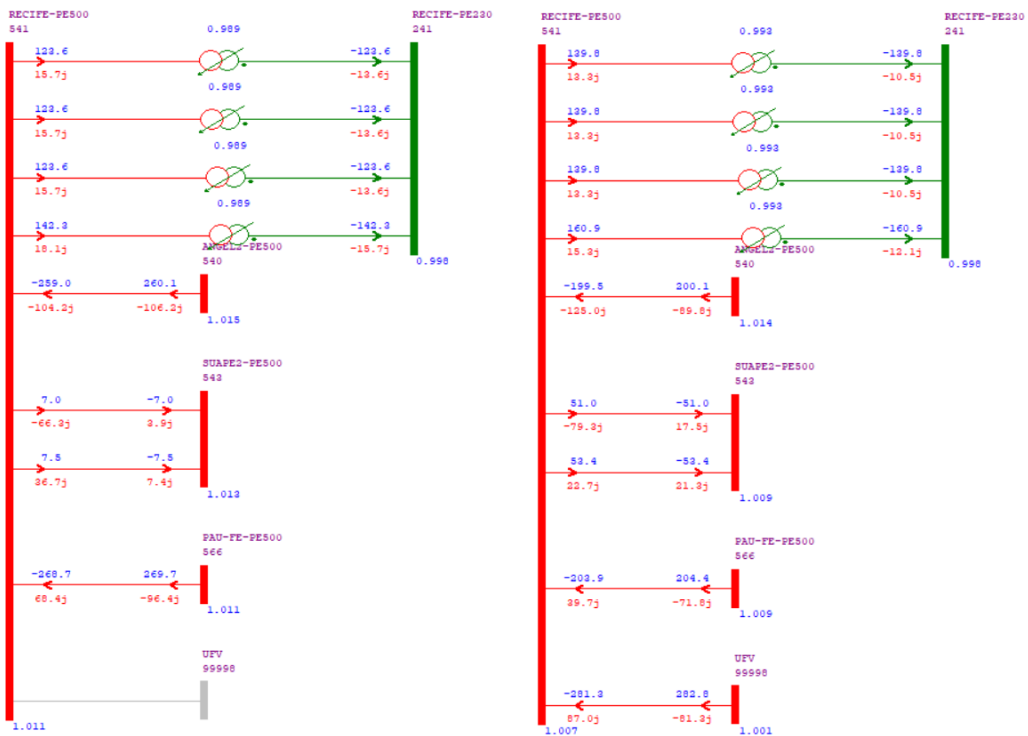
Dessa forma foi feita a simulação da perda tempestiva total do empreendimento e avaliada a variação de tensão em regime permanente na SE RECIFE II para os barramentos de 500kV e 230kV.

Figura 32: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 1.



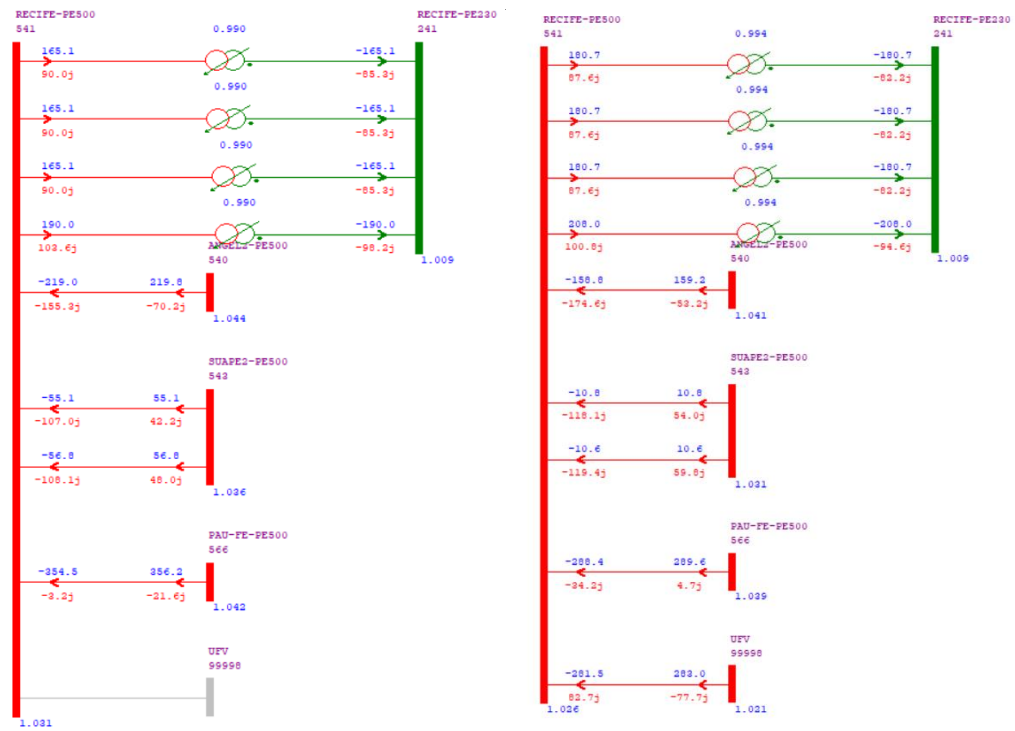
Fonte: Autora.

Figura 33: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 2.



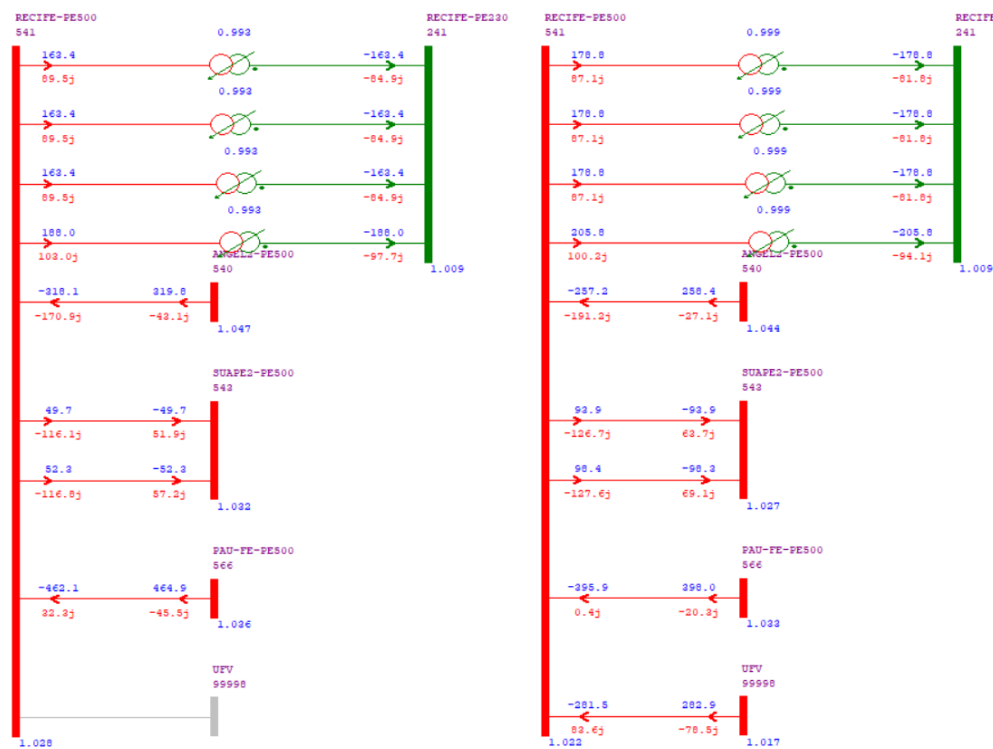
Fonte: Autora.

Figura 34: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 3.



Fonte: Autora.

Figura 35: Perda tempestiva da UFV para o Cenário 4.



Fonte: Autora.

Tabela 11: Variação de Tensão da SE RECIFE II para perda tempestiva da UFV.

Cenário	Barramento	Tensão Sem perda (pu)	Tensão Com perda (pu)	Variação de tensão
1	500kV	1,141	1,146	0,44%
2		1,007	1,011	0,40%
3		1,026	1,031	0,49%
4		1,022	1,028	0,59%
1	230kV	1,020	1,023	0,29%
2		0,998	0,998	0,00%
3		1,009	1,009	0,00%
4		1,009	1,009	0,00%

Fonte: Autora.

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 10, não houve variação de tensão em regime permanente acima de 0,68%, satisfazendo o requisito técnico definido no tópico 5.3.1 do módulo 2.10 dos Procedimentos de Rede relativos a variação de tensão mínima aceitável.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Dentro de uma contextualização econômica fragilizada pela pandemia da COVID-19, que também impactou e modificou os perfis de consumo de energia elétrica no mundo inteiro, a crise hídrica enfrentada no Brasil em 2021 traz, de forma significativa, a temática da importância de uma maior diversificação da matriz elétrica brasileira, que apesar de majoritariamente renovável, é composta em mais de 60% pela fonte hídrica. Aliada a esta necessidade de diversificação, uma maior preocupação com as condições ambientais coloca as novas fontes renováveis como principais aliadas no abastecimento de energia elétrica nacional.

A energia solar fotovoltaica, por sua vez, se mostra cada vez mais competitiva e viável num país onde são verificados os maiores índices de radiação solar e a expectativa é de grande crescimento. No entanto, essas mudanças trazem consigo grandes desafios para o setor de planejamento de energia, por se tratar de uma fonte não despachável e com grandes variações de geração de acordo com as condições climáticas. Com isso a etapa que consiste em avaliar a viabilidade da inserção de centrais geradoras fotovoltaicas ao sistema interligado nacional torna-se uma das etapas técnicas mais importantes dentre as etapas de acesso ao sistema de transmissão.

Diante destas motivações, este trabalho teve, portanto, o intuito de exemplificar uma parte de grande relevância da etapa dos estudos de pré-conexão que é a análise de fluxo de potência, bem como de explorar algumas ferramentas disponíveis do *software* ANAREDE, o qual é utilizado na prática para empreendimentos reais. Os resultados do estudo mostram que conexão da central geradora não acarreta a violação dos limites de tensão, e para o cenário onde já havia violação na tensão de algumas barras, o índice de severidade diminuiu com a conexão do empreendimento. Para a perda tempestiva da potência total do empreendimento, não foram verificadas nenhuma violação do requisito técnico mínimo que define não pode haver variação de tensão superior a 5% no ponto de conexão.

Vale salientar que estes resultados não caracterizam a viabilidade da integração da UFV a rede básica, este é apenas parte de uma série de estudos necessários no processo de solicitação de acesso. Ficando assim, portanto, como sugestões para trabalhos futuros maior detalhamento na análise de contingências e a realização dos

demais estudos obrigatórios ao processo de acesso ao sistema de transmissão mencionados no tópico 2.2.1.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **GERAÇÃO**: Expansão da potência instalada no Brasil em julho. [S. l.], 1 ago. 2022. Disponível em: ><https://www.gov.br/aneel/ptbr/assuntos/noticias/2022/expansao-da-potencia-instalada-no-brasil-em-julho-e-de-708-78-mw>< Acesso em: 10 ago. 2022.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482/2012**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2012.

ANEEL. **Outorgas do Serviço Público de Energia Elétrica**. [S. l.], 4 mar. 2016. Disponível em: ><https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/outorgas>< Acesso em: 28 ago. 2022.

CARNEIRO, Joaquim A. O. **Módulos Fotovoltaicos: Características e associações**. Repositorium, Universidade do Minho, p. 3-18, 8 out. 2010. Disponível em: ><https://hdl.handle.net/1822/16961>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA - CBIE. **COMO FUNCIONAM OS LEILÕES DE ENERGIA?**. [S. l.], 21 ago. 2020. Disponível em: ><https://cbie.com.br/artigos/como-funcionam-os-leiloes-de-energia/>< Acesso em: 23 ago. 2022.

CEPEL. **Manual do usuário do ANAREDE**. Versão 11.06.02.

CEPEL; CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014. 529 p. Disponível em: >http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual_de_engenharia_fv_2014.pdf< Acesso em: 4 out. 2022.

CRESTANE, Mauro Sérgio. Carta ao Leitor: **Planejamento de expansão, evolução da Legislação e crescimento real**. REVISTA FOTOVOLT: Intersolar Summit Brasil Nordeste, [s. l.], ano 7, n. 46, p. 6, 1 abr. 2022.

DE CASTRO, Nivalde; BRANDÃO, Roberto; DE CASTRO, Bianca. **O Avanço da Crise Hídrica no Brasil**. Grupo de estudo do setor elétrico - GESEL, [s. l.], 20 ago. 2021. Disponível em: ><https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/29Castro299.pdf>< Acesso em: 9 maio 2022.

EPE. **Balço Energético Nacional. Relatório Síntese 2022**, [s. l.], 2021. Disponível em: ><https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2021>< . Acesso em: 11 jul. 2022.

EPE. Base de Dados. *In*: **Base de Dados**: Arquivos de trabalho para estudos elétricos de fluxo de potência, em regime permanente, referentes ao Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2031. 24 ago. 2022. Disponível em:

><https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes-de-transmissao/bases-de-dados>< . Acesso em: 30 ago. 2022.

EPE. **Plano decenal de Expansão de Energia 2031(PDE)**, [s. l.], 6 abr. 2021. Disponível em: ><https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>< . Acesso em: 10 ago. 2022.

EPE. Dados para Simulações Elétricas do SIN. 2021a. Disponível em: ><https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-datransmissao/base-de-dados-de-simulacao>< . Acesso em: 11 de agosto de 2022.

EPE. **Sistemas de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro**. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/> . Acesso em: agosto de 2022.

FOTOVOLT. **Conferência: As oportunidades e desafios do setor na INTERSOLAR SOUTH AMERICA**. REVISTA FOTOVOLT, [S. l.], p. 46-51, 1 jul. 2022.

GOLDEMBERG, José. **Dossiê Recursos Naturais**. Estudos Avançados, [s. l.], v. 12, ed. 33, 1 ago. 1998. Disponível em: ><https://www.revistas.usp.br/eav/issue/view/713>< . Acesso em: 11 jul. 2022.

GOOGLE. **Google Earth Pro. 2021**. Disponível em: ><https://www.google.com.br/earth/>< . Acesso em: 11 de agosto de 2021.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA., 1983.

ONS. Base de Dados. *In*: **Mapas: MAPA INDICATIVO DA CAPACIDADE REMANESCENTE DO SIN**. [S. l.], 23 maio 2022. Disponível em: ><http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>< . Acesso em: 10 set. 2022.

ONS. Guia do Acessante ao Sistema de Transmissão. **Acesso ao Sistema de Transmissão em 10 passos**, Rio de Janeiro, p. 3-23, 29 dez. 2020. Disponível em: ><http://www.ons.org.br/sites/multimedia/Documentos%20Compartilhados/acessoconexao/arquivos/AcessoaoSistemadeTransmissaoem10passos.pdf>< Acesso em: 20 jul. 2022.

ONS. **Procedimentos de Rede: Módulo 2: Submódulo 2.10: Requisitos técnicos mínimos para conexão às instalações de transmissão**. Rio de Janeiro: ONS, 2021.

ONS. **Procedimentos de Rede: Módulo 2: Submódulo 2.10: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**. Rio de Janeiro, 2021b.

ONS. **Procedimentos de Rede: Módulo 2: Submódulo 2.3: Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos**. Rio de Janeiro, 2021d.

ONS. **Procedimentos de Rede: Módulo 23: Submódulo 23.3 Diretrizes e critérios para estudos elétricos**. Rio de Janeiro, 2021d.

ONS. **Procedimentos de Rede: Módulo 7: Submódulo 7.1: Acesso às instalações de transmissão**. Rio de Janeiro, 2021a.

ONS. **HISTÓRICO DA OPERAÇÃO: DADOS HIDROLÓGICOS / VOLUMES**. [S. l.], 2021. Disponível em: >http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_volumes.aspx< . Acesso em: 9 julho 2022.

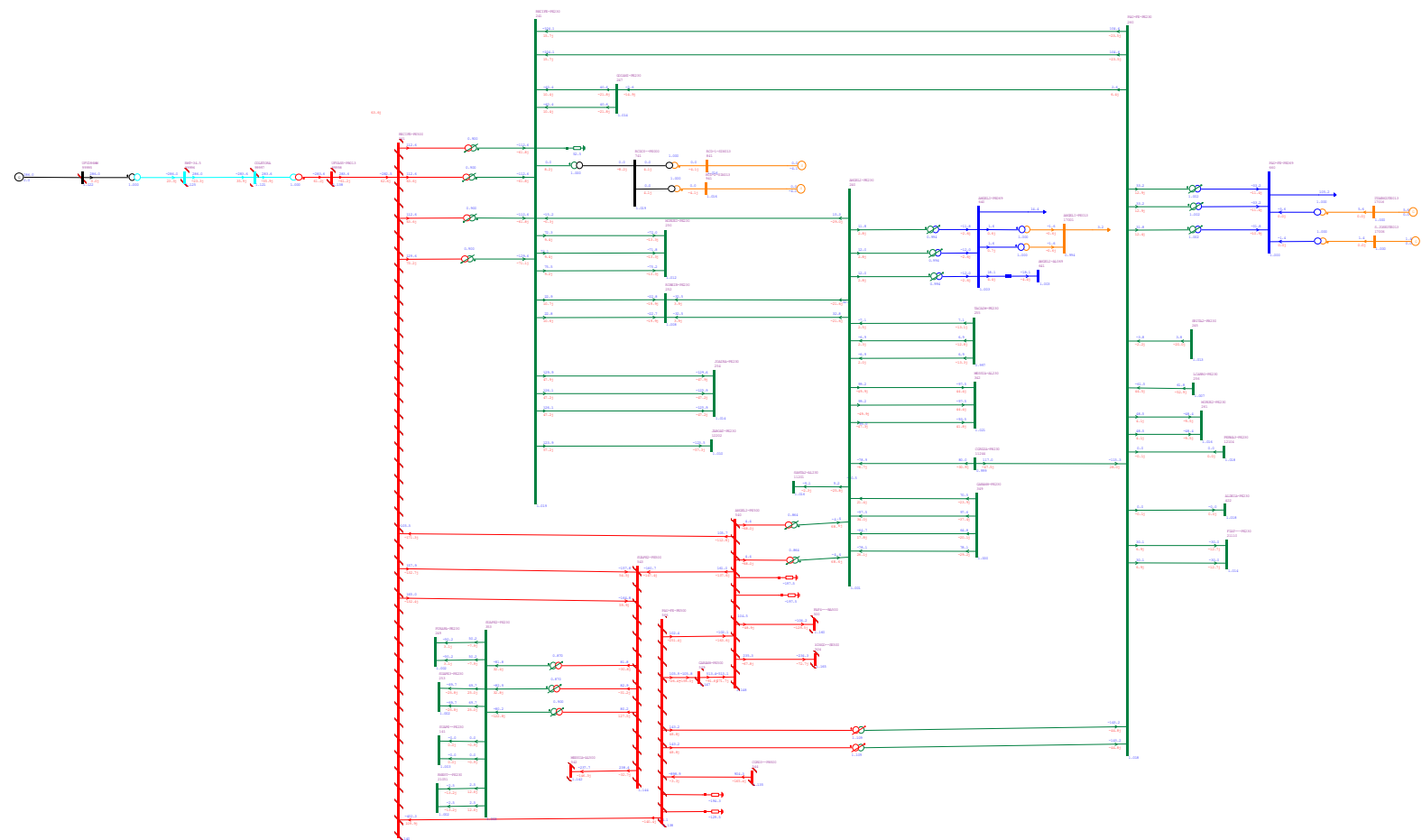
ONS. **Procedimentos de Rede**. Rio de Janeiro, 1 jan. 2021c. Disponível em: ><http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/o-que-sao>> Acesso em: 28 ago. 2022.

PEQUENO, L. E. B. **Novas facilidades de operação do programa ANAREDE**. 2010. Projeto (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

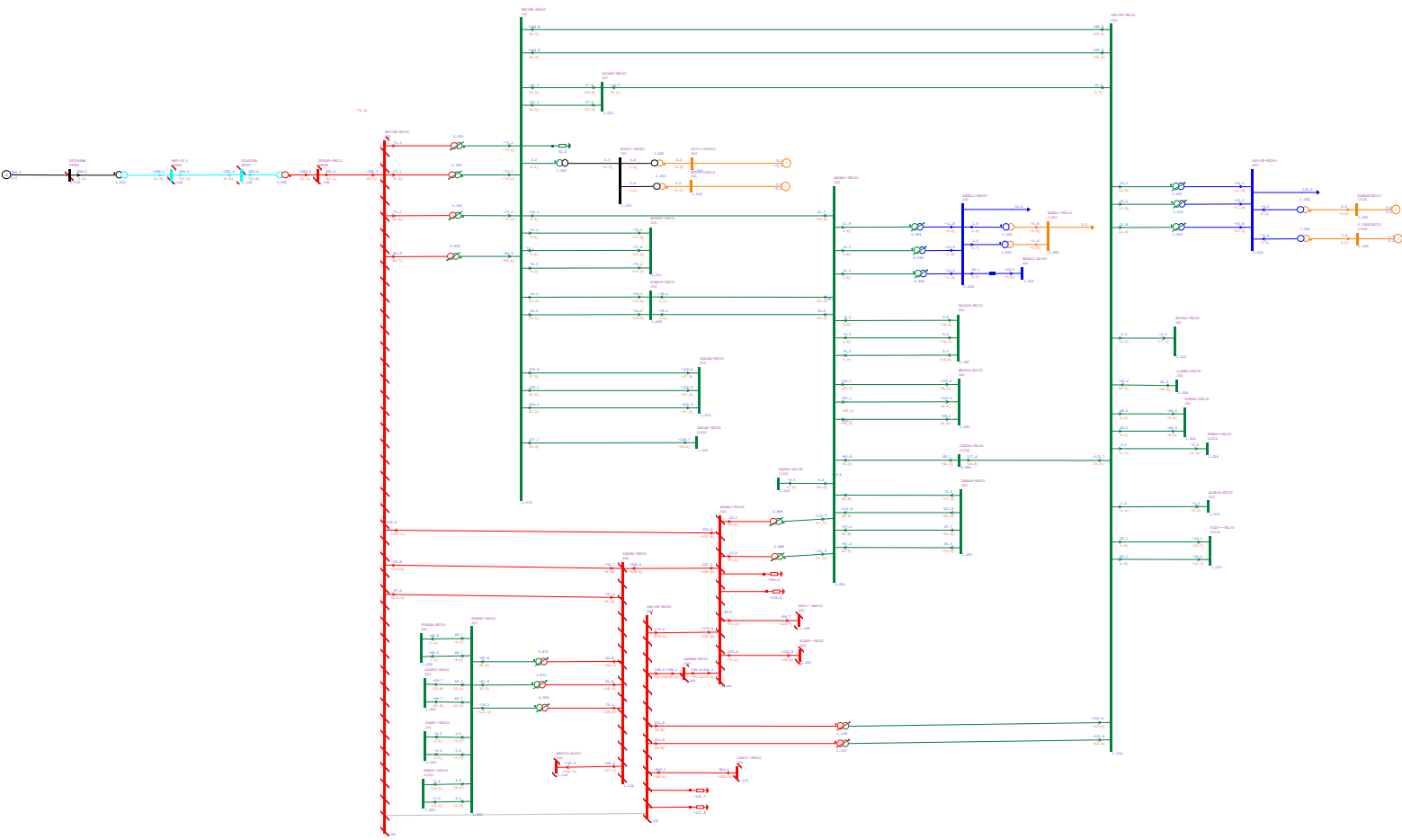
PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed.** São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: >http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html<. Acesso em: setembro de 2022.

APÊNDICE A – Resultados das simulações (Interface Gráfica)

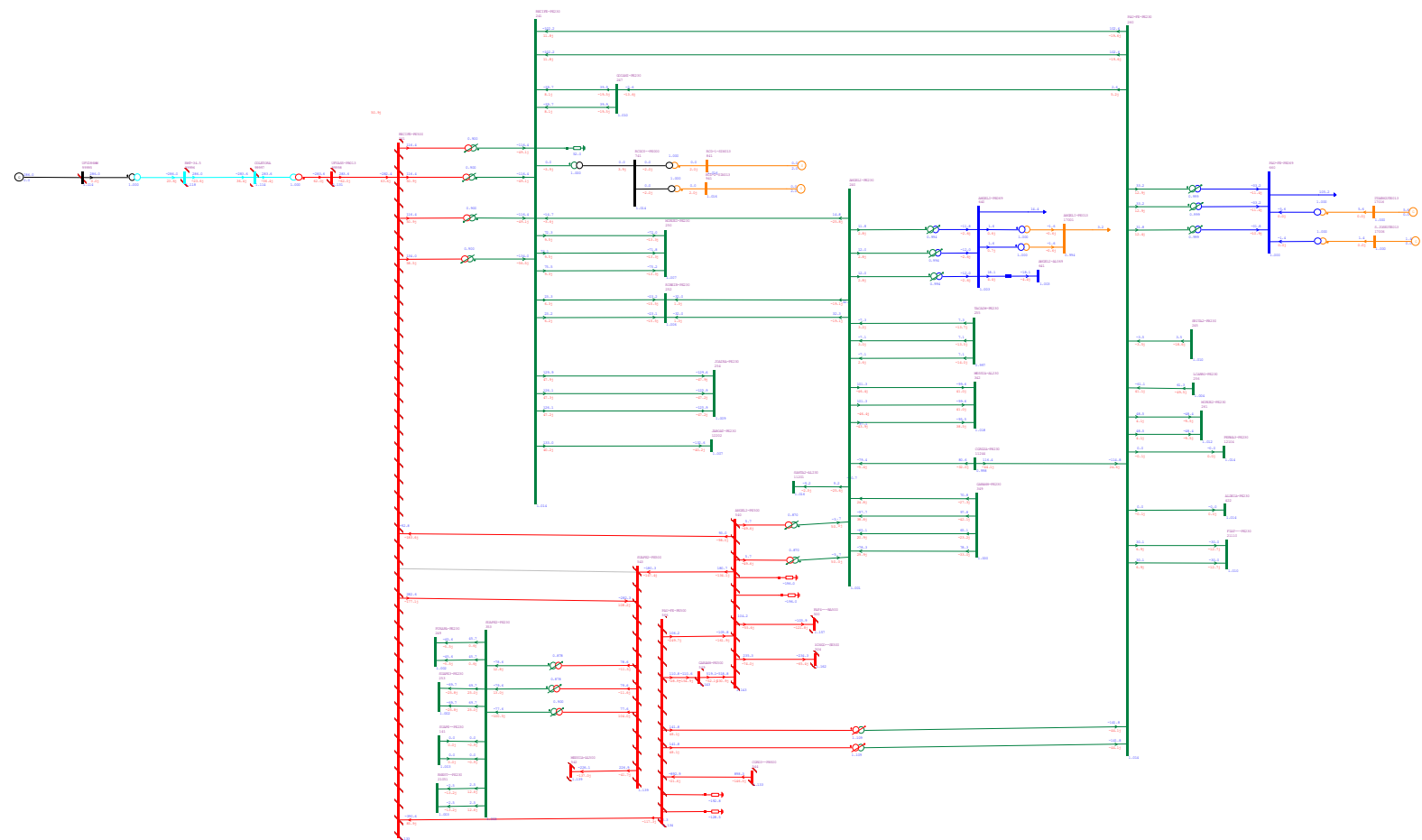
Cenário 1 - Sem contingências



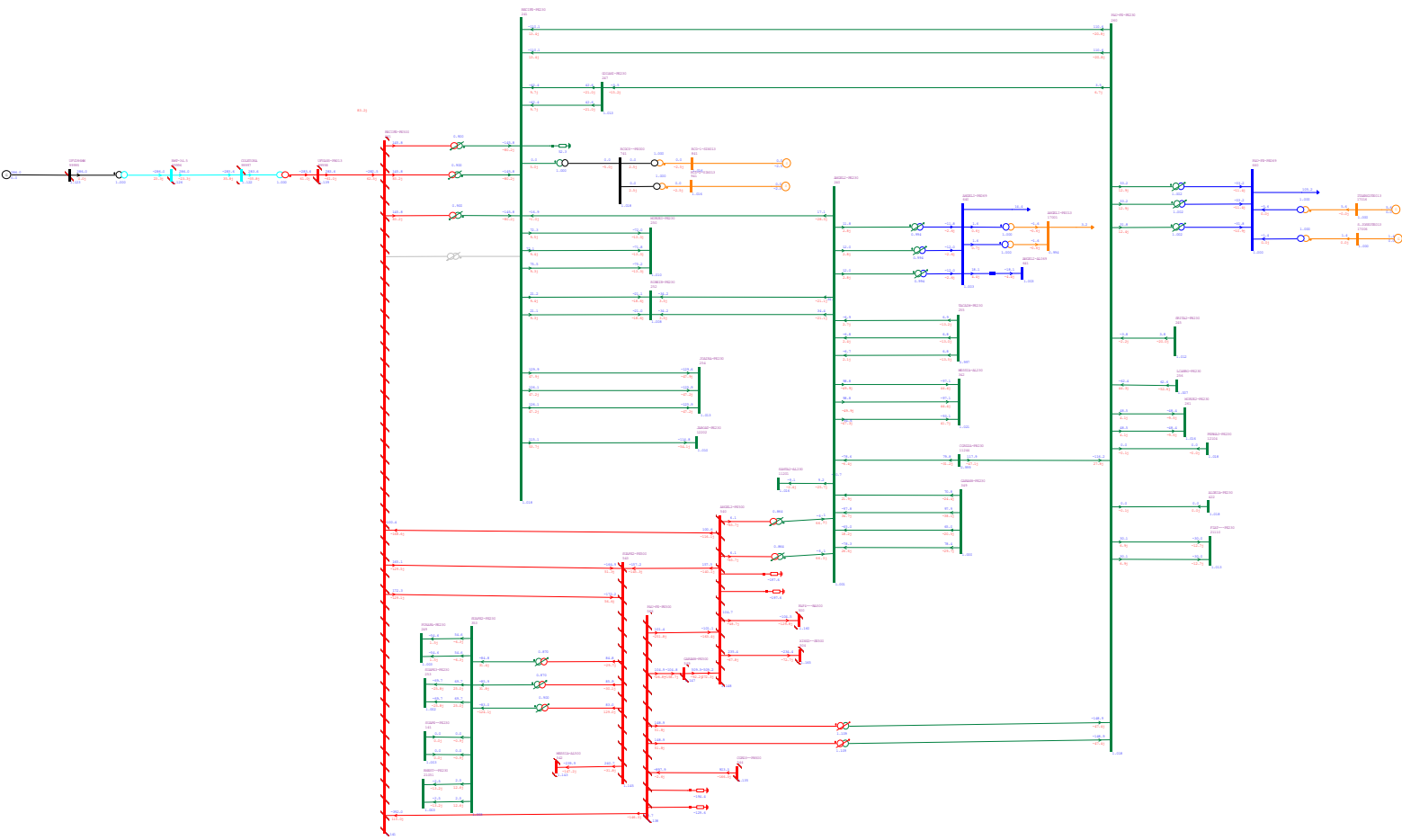
Cenário 1 - Contingência 1



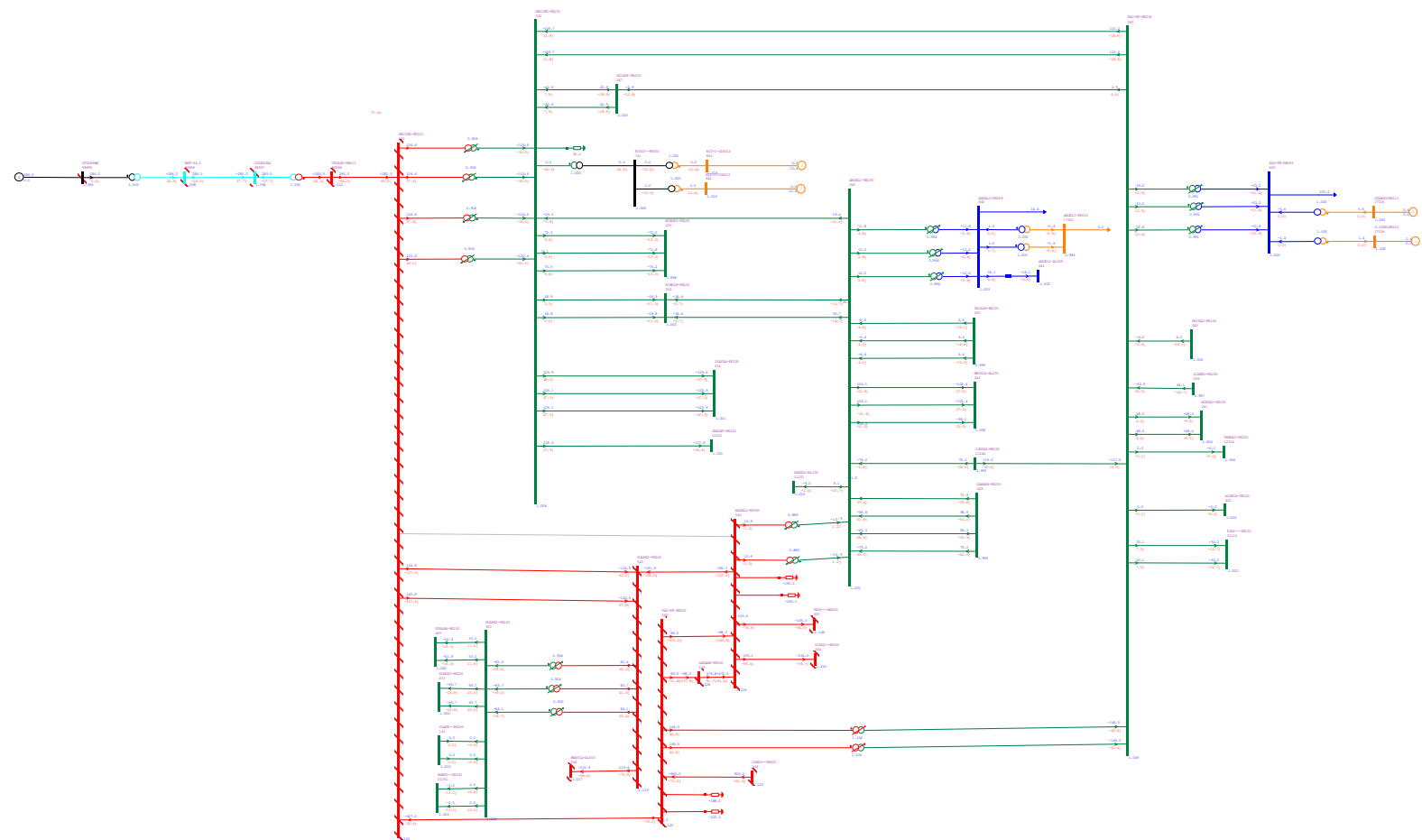
Cenário 1 - Contingência 2



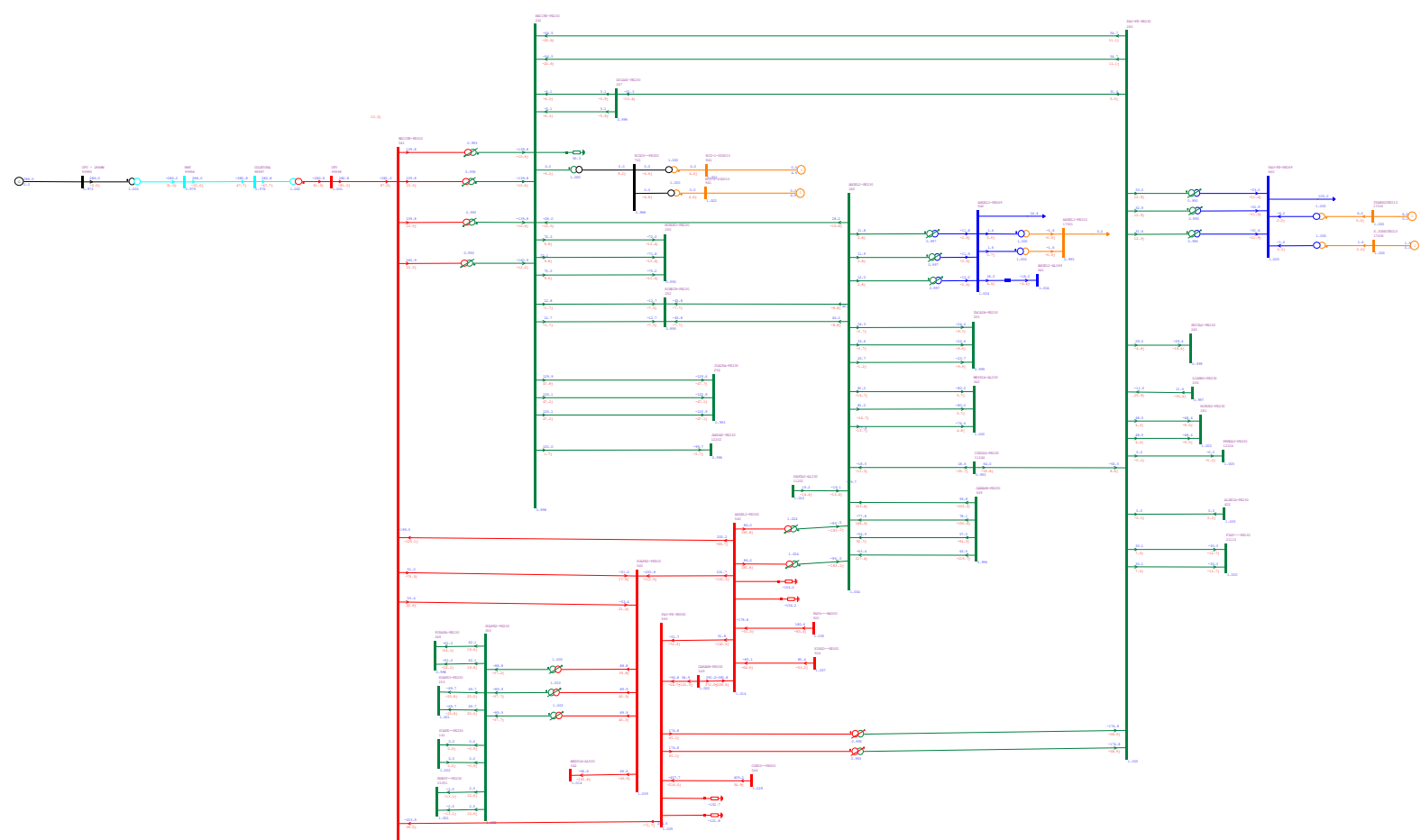
Cenário 1 - Contingência 3



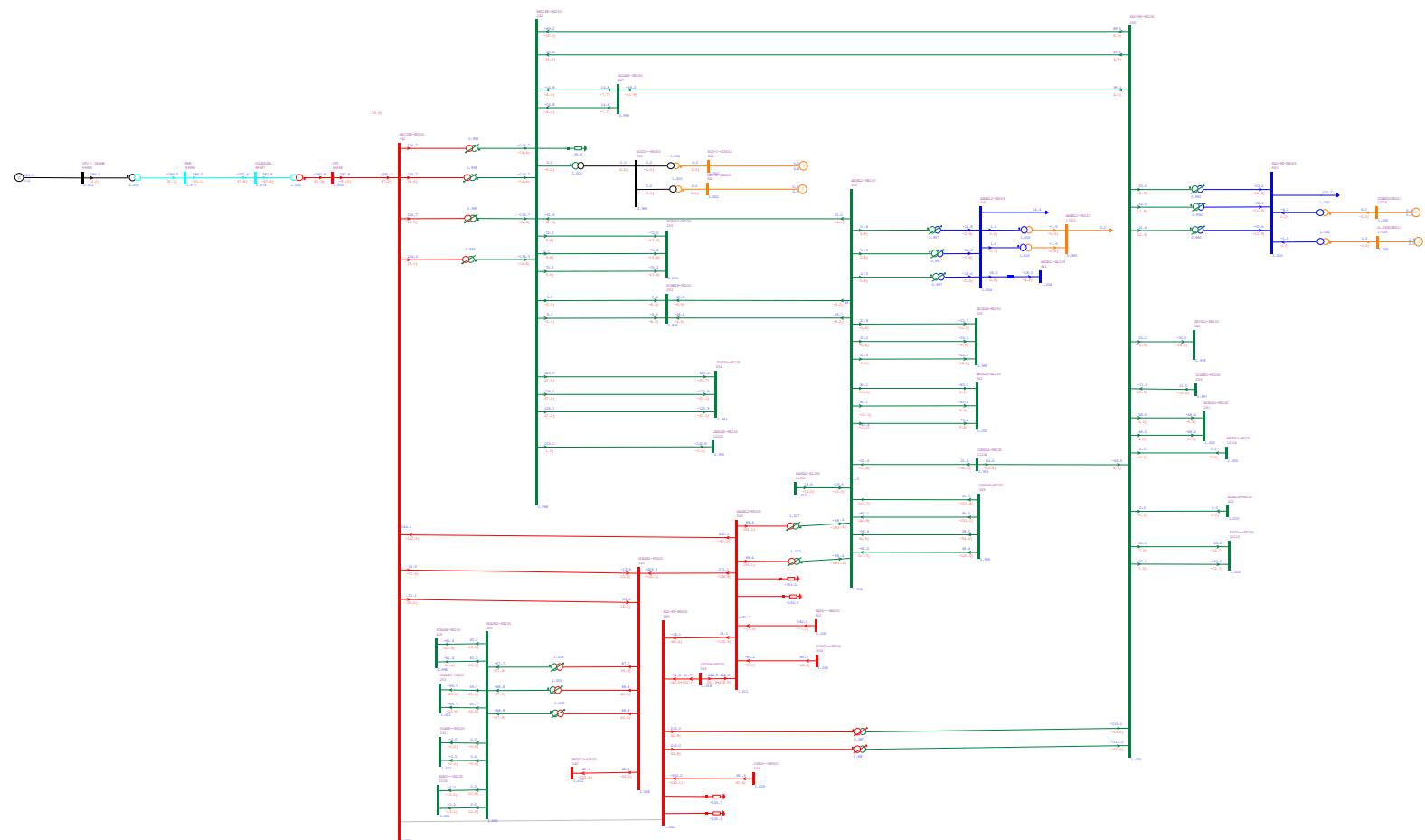
Cenário 1 - Contingência 4



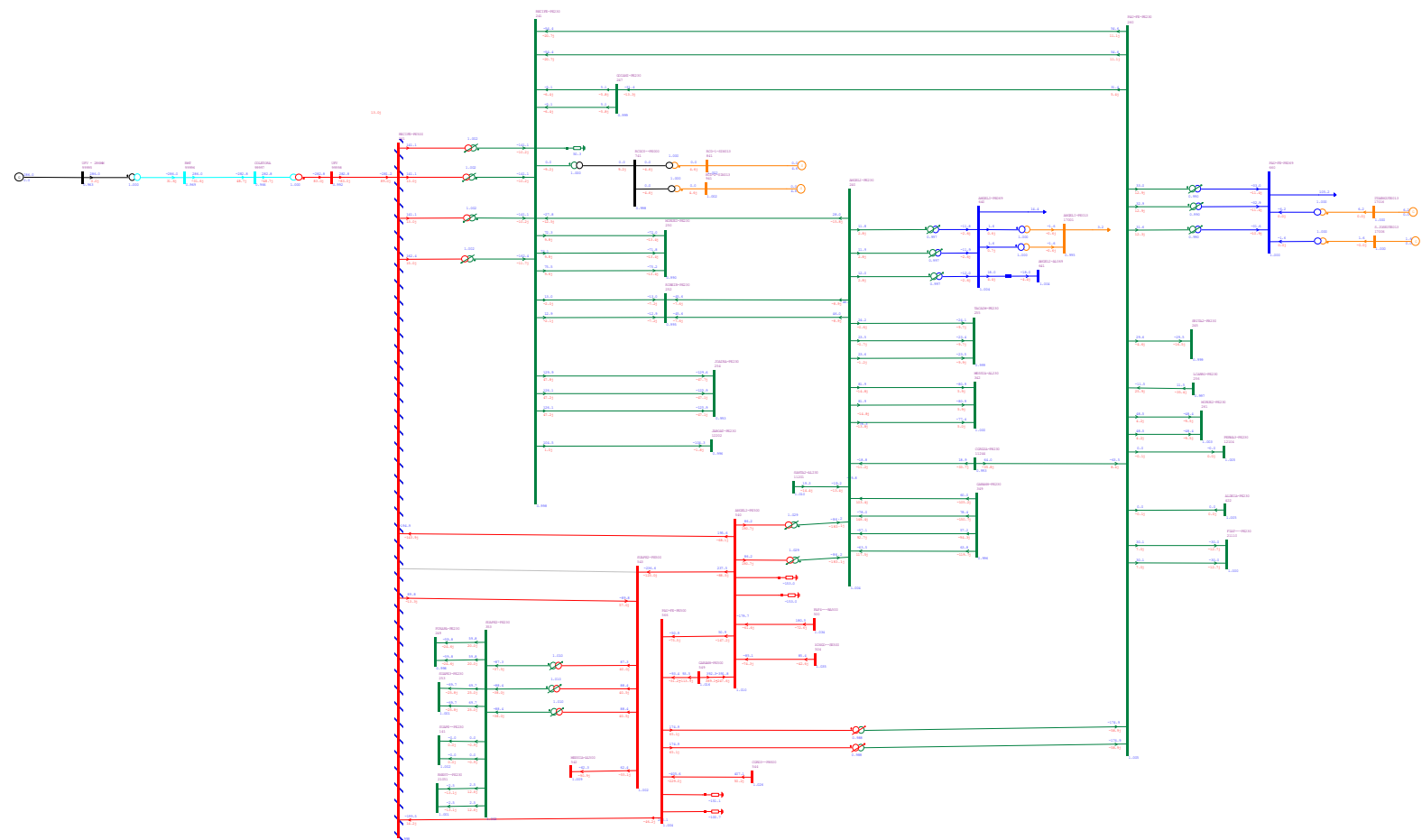
Cenário 2 - Sem contingências



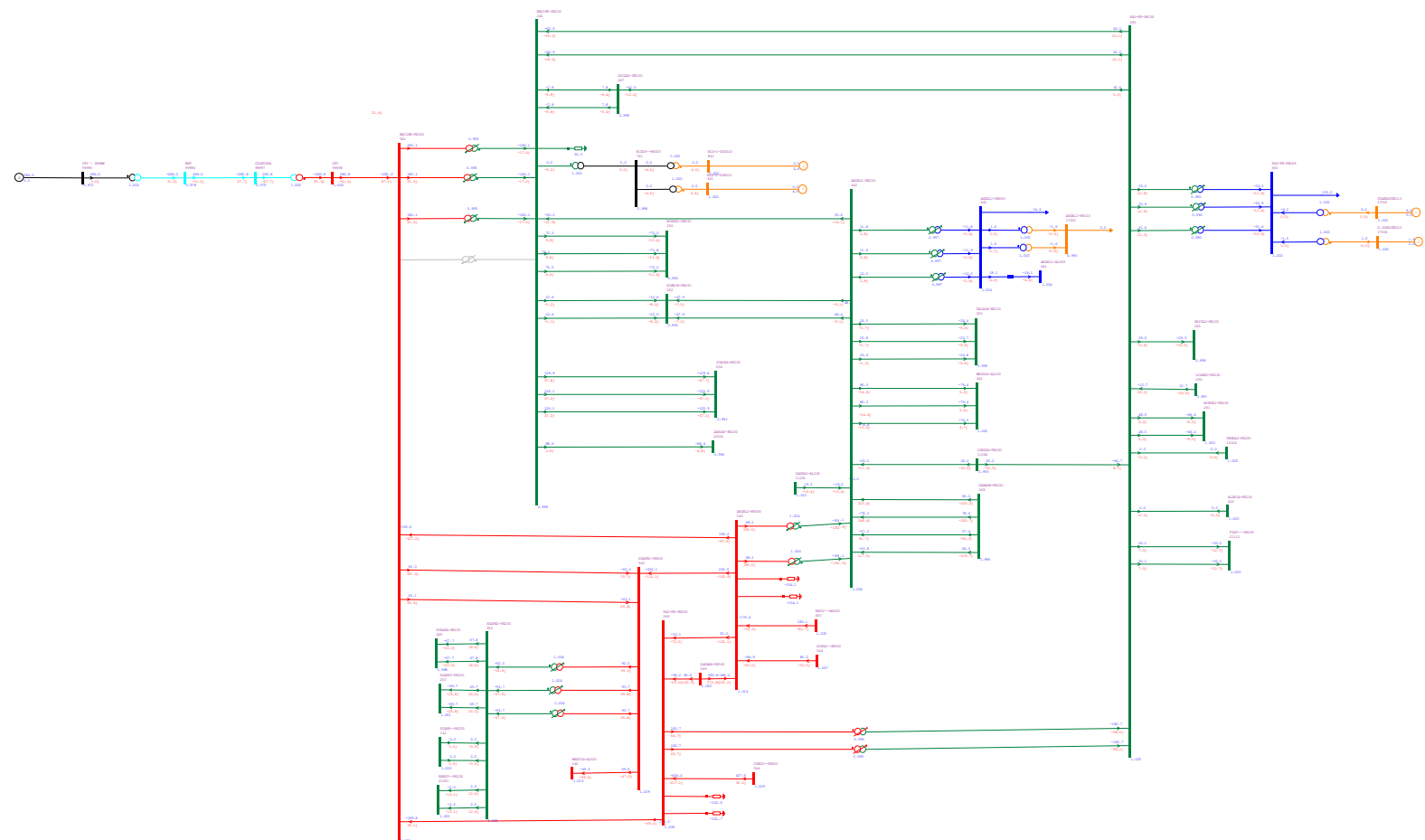
Cenário 2 - Contingência 1



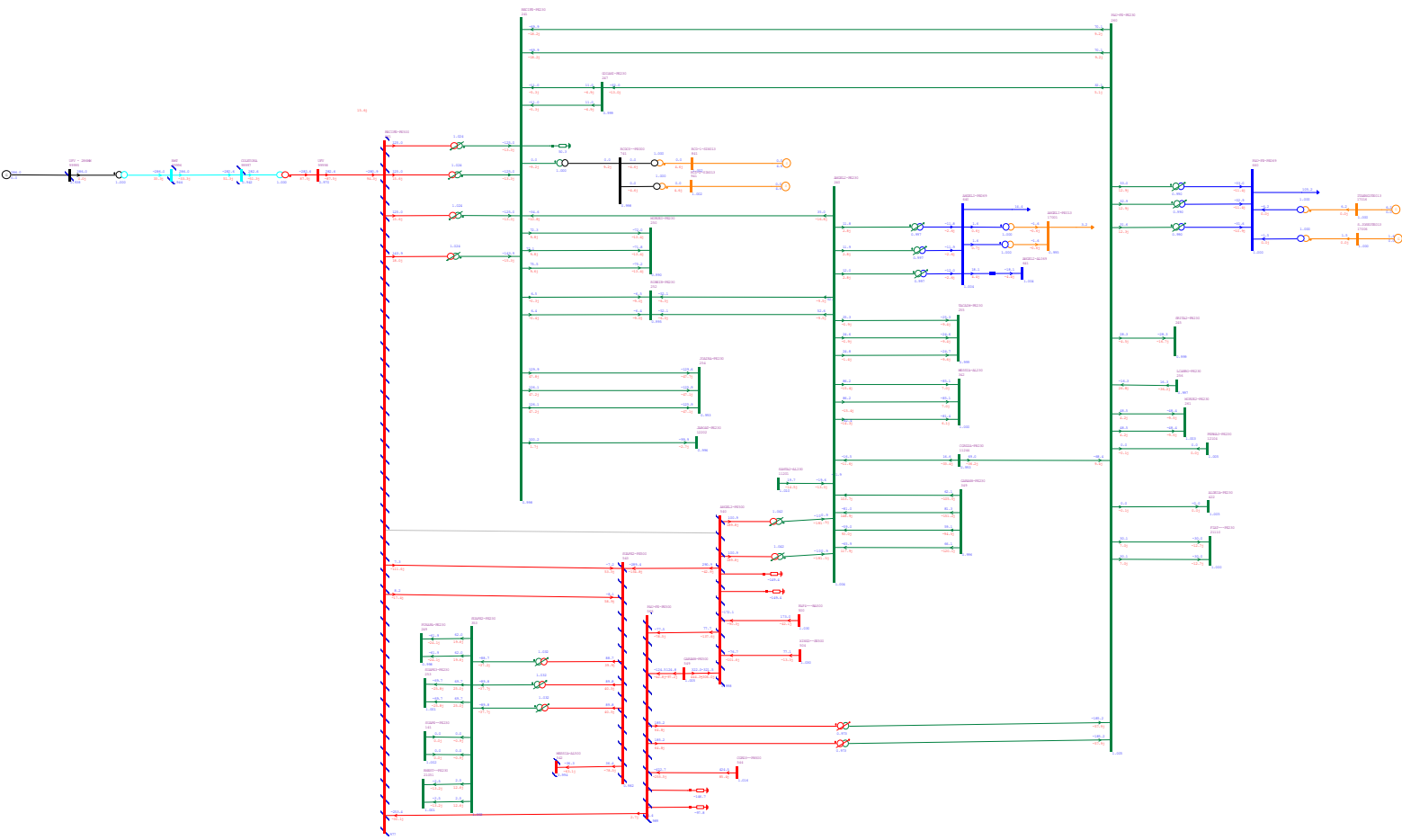
Cenário 2 - Contingência 2



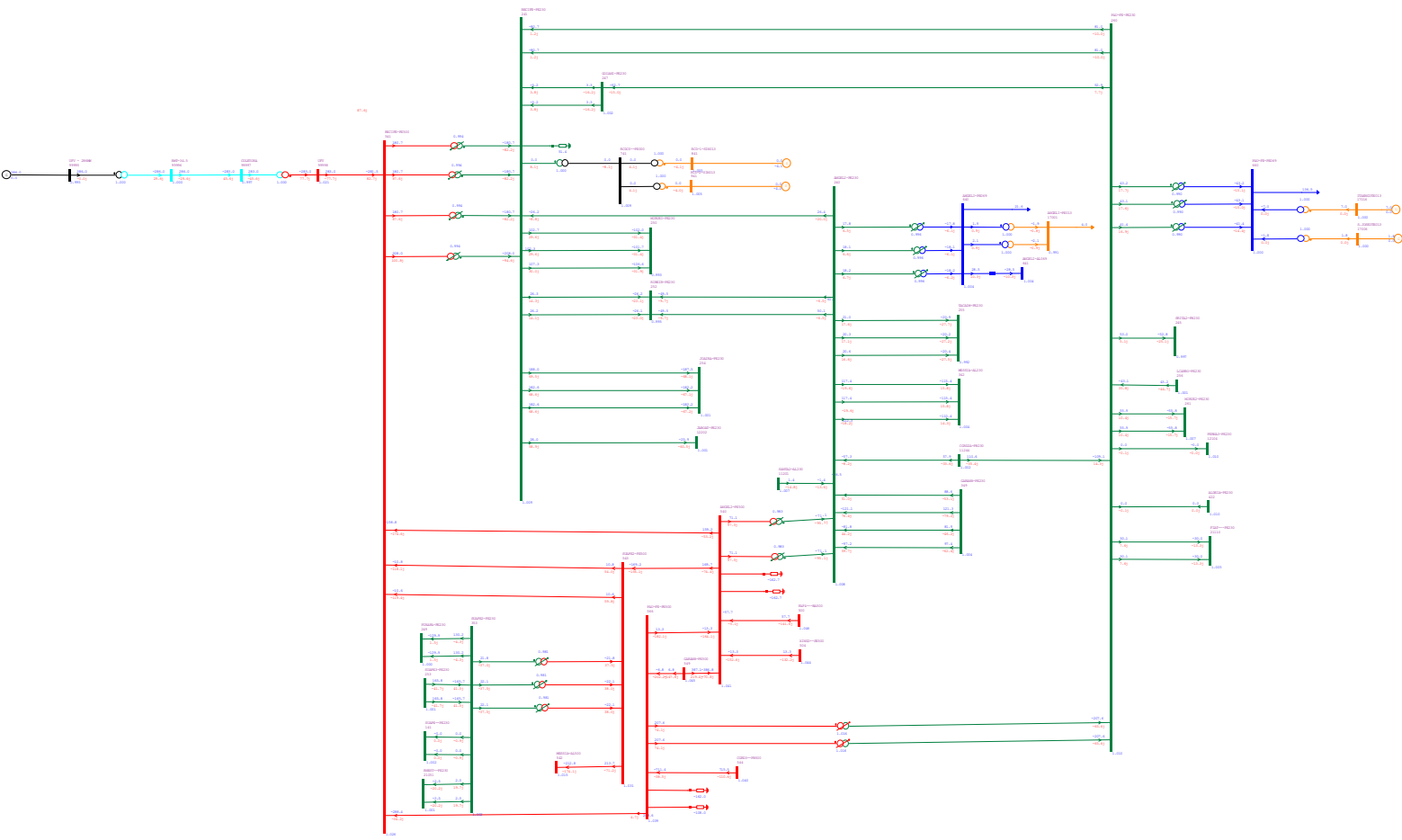
Cenário 2 - Contingência 3



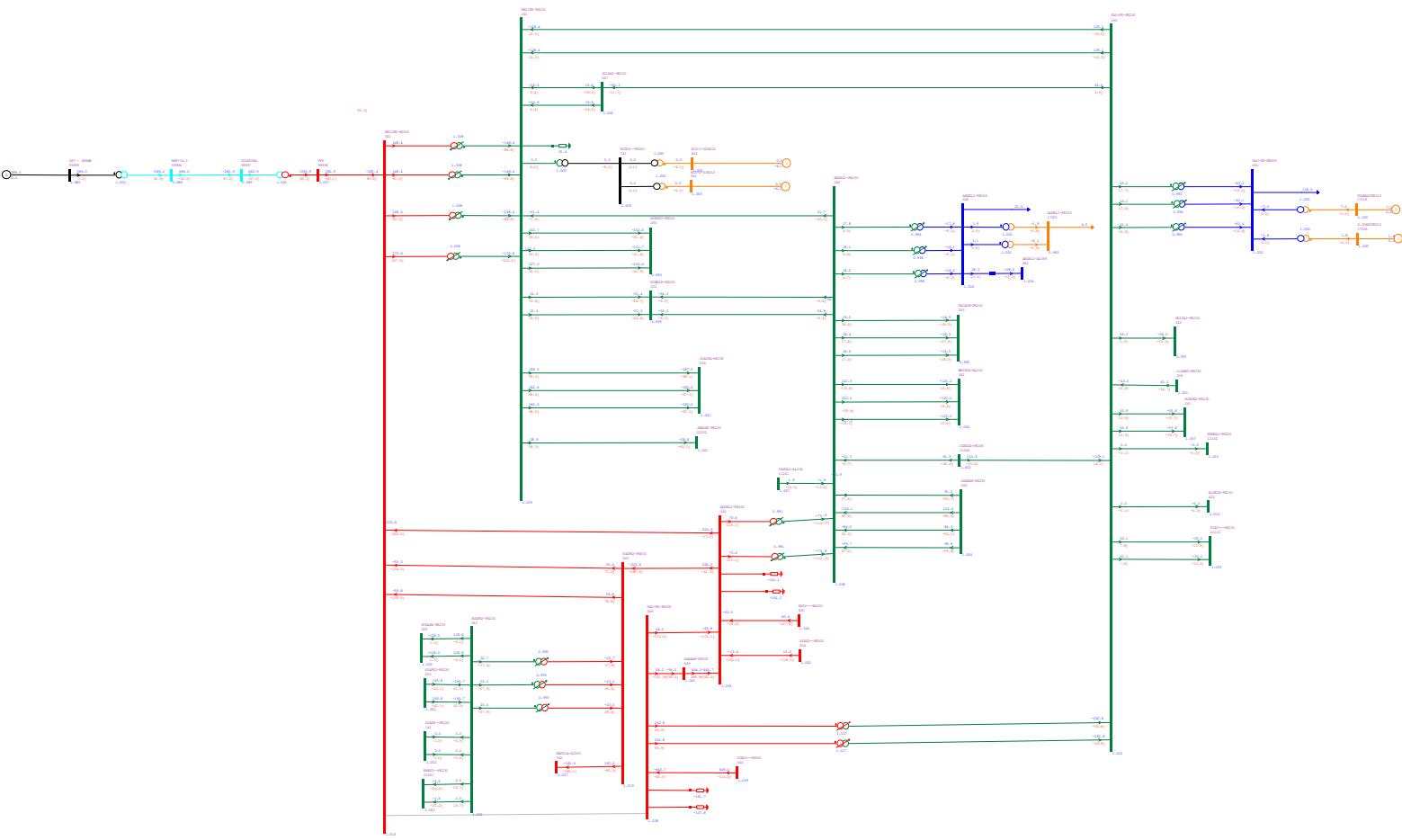
Cenário 2 - Contigência 4



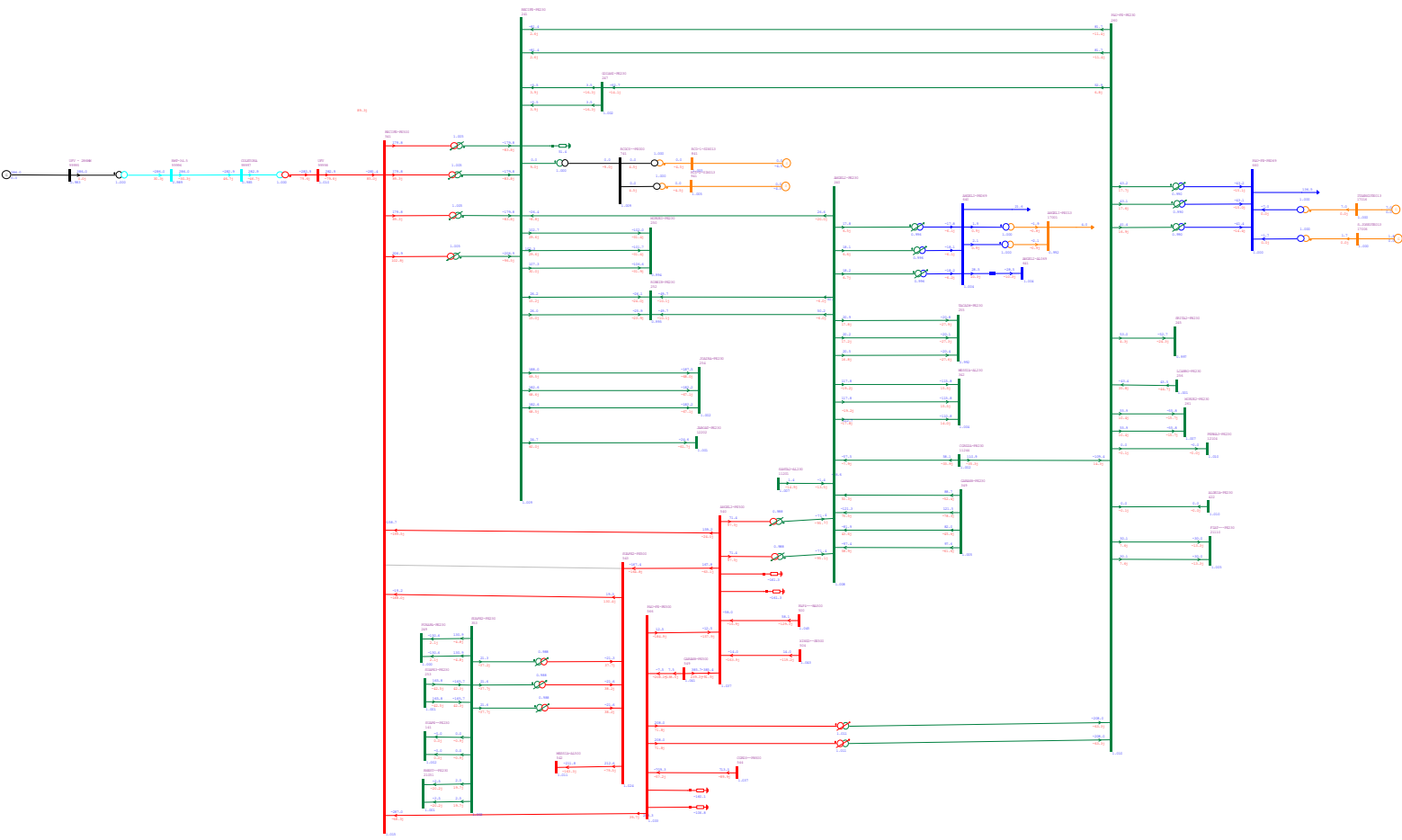
Cenário 3 - Sem contingências



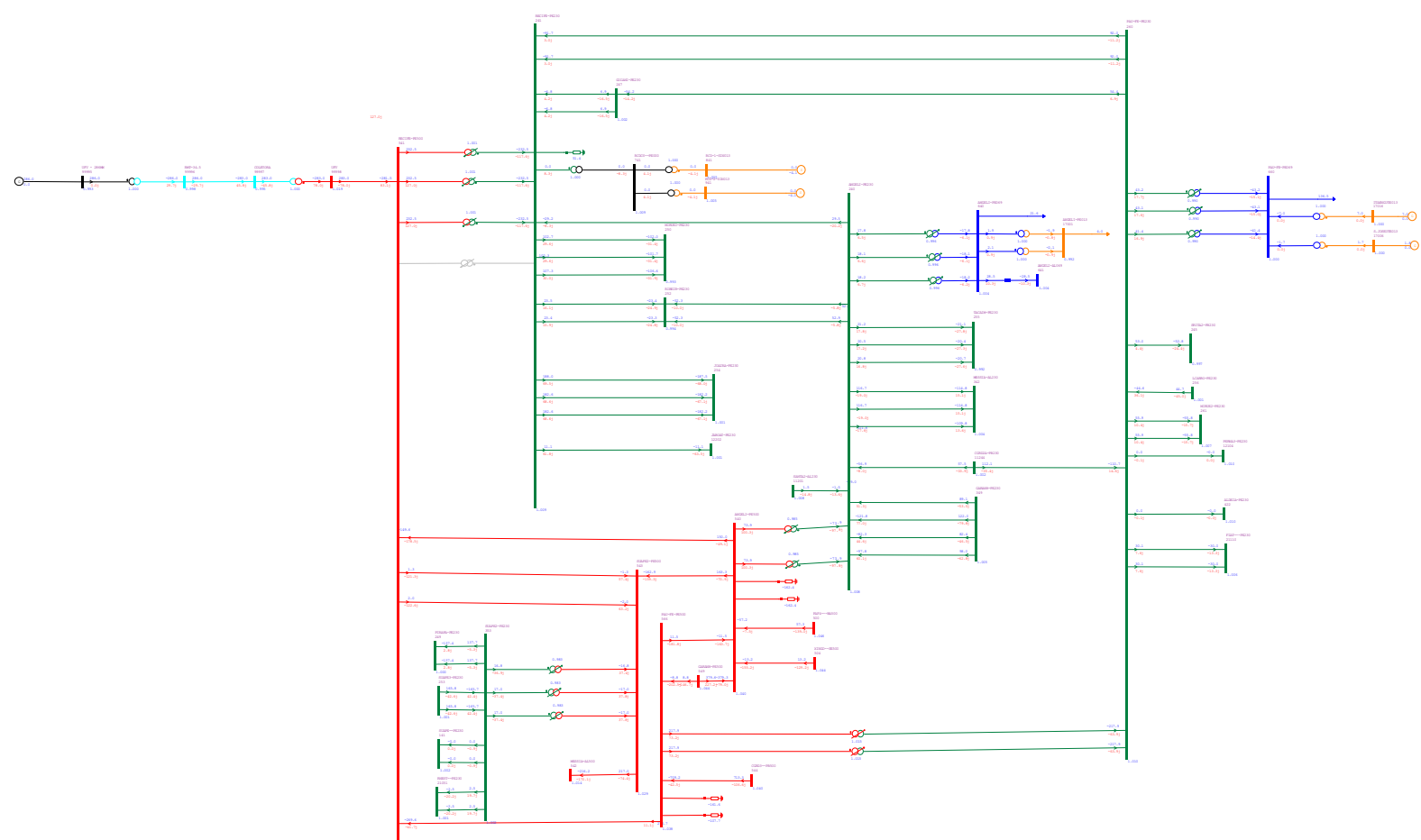
Cenário 3 - Contingência 1



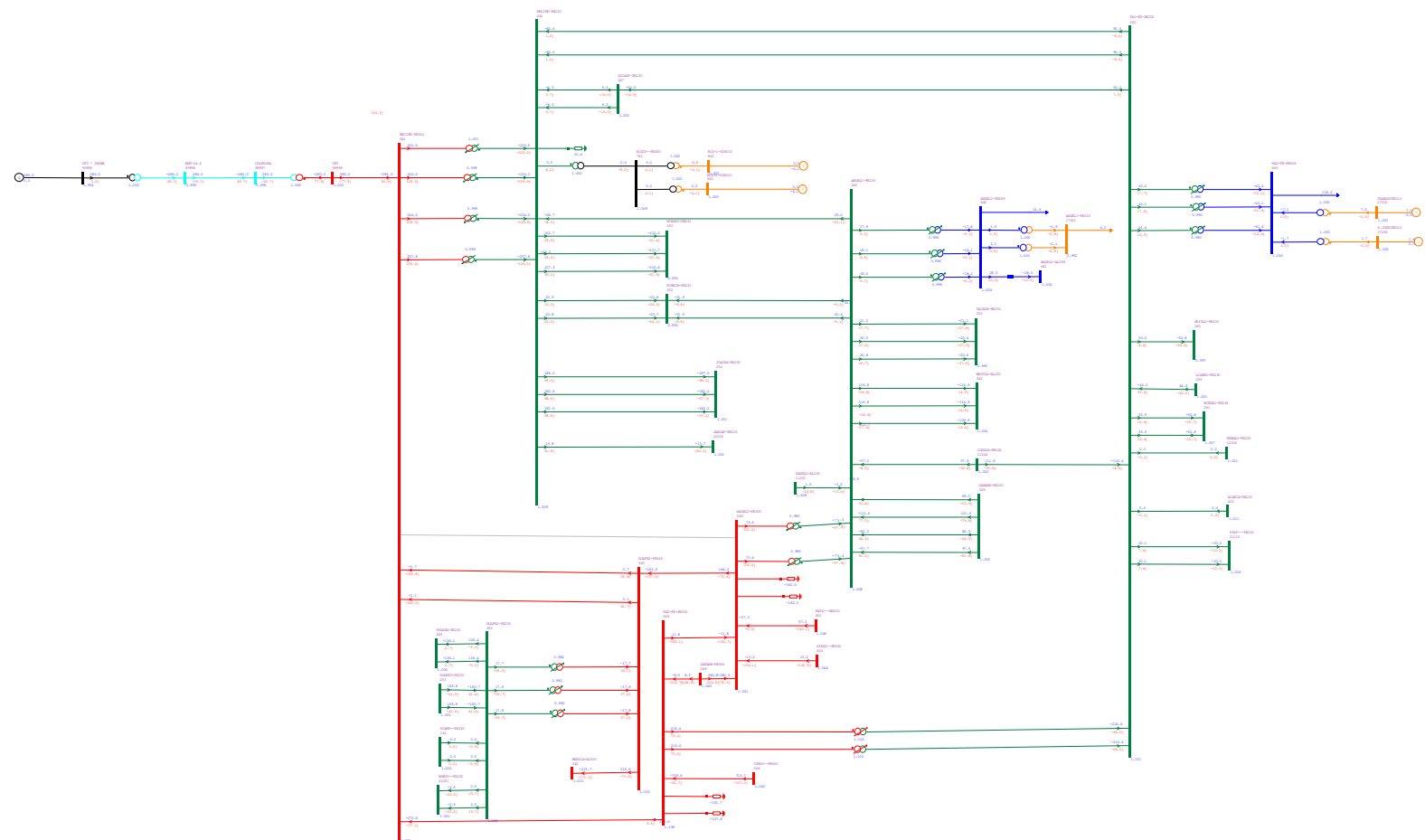
Cenário 3 - Contingência 2



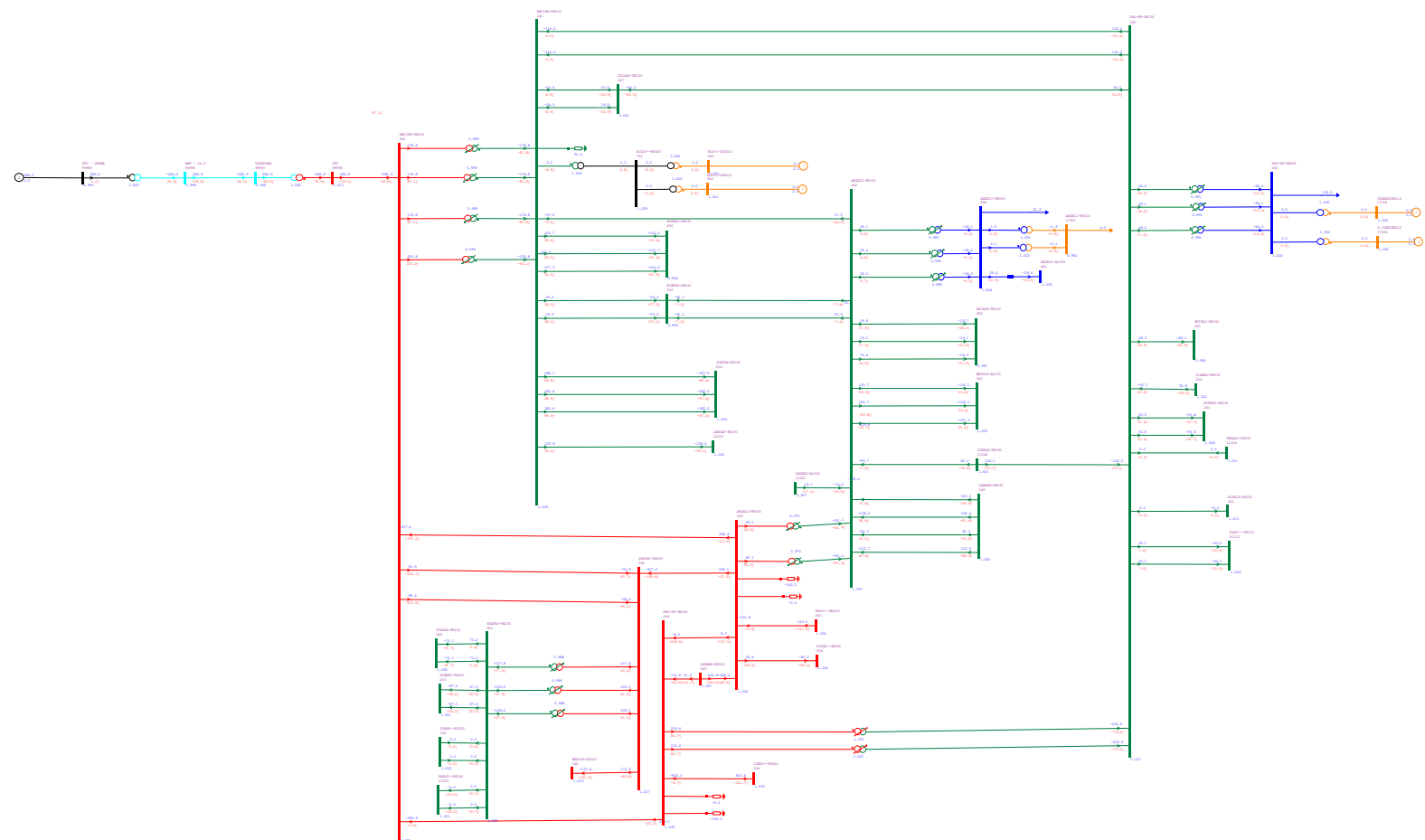
Cenário 3 - Contingência 3



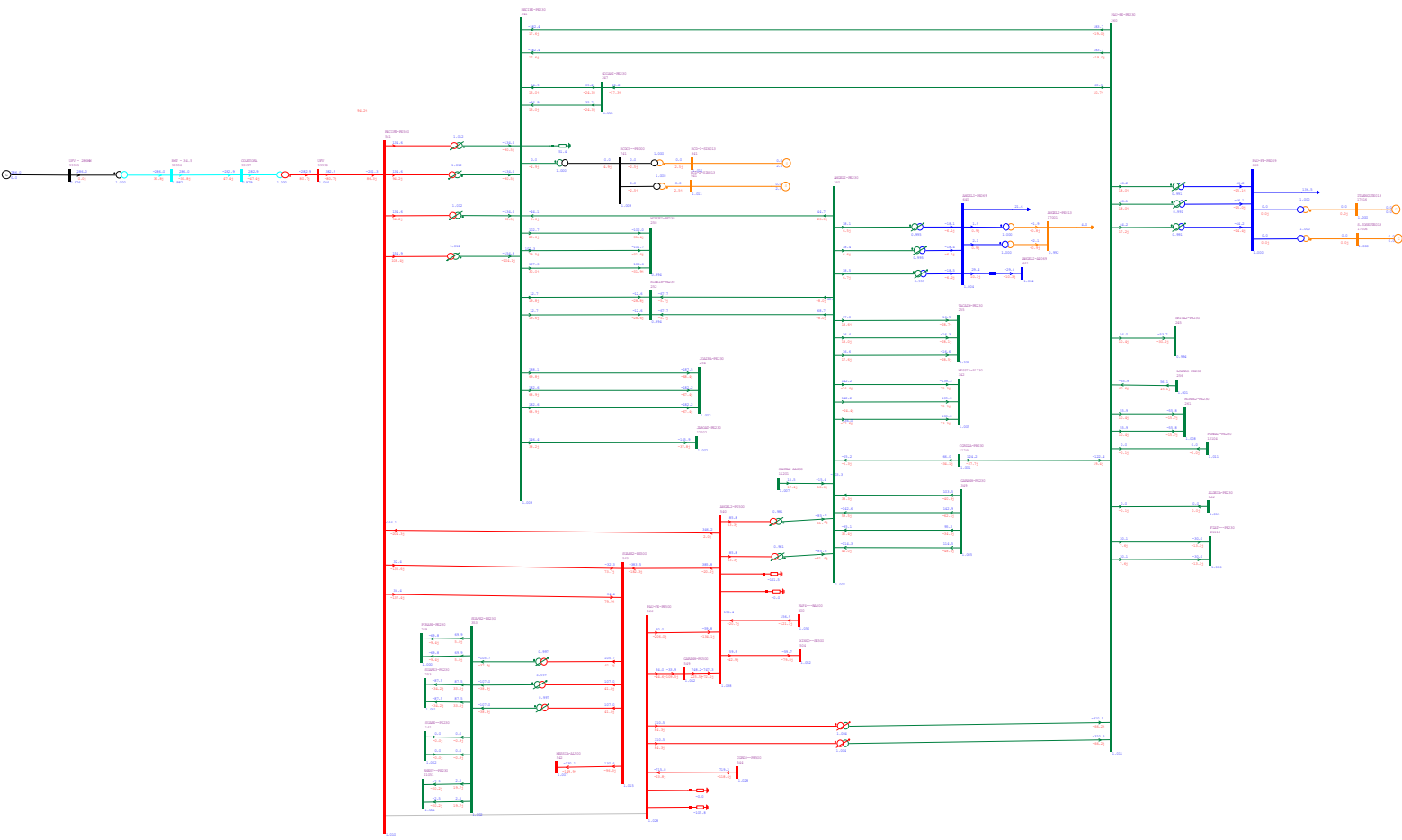
Cenário 3 - Contingência 4



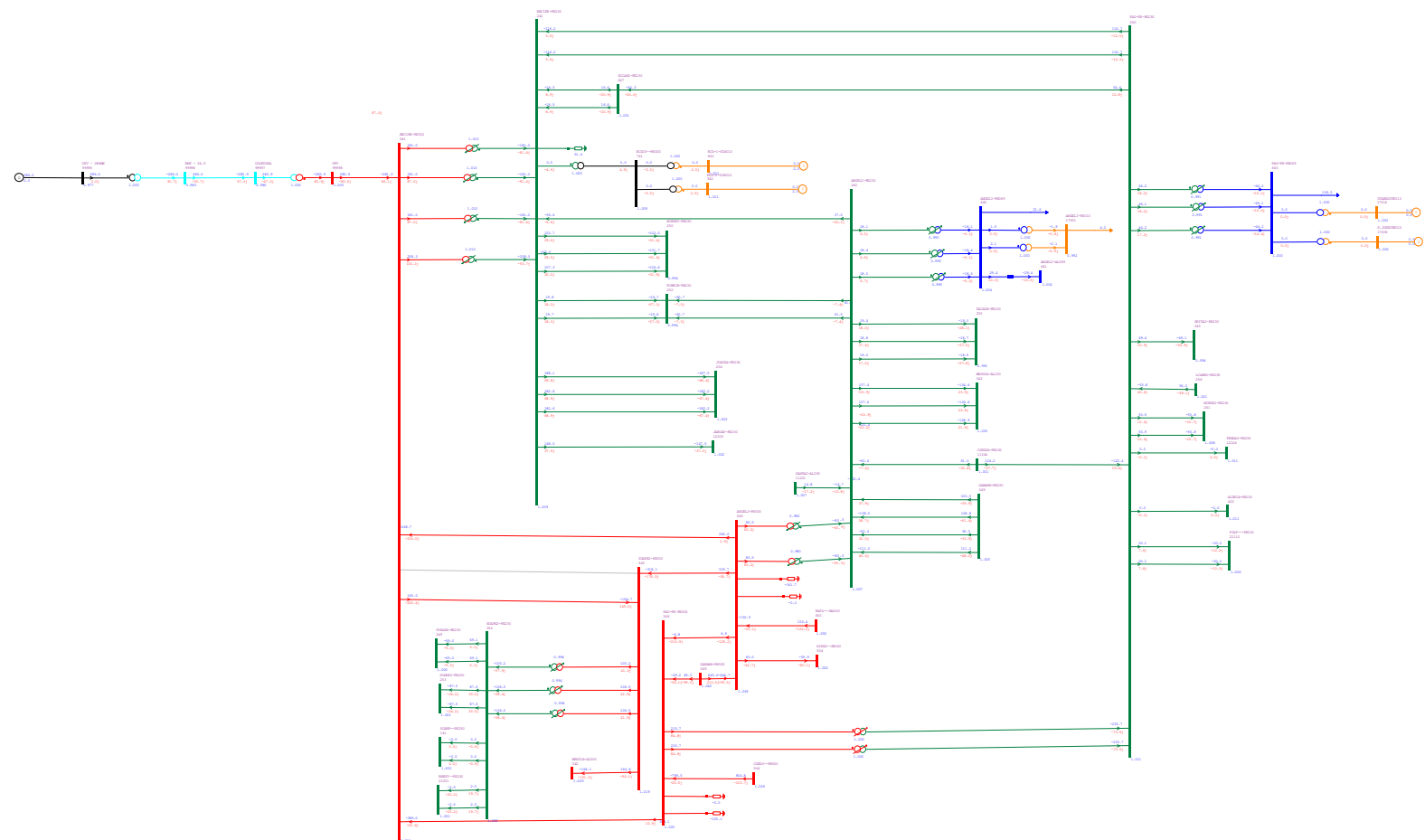
Cenário 4 - Sem Contingências



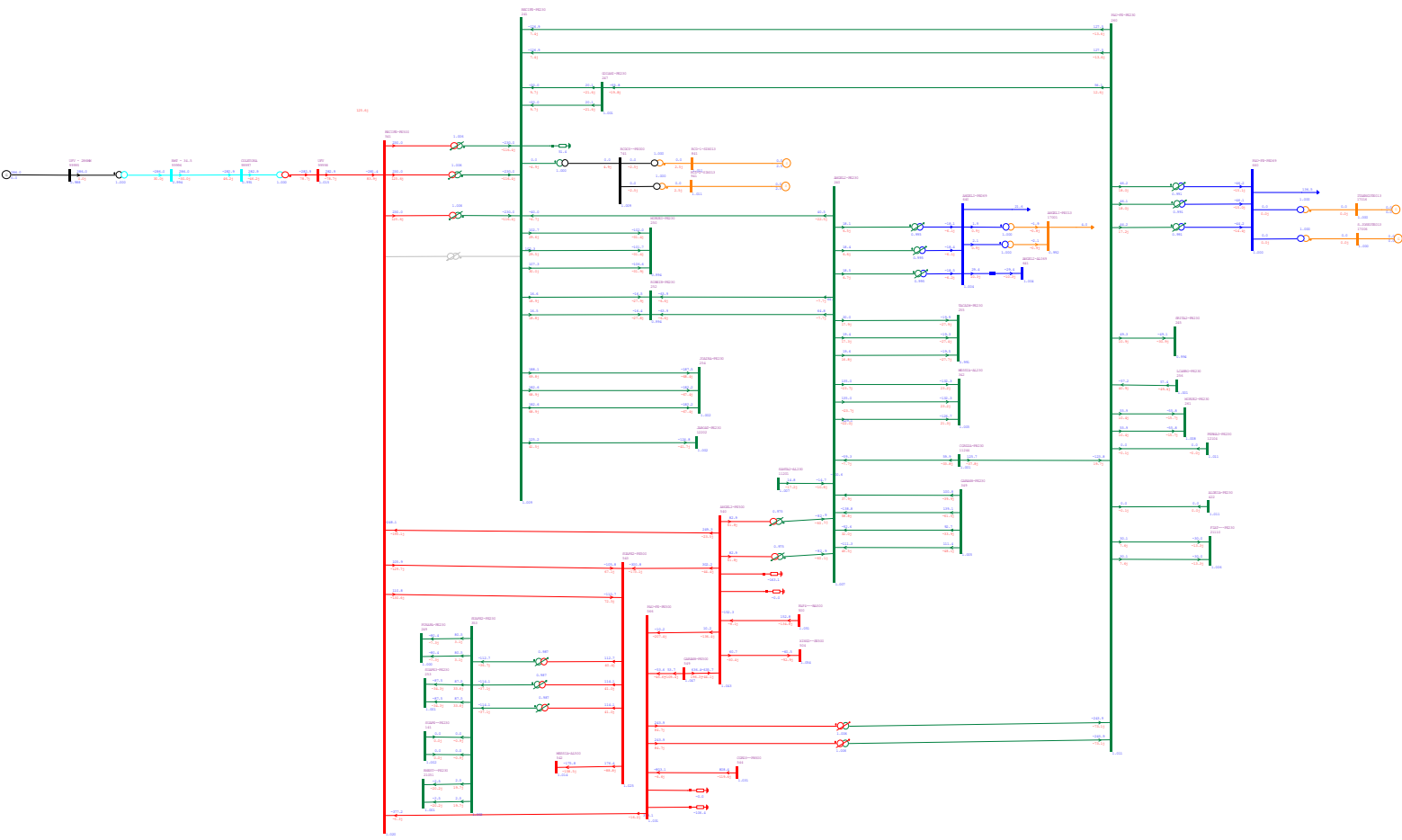
Cenário 4 - Contingência 1



Cenário 4 - Contingência 2



Cenário 4 - Contingência 3



Cenário 4 - Contingência 4

