

Desenvolvimento de modelos para análise de desempenho do SIN após a inserção de um novo elo CCAT

Bipolo Silvânia - Graça Aranha



JORDÃO
SOLUÇÕES EM ENERGIA

www.jordaoenergia.com.br

Sumário

Introdução

Benchmarking

Produto 1 – Equivalentes de Rede Estáticos

Produto 2 - Progressão do Produto 1, com inclusão de modelagem dinâmica das máquinas e CERs

Produto 3 - Progressão do Produto 2, com inclusão de modelagem dinâmica dos elos CCAT

Instruções de uso e apresentação do modelo

Introdução

Desenvolvimento de modelos para avaliação do impacto das interações *multi-infeed* que podem ocorrer entre o novo elo CCAT e os demais que já estão em operação no SIN.

Motivação e Objetivo

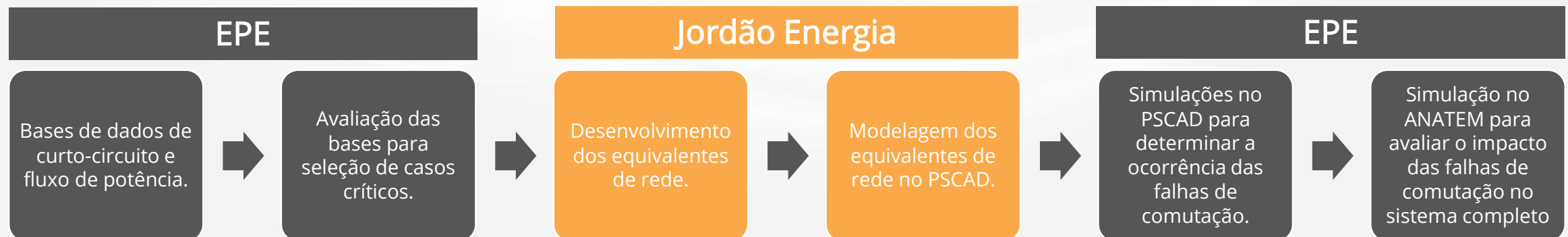
- Aumento do número de elos de corrente contínua na região Sudeste/Centro-Oeste.
- Desenvolvimento de modelos para avaliação do impacto das interações *Multi-Infeed* que podem ocorrer entre o novo elo CCAT e os demais que já estão em operação no SIN.
- Programas utilizados para analisar *Multi-Infeed*: ANATEM e PSCAD.



Metodologia para Estudo de Multi-Infeed

Uso combinado do PSCAD e ANATEM.

- O PSCAD é utilizado para verificar a ocorrência e características de falhas de comutação;
- As características das falhas de comutação são inseridas no ANATEM para analisar a resposta dinâmica do sistema com o objetivo de identificar possíveis perdas de estabilidade.



Benchmarking

Equivalentes para realização de análises dos elos de Xingu.

Modelagem de Equivalente de Rede

- Modelagem de rede elétrica equivalente no **PSCAD** e **RSCAD** para estudos dos elos de Xingu.
- Trabalhos realizados em **2017** e **2018**.
- **4 casos** de carga foram utilizados:
 - Bases de dados:
 - Curto-circuito;
 - Fluxo de potência;
 - Dinâmica.

Modelagem de Equivalente de Rede – Xingu Estreito

- **Composição dos equivalentes:**

- 110 barras;
- 130 linhas;
- 60 transformadores;
- 20 geradores;
- 1 estático;
- 5 bipolos.

- **Elementos modelados:**

- 13 máquinas;
- 1 estático.

Elementos modelados	
Máquinas	Estáticos
Angra 1	CE Itatiba
Angra 2	
Belo Monte	
B. Fluminense Gás	
B. Fluminense Vapor	
CS Grajaú	
CS Ibiúna	
Máquina Equivalente	
Máquina Equivalente 2	
TermoRio Gás	
TermoRio Vapor	
Tucuruí	
Tucuruí 2	

Modelagem de Equivalente de Rede – Xingu T. Rio

- **Composição dos equivalentes:**

- 185 barras;
- 148 linhas;
- 75 transformadores;
- 33 geradores;
- 1 estático;
- 4 bipolos.

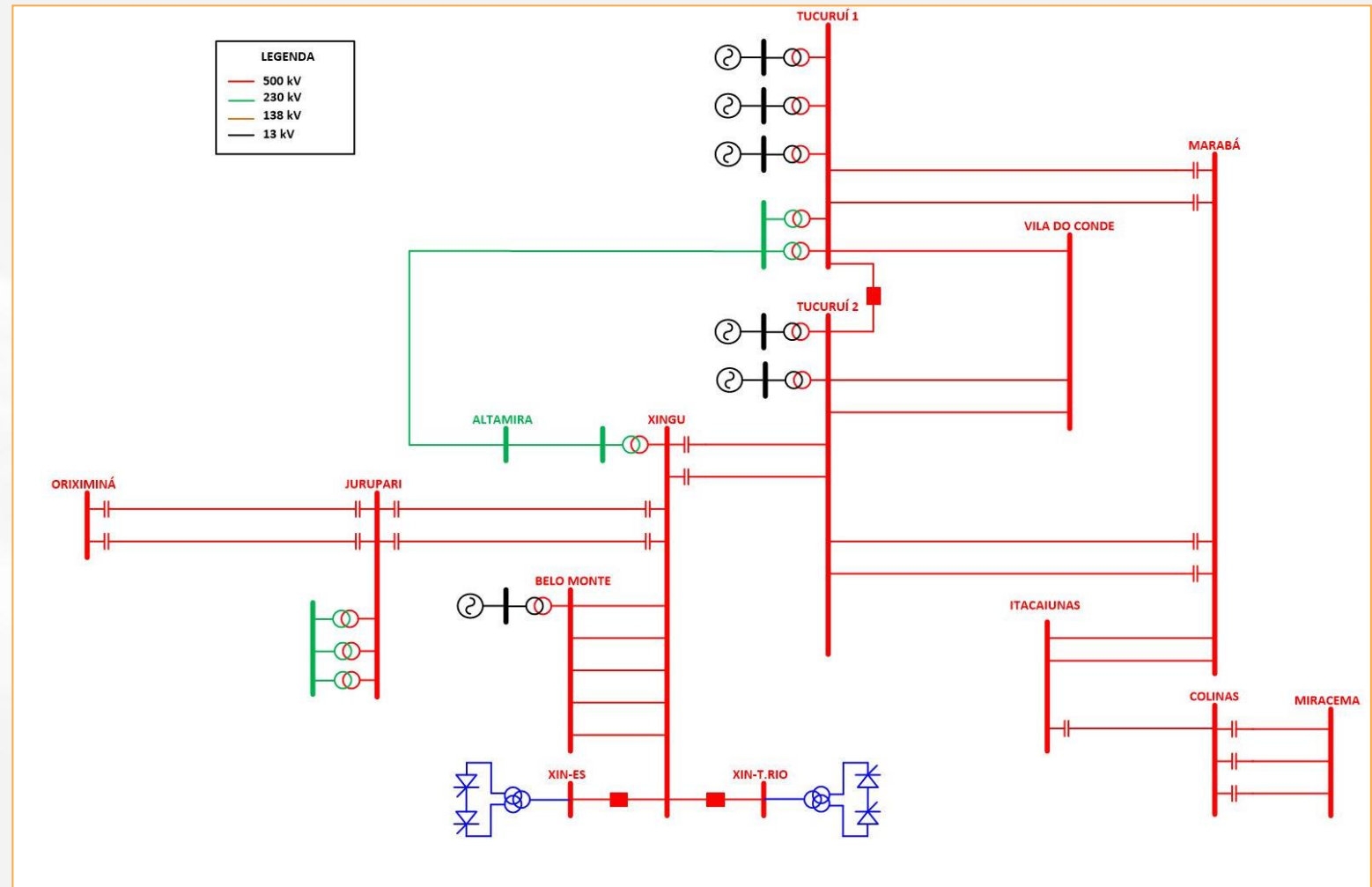
- **Elementos modelados:**

- 20 máquinas;
- 1 estático.

Elementos modelados	
Máquinas	Estáticos
Angra 1	CE Itatiba
Angra 2	
Belo Monte	
B. Fluminense Gás	
B. Fluminense Vapor	
CS Grajaú	
CS T. Preto	
CS T. Rio	
CS Ibiúna	
Máquina Equivalente	
Máquina Equivalente 2	
TermoRio Gás	
TermoRio Vapor	
Tucuruí	
Tucuruí 2	
Furnas	
Água Vermelha	
Mario Lagos	
Ilha Solteira	
Mascarenhas de Moraes	

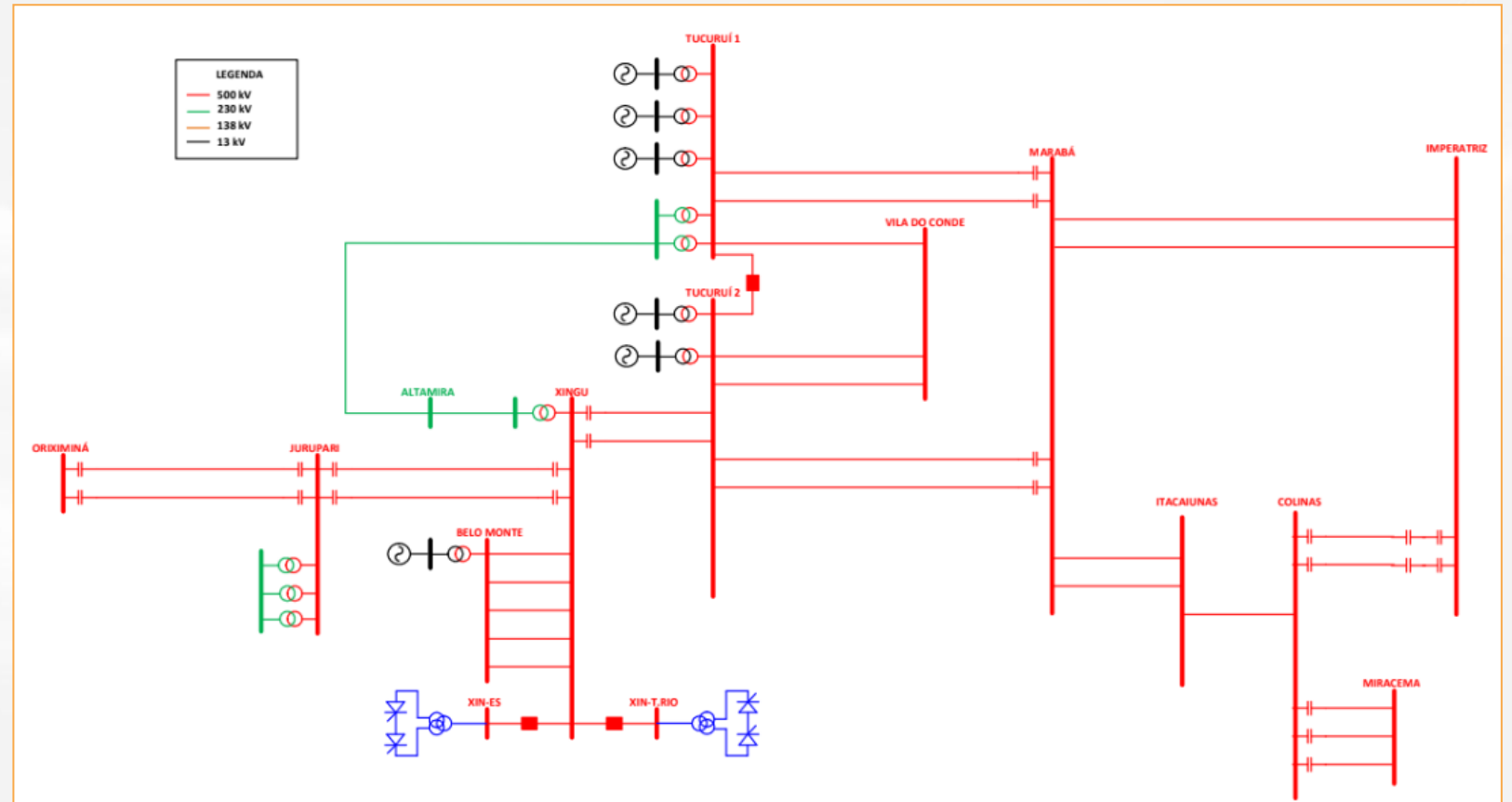
Modelagem de Equivalente de Rede – Xingu Estreito

Rede da região norte.



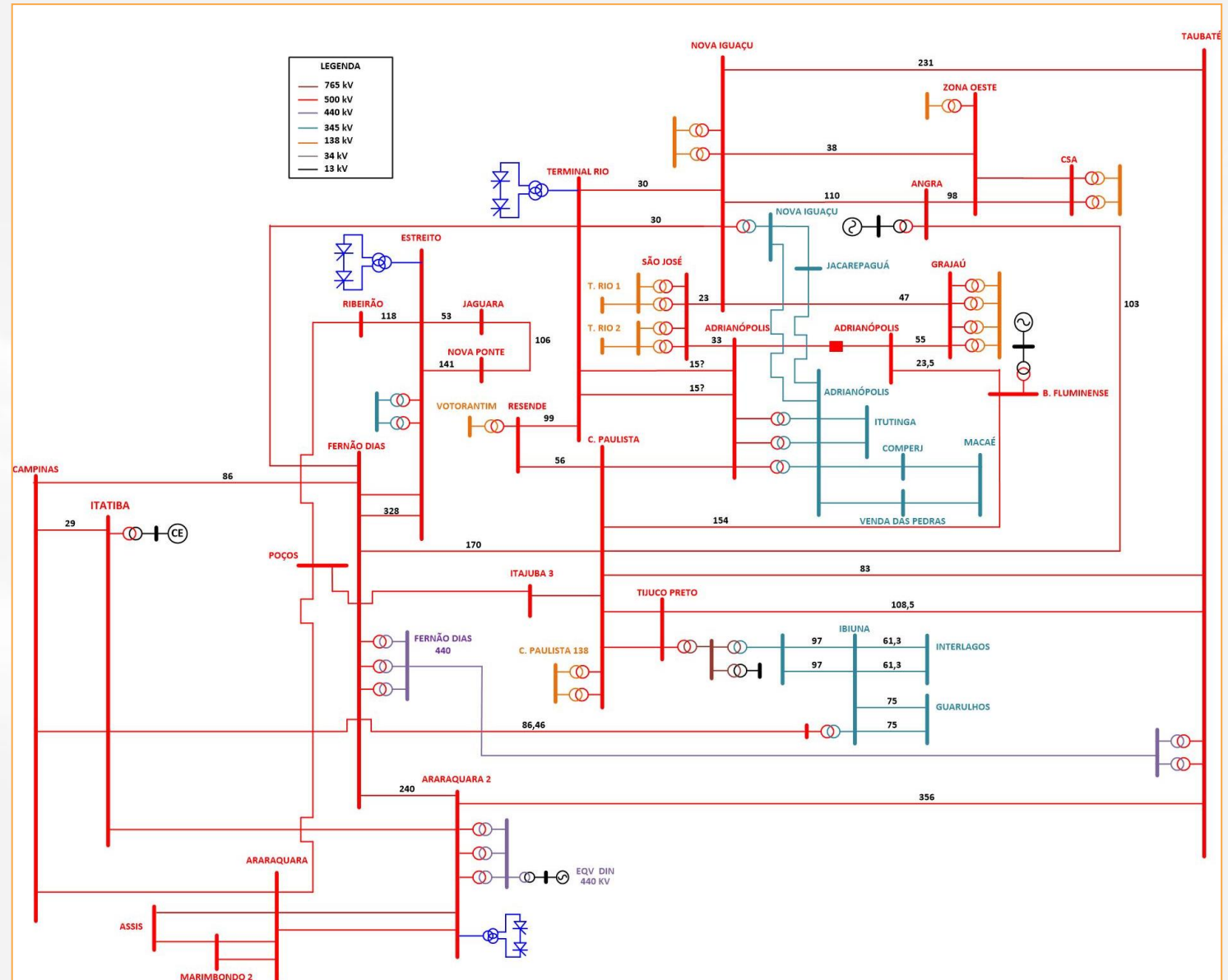
Modelagem de Equivalente de Rede – Xingu T. Rio

Rede da região norte.



Modelagem de Equivalente de Rede – Xingu Estreito

Rede da região sudeste.



Rede da região sudeste.



Xingu – Terminal Rio:

- ## Xingu - Estreito:

- [illegible]



Comparação dos Elementos das Redes

	Comparação: XG - ES x SI - GA			
	XG - ES	GA - SI	Diferença	Porcentagem
Barras	110	370	260	236%
Linhas	130	333	203	156%
Transformadores	60	171	111	185%
Geradores	20	47	27	135%
Estáticos	1	2	1	100%
Bipolos	5	7	2	40%

	Comparação: XG - TR x SI - GA			
	XG - TR	GA - SI	Diferença	Porcentagem
Barras	185	370	185	100%
Linhas	148	333	185	125%
Transformadores	75	171	96	128%
Geradores	33	47	14	42%
Estáticos	1	2	1	100%
Bipolos	4	7	3	75%

Desenvolvimento dos modelos de rede para a concepção do Bipolo Graça Aranha - Silvânia

■ Produto 01:

- Desenvolvimento e validação da rede estática.

■ Produto 02:

- Desenvolvimento e validação dos modelos dinâmicos de máquinas e compensadores estáticos de reativo;
- Inclusão dos modelos dinâmicos utilizando técnicas de inicialização no produto 01.

■ Produto 03:

- Inclusão dos modelos dos Bipolos utilizando técnicas de inicialização no produto 02;
- Comparação do produto 03 com ANATEM.



contato@jordaoenergia.com.br



+55 21 2413-5743 / 96777-5790



Av. Rio Branco, 120 - Grupo 830, Centro, Rio de Janeiro/RJ
CEP 20.040-001



www.jordaoenergia.com.br

Produto 01

Desenvolvimento de
equivalentes estáticos da rede
elétrica, em PSCAD.

PSCAD – Transitórios Eletromagnéticos

As dificuldades para a construção de um equivalente de rede.

Vantagens

Representação trifásica da rede.

Simulação de alta e baixa frequência, incluindo a consideração de harmônicos.

Modelo detalhado dos elos de corrente contínua.

Simulação e identificação precisa de falhas de comutação.



Desafios

Necessidade de modelagem de um equivalente de rede.

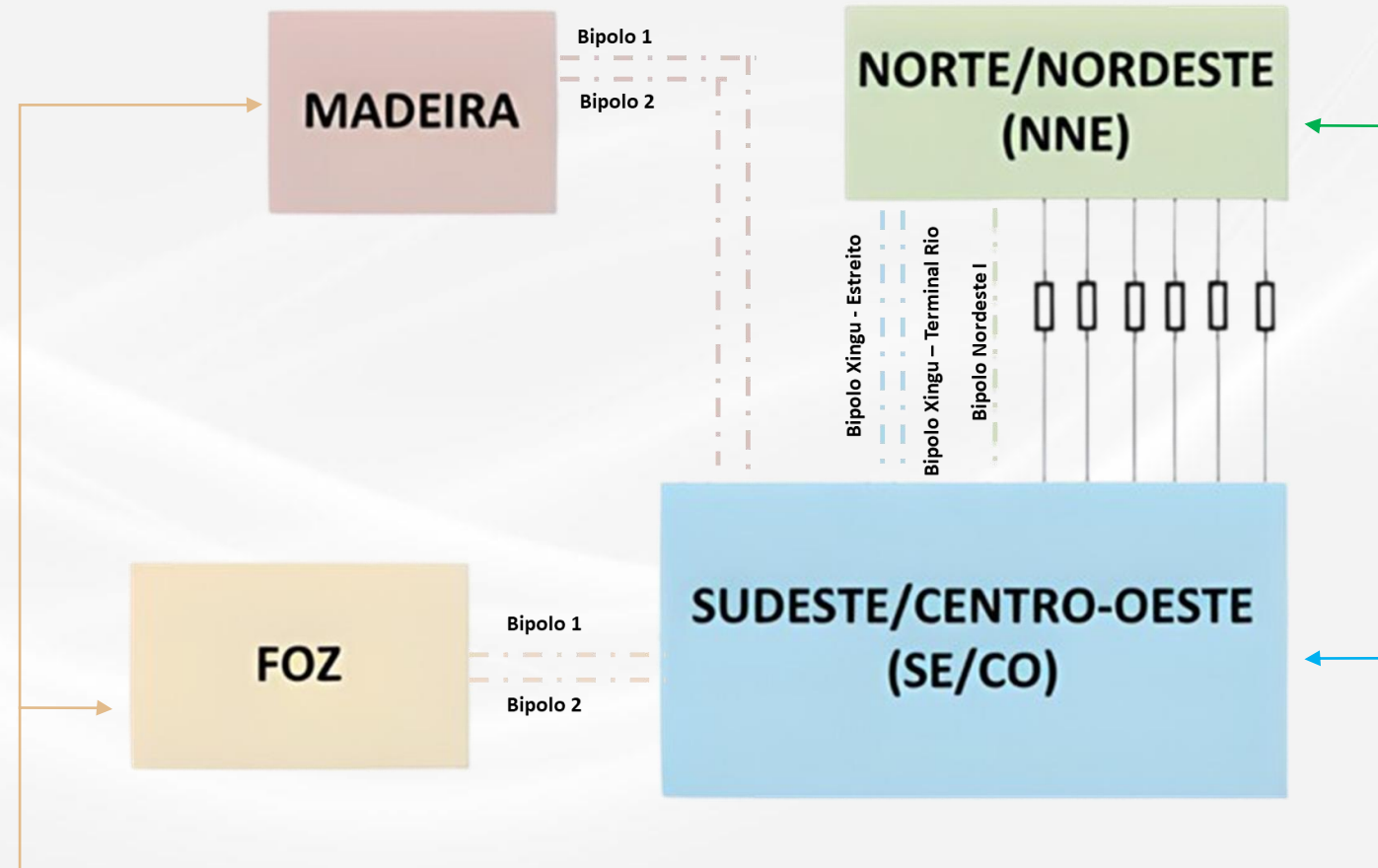
Esforço significativo envolvido na elaboração do equivalente de rede.

Desafios na inicialização do equivalente.

Tempo de simulação prolongado.

Objetivo

- Desenvolver equivalentes estáticos.
- As barras zero são os pontos de conexão dos elos CCAT (retificadores e inversoras).



Na rede retida Norte/Nordeste (NNE), estão contempladas as modelagens das subestações retificadoras de Xingu e Graça Aranha e suas vizinhanças.

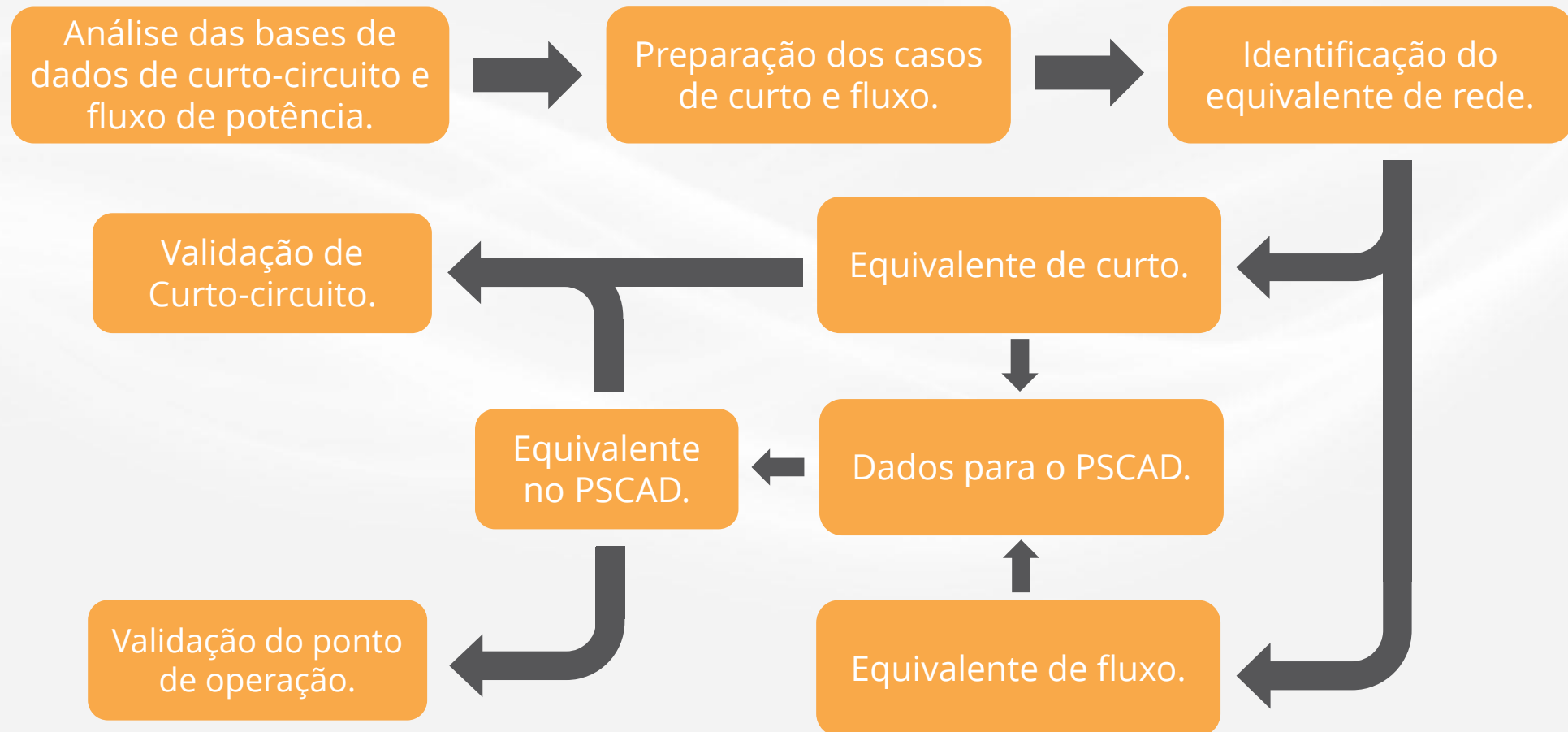
As retificadoras dos elos do Madeira e de Itaipu foram representadas em redes separadas, por estarem eletricamente distantes entre si e das demais subestações conversoras.

Na rede retida Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), estão modeladas as inversoras das subestações de Estreito, Terminal Rio, Araraquara, Ibiúna e Silvânia, e suas vizinhanças.

Equivalentes de Rede Estáticos – Produto 1

Processo para construção da rede equivalente.

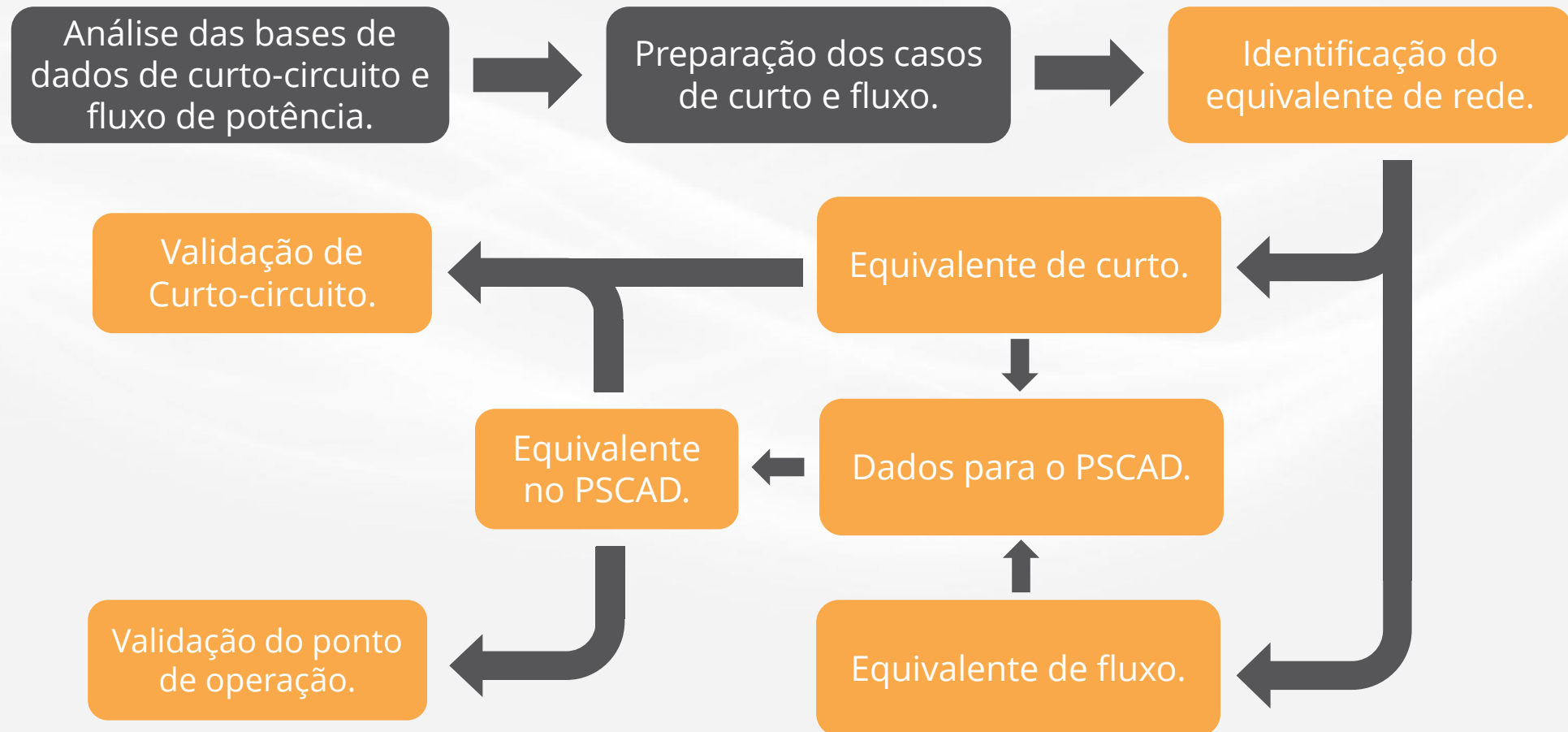
- 5 Etapas realizadas.



Equivalentes de Rede Estáticos – Produto 1

Processo para construção da rede equivalente.

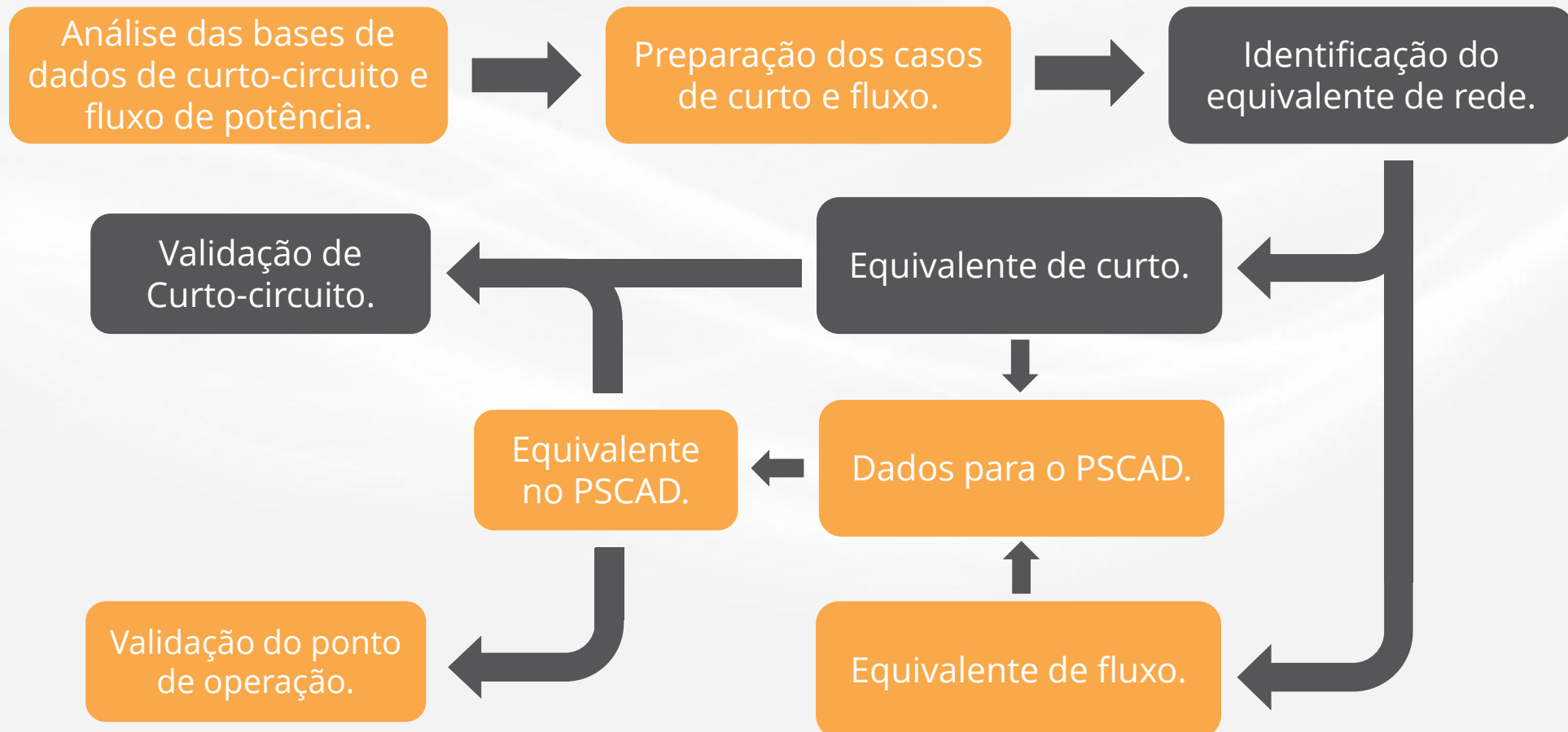
- **1ª etapa:** Análises e ajustes nas bases de dados.



Equivalentes de Rede Estáticos – Produto 1

Processo para construção da rede equivalente.

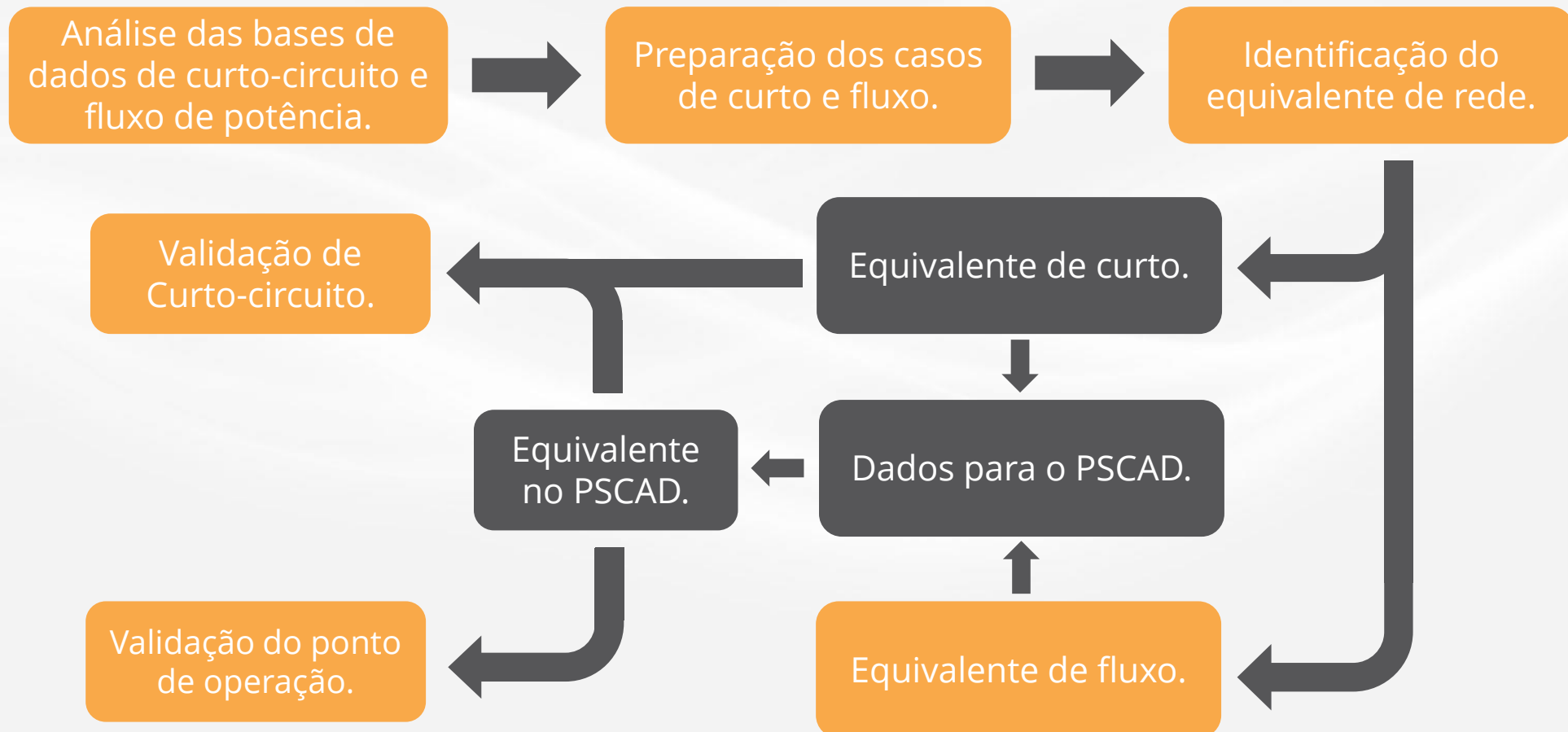
- **2ª etapa:** Equivalente no ANAFAS.



Equivalentes de Rede Estáticos – Produto 1

Processo para construção da rede equivalente.

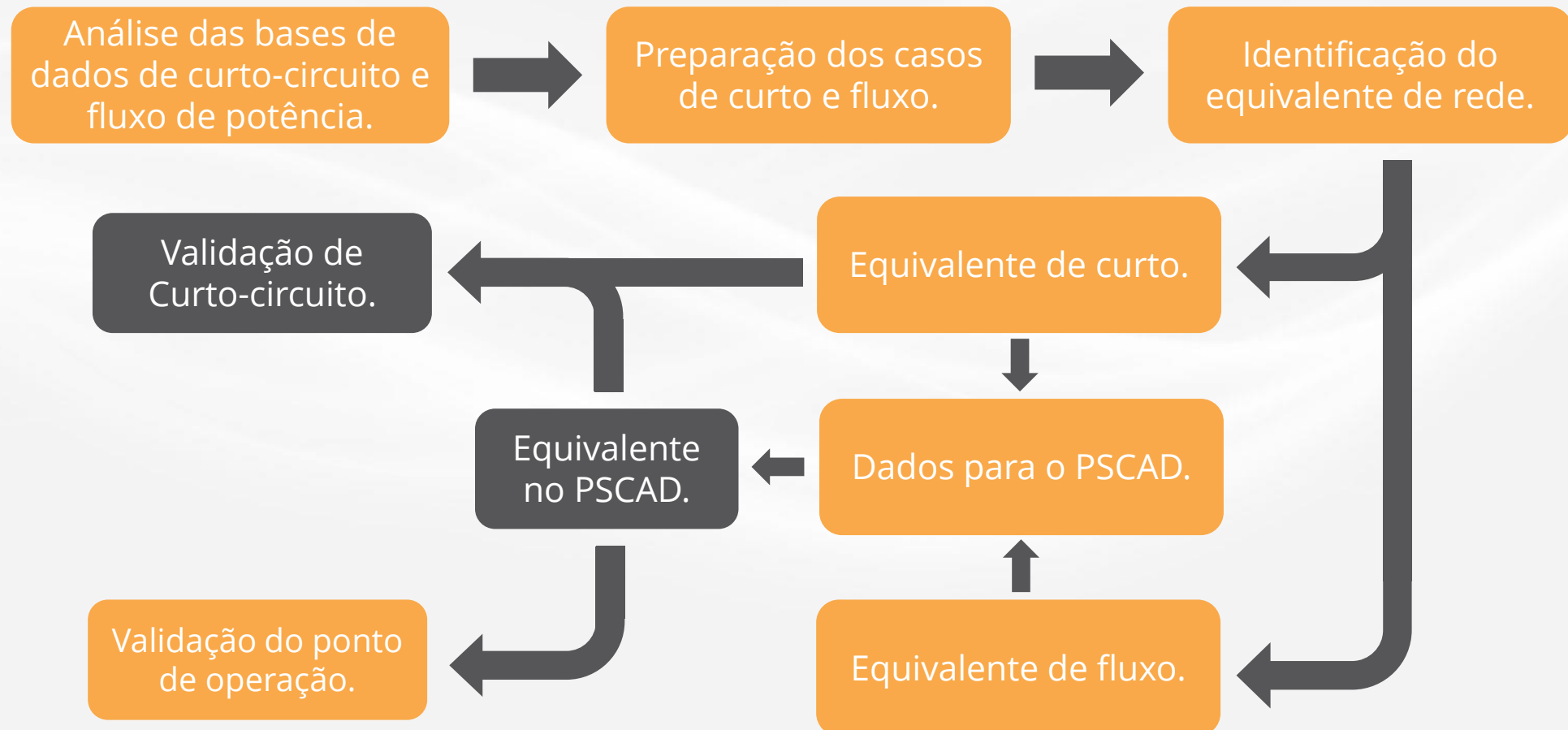
- **3ª etapa:** Modelagem dos equivalentes no PSCAD.



Equivalentes de Rede Estáticos – Produto 1

Processo para construção da rede equivalente.

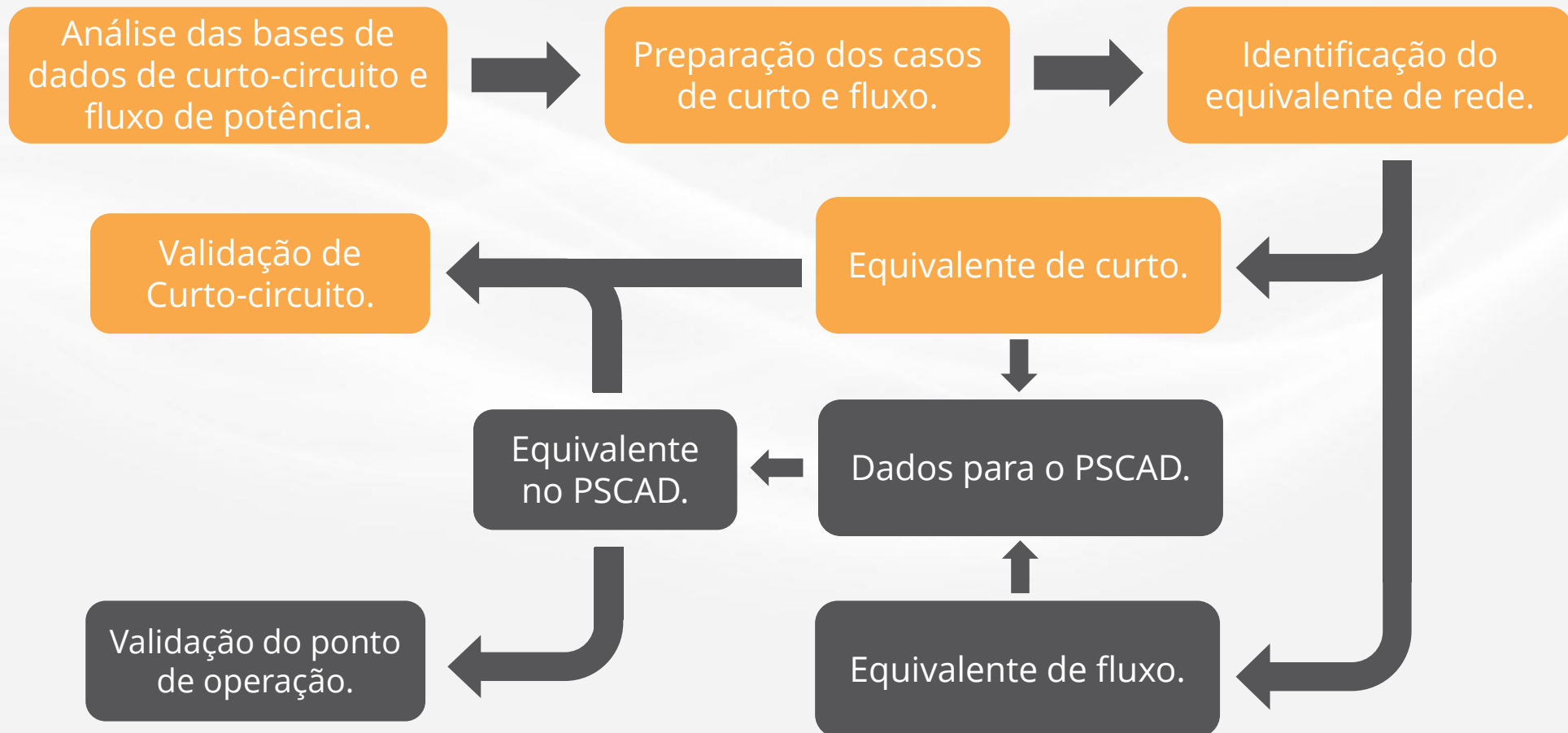
- **4ª etapa:** Validação de curto-circuito – PSCAD x ANAFAS completo.



Equivalentes de Rede Estáticos – Produto 1

Processo para construção da rede equivalente.

- **5ª etapa:** Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes.



1ª etapa: Análises e ajustes nas bases de dados

Análise das bases de dados de curto-circuito e fluxo de potência.

Preparação dos casos de curto e fluxo.

Identificação do equivalente de rede.

Validação de Curto-circuito.

Equivalente de curto.

Equivalente no PSCAD.

Dados para o PSCAD.

Validação do ponto de operação.

Equivalente de fluxo.

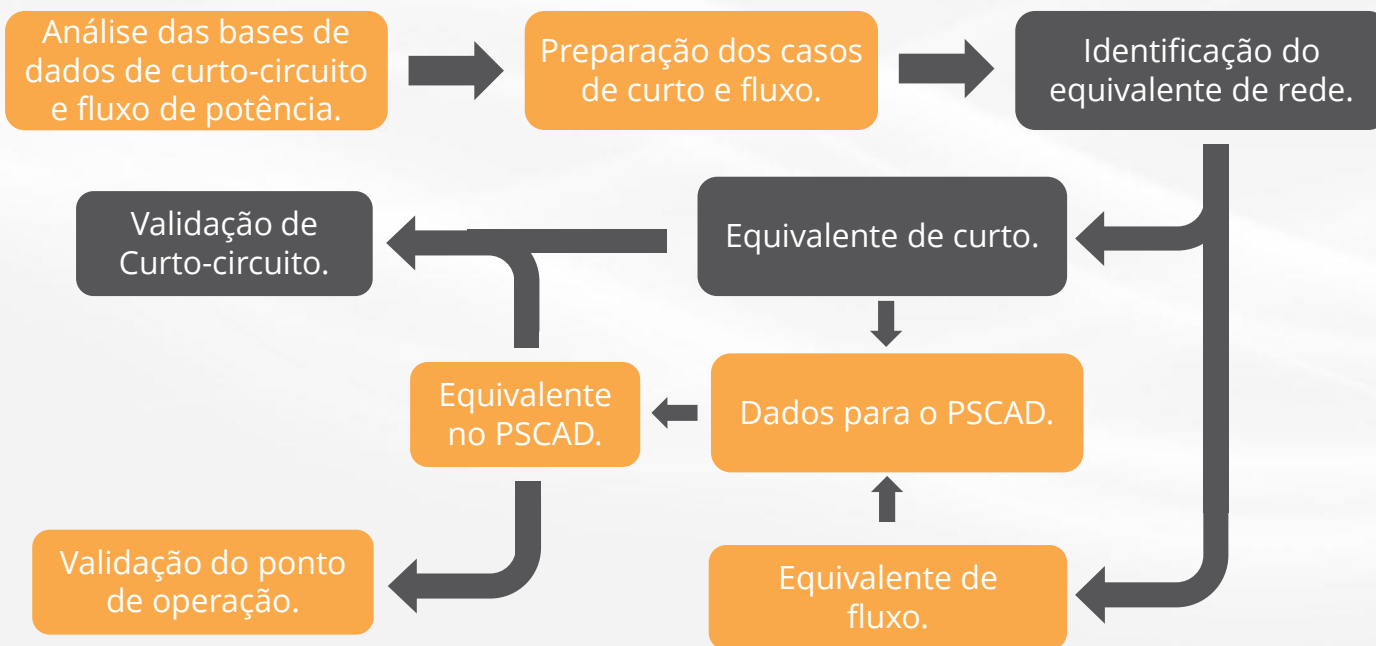
1ª etapa: Análises e ajustes nas bases de dados

Análises das bases de dados de fluxo de potência e curto-circuito:

- Obtenção de dados confiáveis no Sistema de Análise e Gerenciamento de Instalações de Transmissão (SAGIT):
 - 80 linhas de transmissão;
 - 40 transformadores.
- Utilização de dados típicos quando necessário.



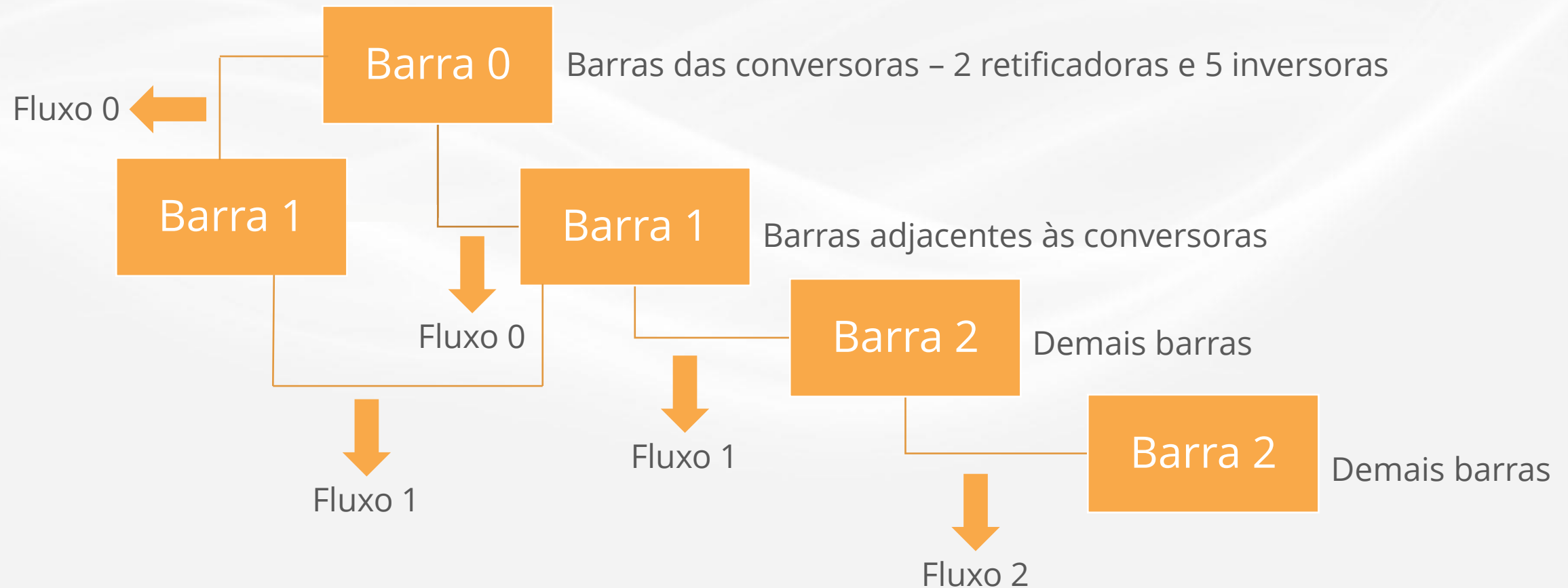
2ª etapa: Equivalente no ANAFAS



2ª etapa: Equivalente no ANAFAS

Identificação da rede retida:

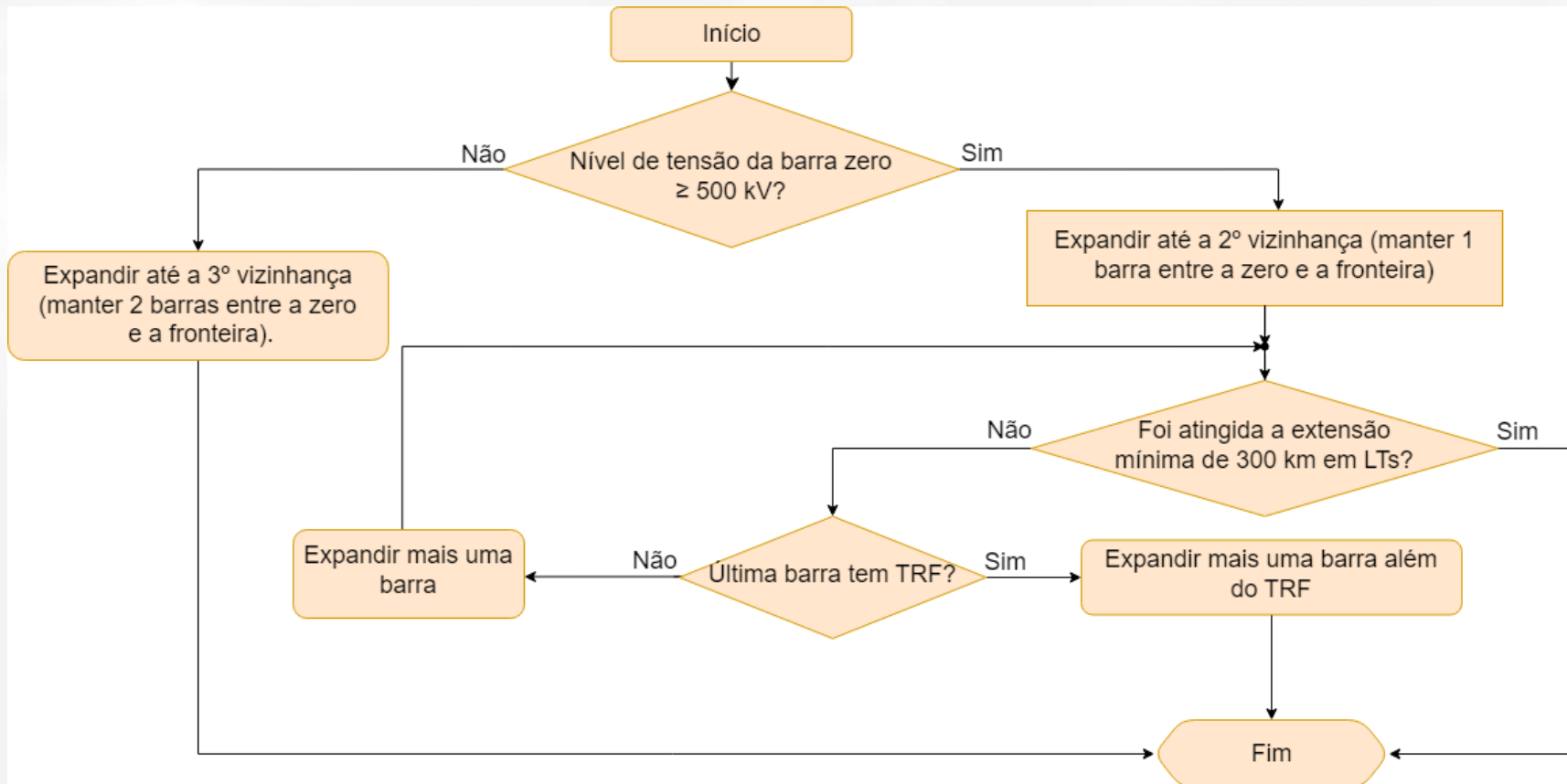
- Vizinhanças para barras e fluxo de potência.



2ª etapa: Equivalente no ANAFAS

Identificação da rede retida:

- Definição dos elementos que deveriam fundamentalmente constar nas redes retidas, pela EPE;
- Expansão da rede retida para identificação de barras de fronteira.



2ª etapa: Equivalente no ANAFAS

Termo de referência do projeto:

- Erros admissíveis.
 - Ponto de operação: 

Vizinhança	Erro (%)
0	5
1	8
2	10
 - Tensão e fluxo de potência;
 - Valores referenciais, podendo ser flexibilizados.
- Curto-circuito: 

Vizinhança	Erro (%)
0	8
1	10
2	20
- Valores máximos admissíveis.

Vizinhança	Erro (%)
0	5
1	8
2	10

Vizinhança	Erro (%)
0	8
1	10
2	20

2ª etapa: Equivalente no ANAFAS

Cálculo dos equivalentes no ANAFAS:

- Corte de equivalentes série.
- Erro de curto-circuito x Número de equivalentes série;
- Corte de equivalentes série com impedância acima de 30%.

Cálculo de Equivalentes

Opções de Execução

☐ Especificar Erro Máximo Por Barra: % Avançado

☒ Não criar circuitos equivalentes série com impedância maior que: %

2ª etapa: Equivalente no ANAFAS

Validação de curto-circuito - ANAFAS Equivalente x ANAFAS Completo.

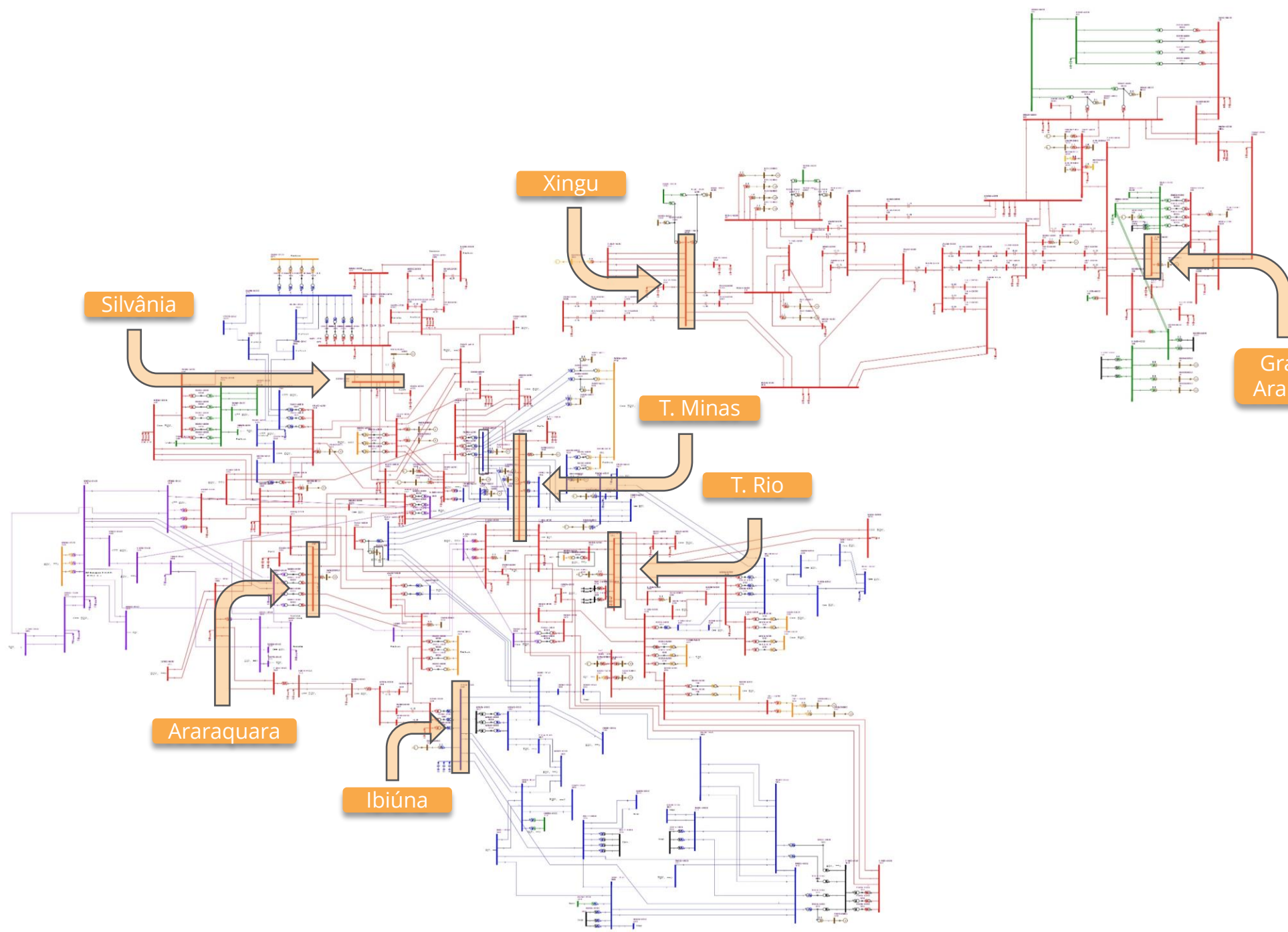
Subestação			ANAFAS completo (MVA)		ANAFAS Equivalente (MVA)		Erro (%)	
Vizinhança	Nome barra	Tensão (kV)	CC 3f	CC 1f	CC 3f	CC 1f	CC 3f	CC 1f
0	ARARA2-SP500	500	31401.41	27406.24	31125.48	27045.42	0.88	1.32
0	TRIODC-RJ500	500	29457.82	27070.61	29069.58	26844.51	1.32	0.84
0	G.ARAN-MA500	500	16460.87	16020.24	16287.49	15904.89	1.05	0.72
0	ESTREI-MG500	500	29503.42	23305.13	29215.73	23175.74	0.98	0.56
0	SILVAN-GO500	500	21287.8	20019.71	21171.69	19924.4	0.55	0.48
0	IBIUNA-SP345	345	24609.09	24287.46	24439.23	24172.36	0.69	0.47
0	XINGU--PA500	500	33580.98	31563.14	33555.48	31547.68	0.08	0.05

Vizinhança	Erro (%)
0	8

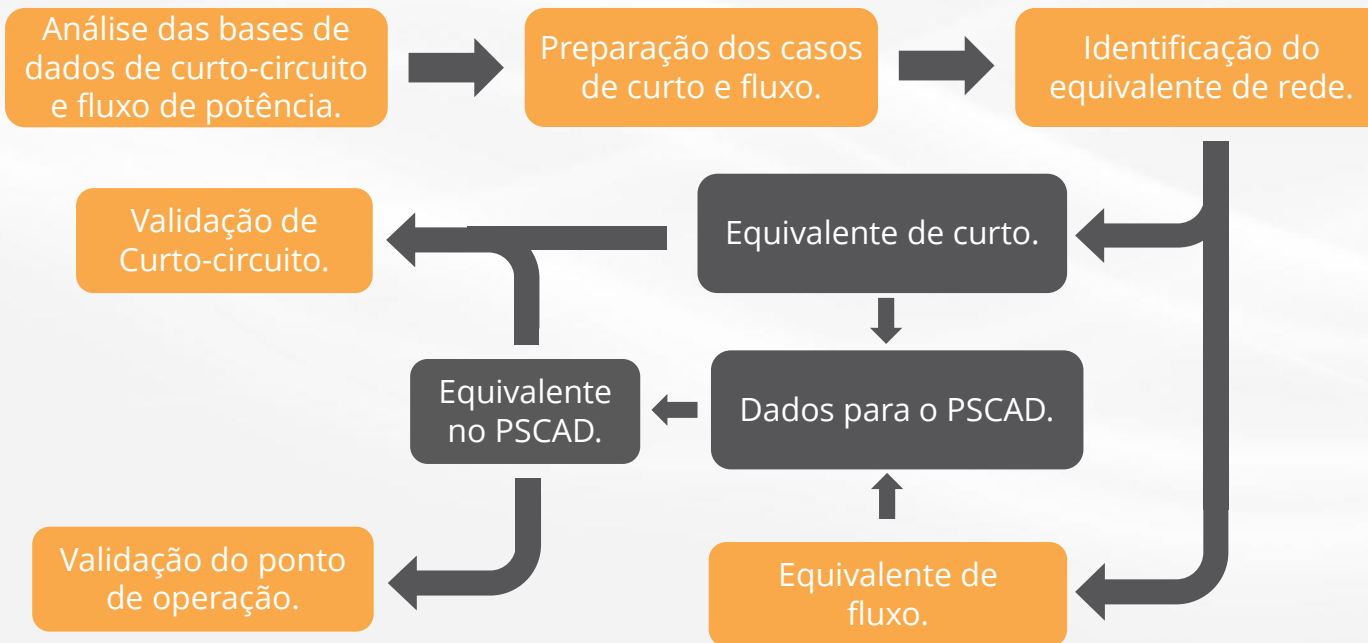
2ª etapa: Equivalente no ANAFAS

Composição dos equivalentes:

- 370 barras (7 barras 0, 40 barras 1 e 323 barras 2);
- 333 linhas de transmissão;
- 171 transformadores;
- 47 geradores;
- 106 equivalentes próprios; e
- 7 Bipolos (6 existentes e 1 planejado).



3º etapa: Modelagem dos equivalentes no PSCAD



3ª etapa: Modelagem dos equivalentes no PSCAD

- Conversão dos dados.



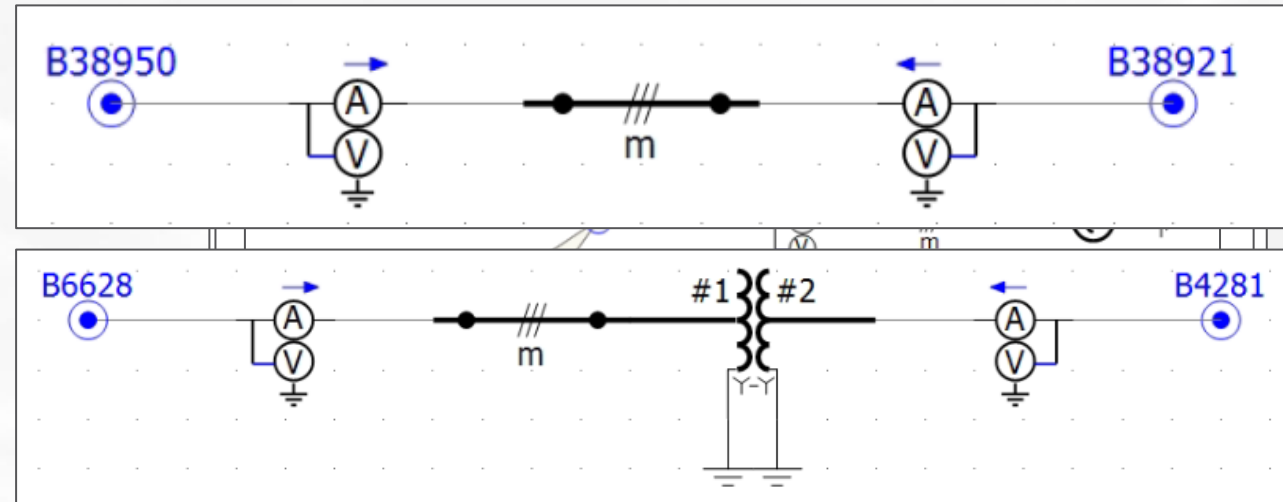
- Inserção dos dados no PSCAD:
 - Criar os componentes;
 - Parametrizar os componentes;
 - Alocar os componentes.



3ª etapa: Modelagem dos equivalentes no PSCAD

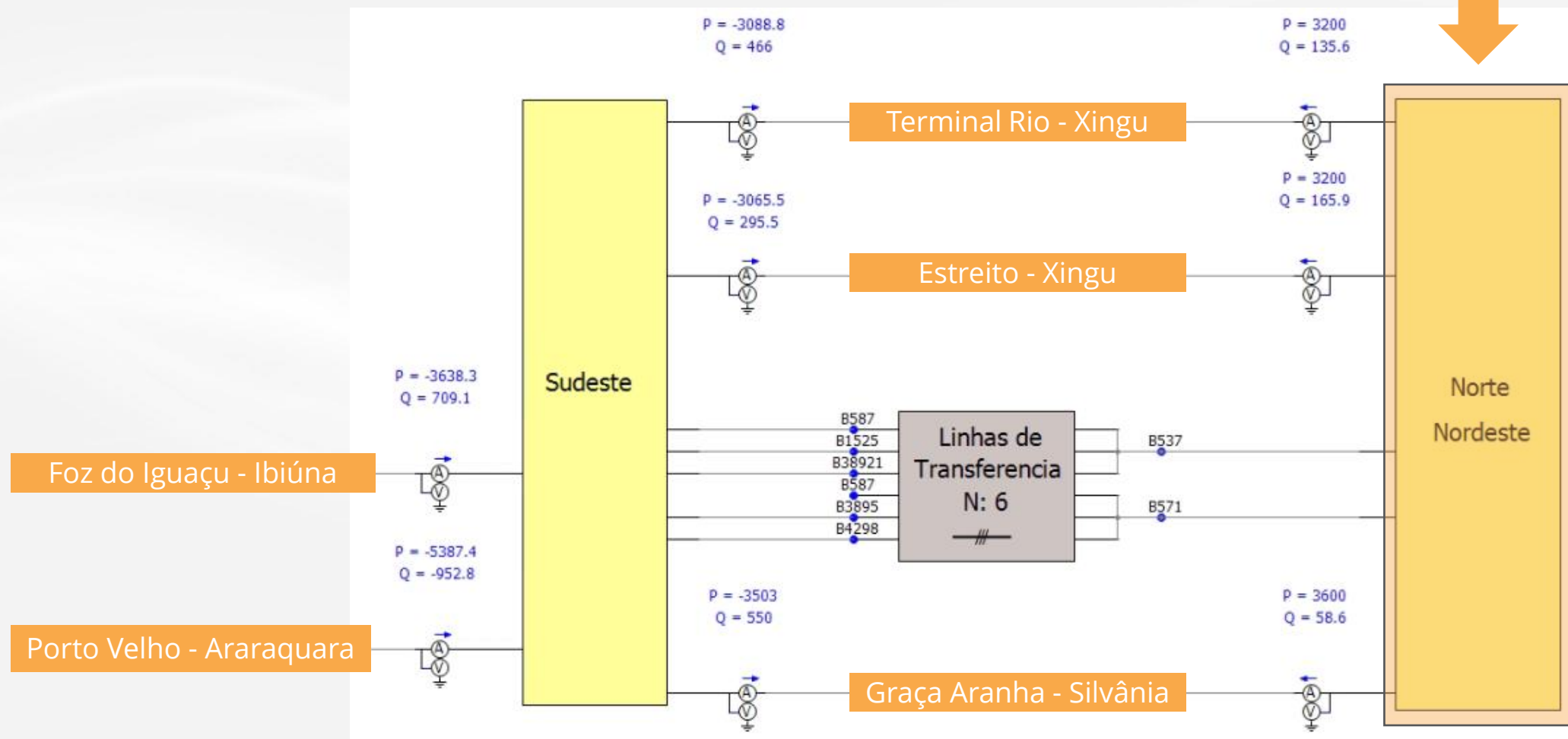
Elementos modelados:

- Máquinas síncronas (geradores e compensadores);
- Transformadores;
- Linhas de transmissão (curtas < 20 km);
- Shunts de linha e de barra;
- Capacitores série;
- Elos CC;
- Compensadores estáticos;
- Equivalentes próprios;
- Elementos de transferência (linhas e transformadores).



3ª etapa: Modelagem dos equivalentes no PSCAD

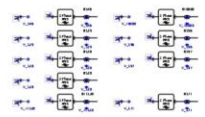
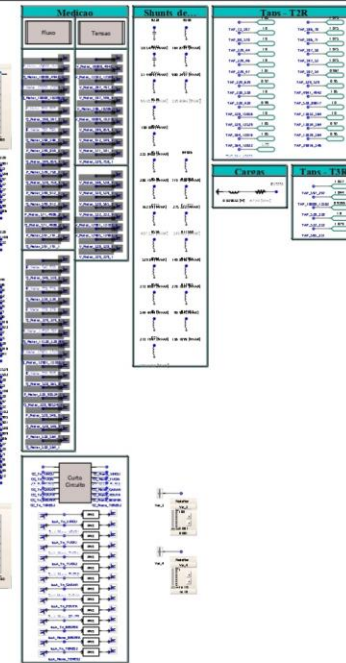
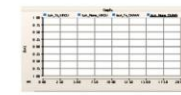
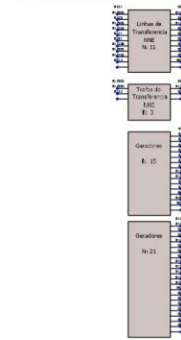
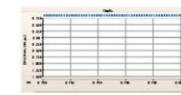
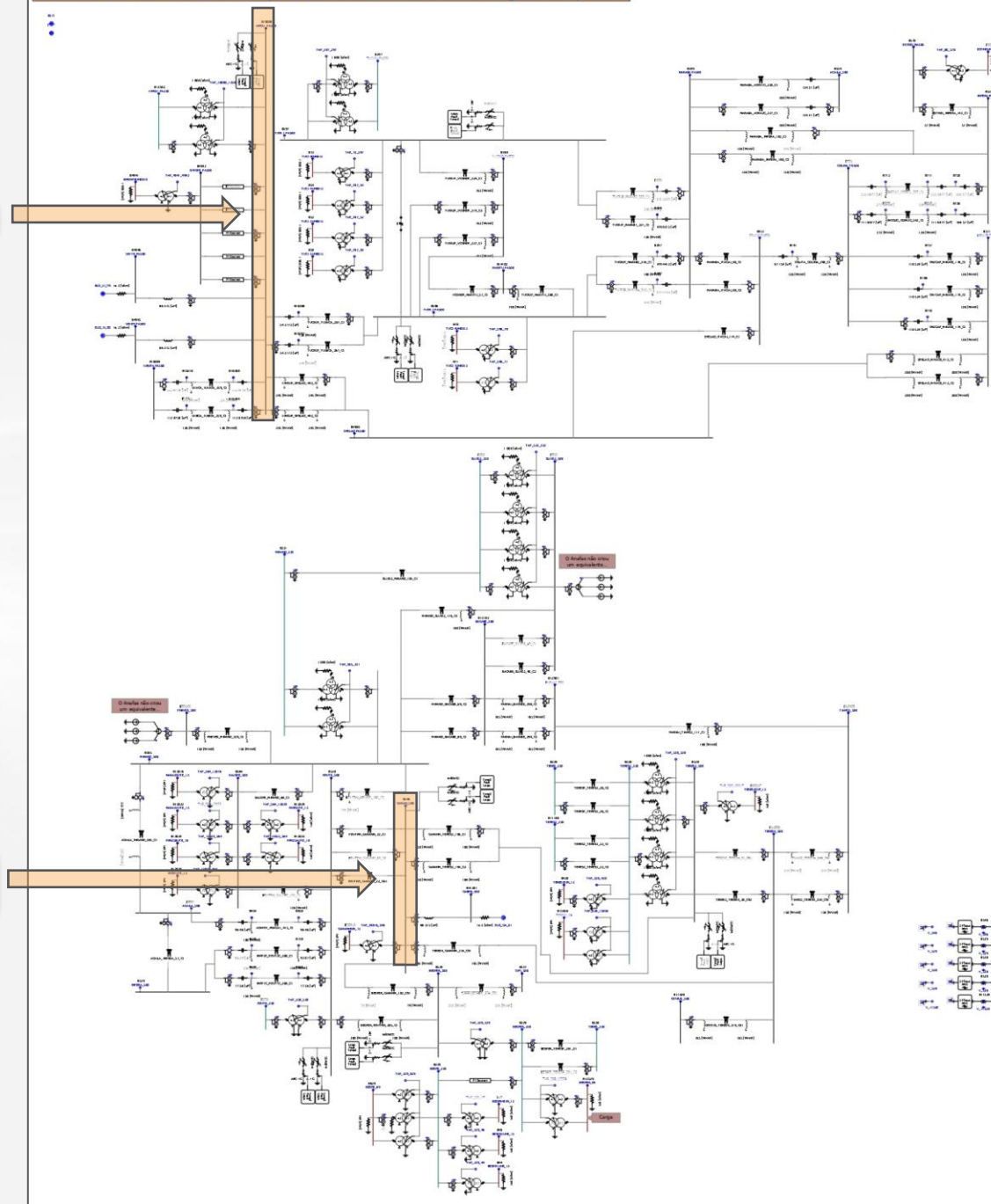
Rede no PSCAD:



Norte Nordeste | Rede Estatica Equiv. |...

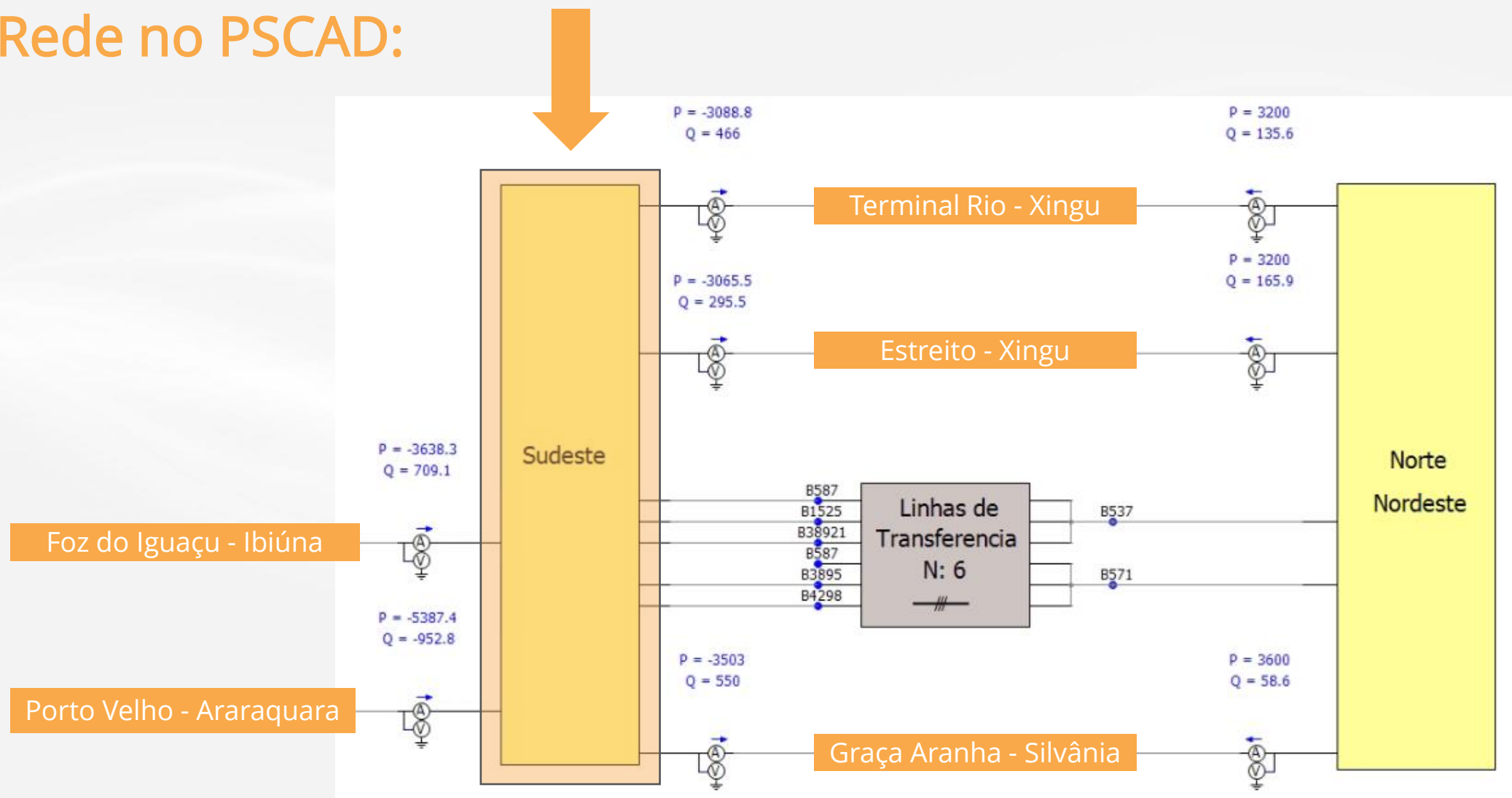
Xingu

Graça
Aranha



3ª etapa: Modelagem dos equivalentes no PSCAD

Rede no PSCAD:



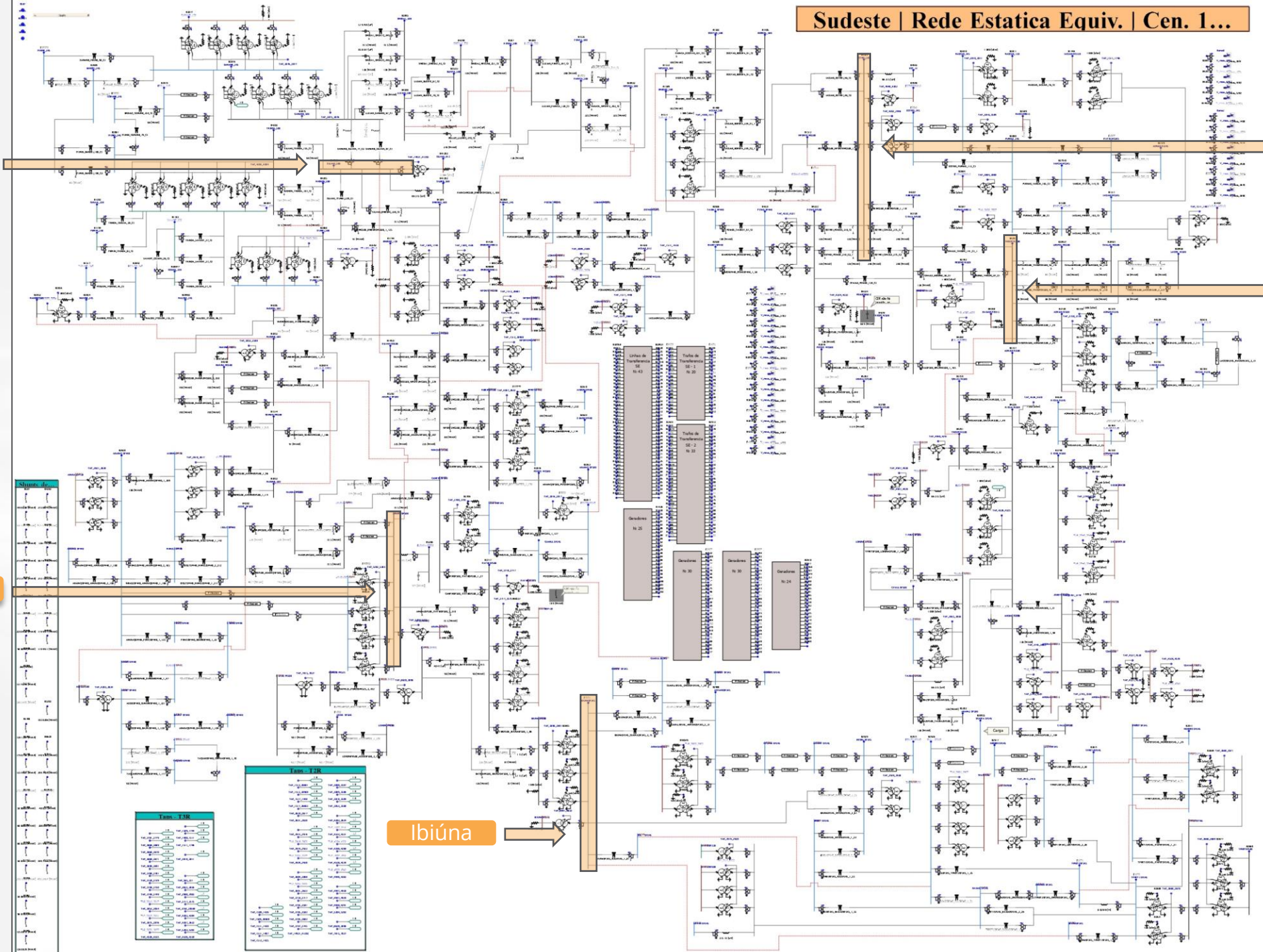
Silvânia

T. Minas

T. Rio

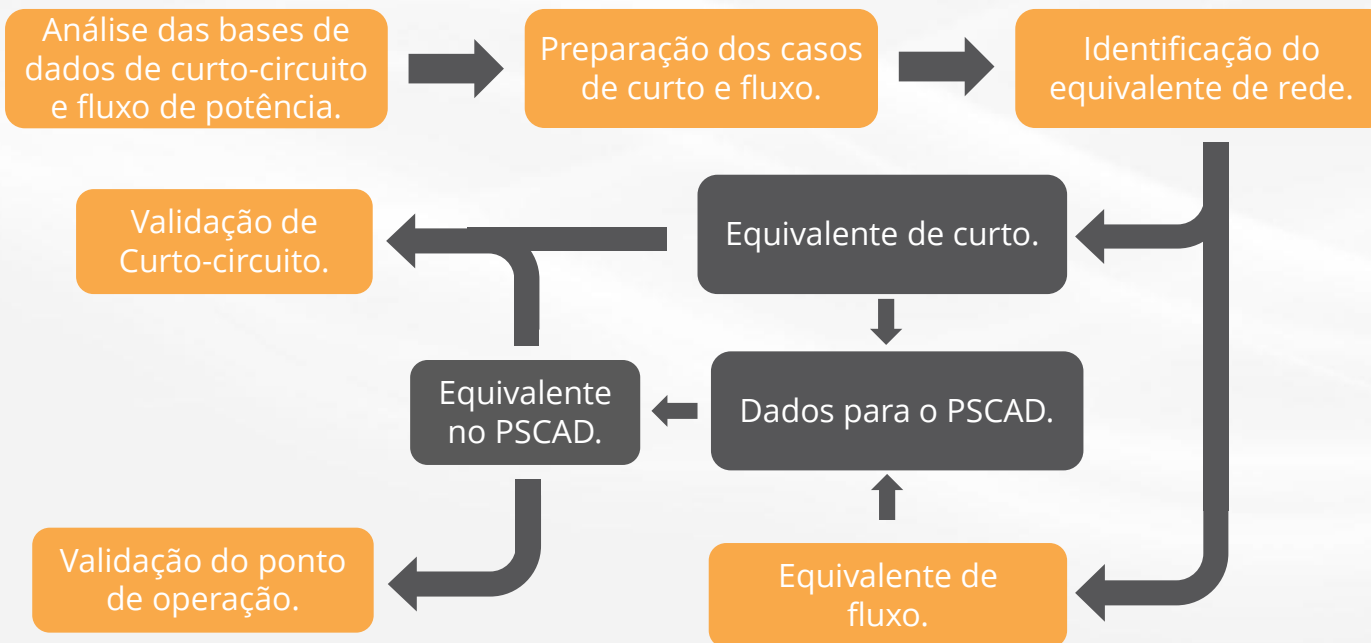
Araraquara

Ibiúna



4ª etapa: Validação de curto PSCAD

X ANAFAS Completo



4ª etapa: Validação de curto-circuito PSCAD x ANAFAS - Completo

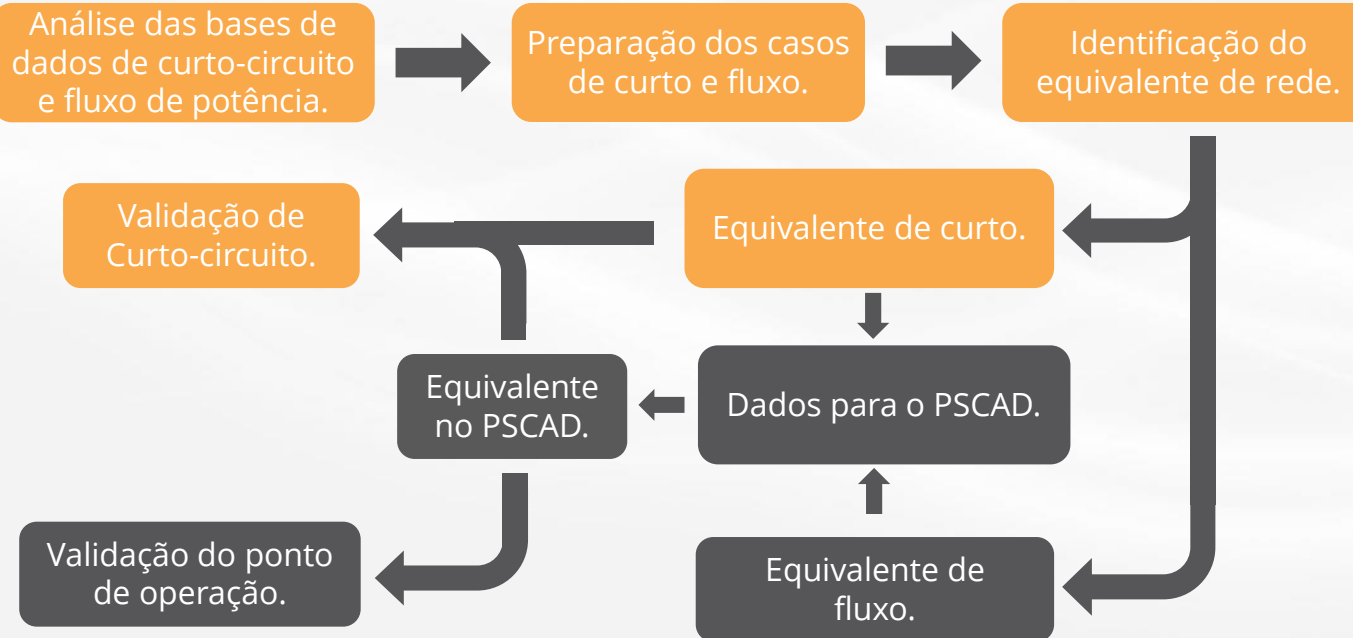
Subestação			ANAFAS completo (kA)		PSCAD (kA)		Erro (%)	
Vizinhança	Nome barra	Tensão (kV)	CC 3f	CC 1f	CC 3f	CC 1f	CC 3f	CC 1f
0	G.ARAN-MA500	500	19.52	17.98	19.02	18.83	2.5%	4.7%
0	XINGU--PA500	500	25.86	22.83	25.59	24.23	1.1%	6.2%
0	ARARA2-SP500	500	38.42	31.28	36.80	32.67	4.2%	4.4%
0	TRIODC-RJ500	500	49.35	45.18	48.90	46.61	0.9%	3.2%
0	ESTREI-MG500	500	35.98	32.48	35.06	33.13	2.6%	2.0%
0	SILVAN-GO500	500	42.5	40.66	41.22	41.40	3.0%	1.8%
0	IBIUNA-SP345	345	33.88	29.45	31.46	29.44	7.1%	0.0%

Subestação			ANAFAS completo (kA)		PSCAD (kA)		Erro (%)	
Vizinhança	Nome barra	Tensão (kV)	CC 3f	CC 1f	CC 3f	CC 1f	CC 3f	CC 1f
1	BATEIA-PR525	500	32.47	29.82	30.42	28.25	6.3%	5.3%
1	BESPER-MA500	500	10.01	7.63	10.23	7.87	2.2%	3.1%
1	P.DUTR-MA500	500	20.49	18.27	19.78	18.59	3.5%	1.8%
1	LEOPOL-MG500	500	12.35	7.31	12.33	6.96	0.1%	4.7%
1	SPELAD-PA500	500	18.66	12.04	18.86	11.31	1.1%	6.0%
1	N.IGUA-RJ500	500	31.91	27.72	30.16	27.32	5.5%	1.4%
1	ADRIAN-RJ500	345	29.02	25.05	27.57	24.89	5.0%	0.6%

Vizinhança	Erro (%)
0	8

Vizinhança	Erro (%)
1	10

5ª etapa: Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes



5ª etapa: Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes

Validação de fluxo de potência:

- Erro absoluto x Erro relativo;
- Sensibilidade do erro relativo à grandezas pequenas.

$$\text{Erro relativo} = \frac{20 \text{ MW} - 18 \text{ MW}}{18 \text{ MW}} \times 100 \approx 11\%;$$

$$\text{Erro absoluto} = 20 \text{ MW} - 18 \text{ MW} = 2 \text{ MW}.$$

Vizinhança	Erro (%)
0	5
1	8
2	10

- Filtro utilizado nas medições de potência:
 - Módulo do erro absoluto menor ou igual a 5; e
 - Módulo do erro relativo maior ou igual a 10%.

5ª etapa: Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes

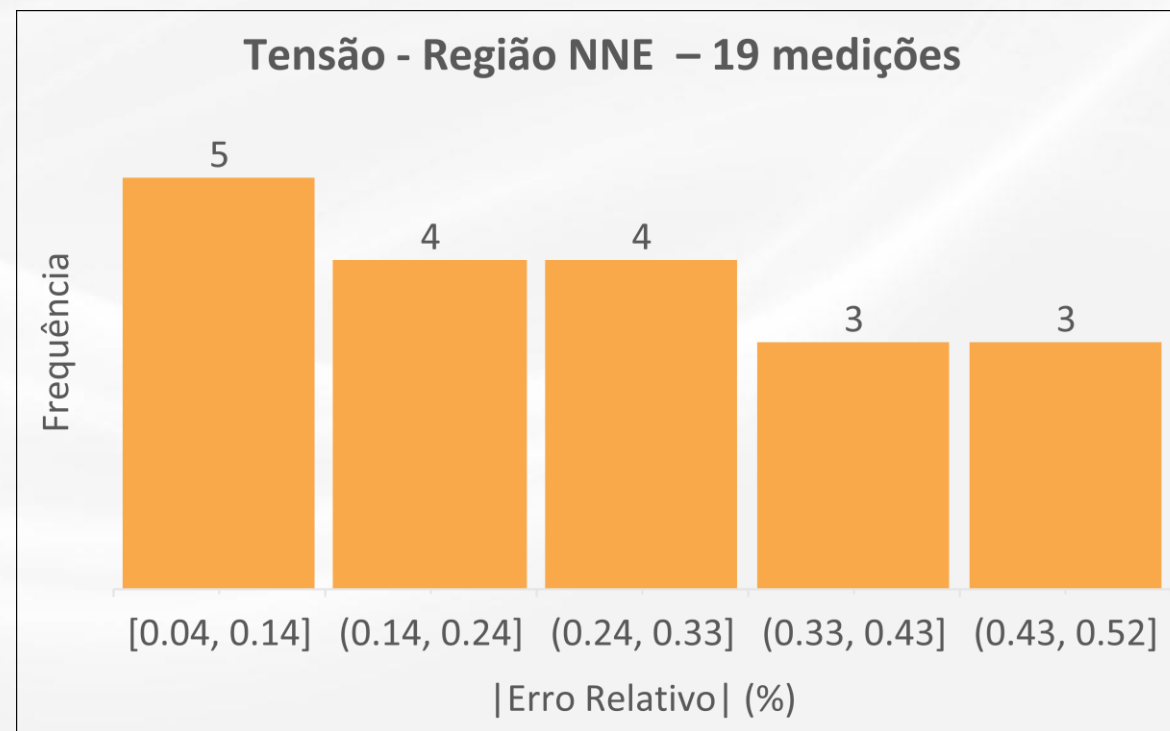
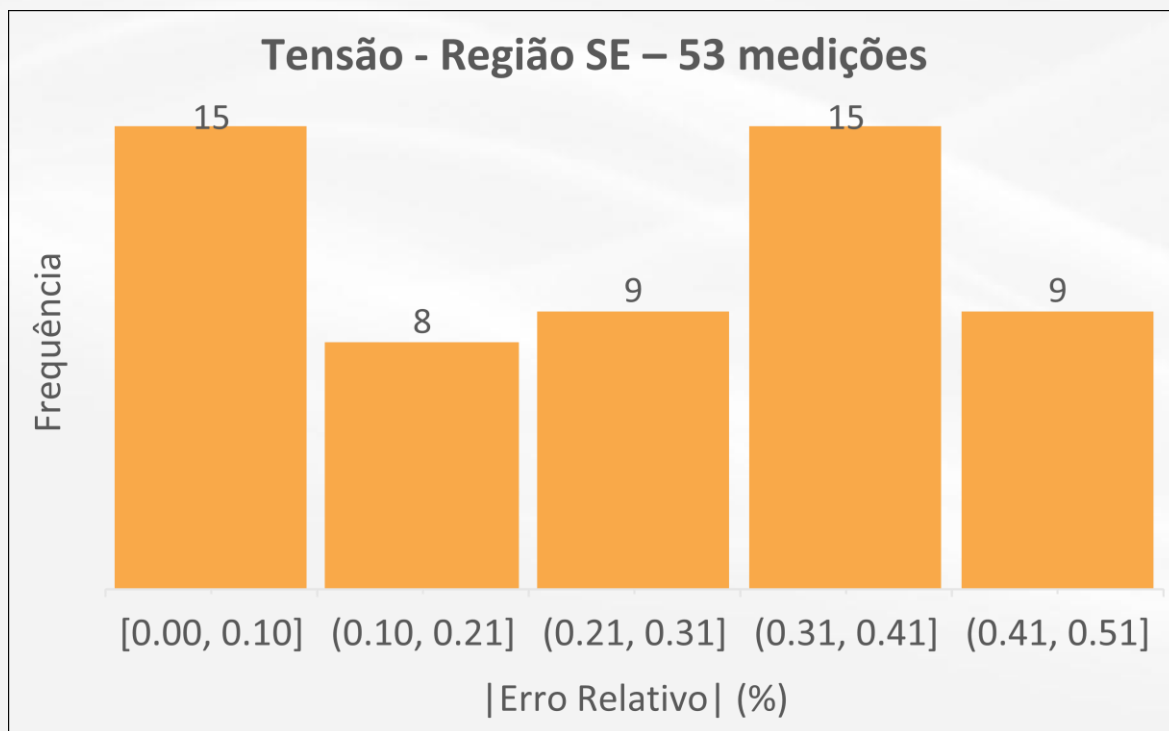
Aplicação do filtro:

Potência Ativa									
	Barra De	Barra Para	Circuito	P (MW) PSCAD	P (MW) ANAREDE	Erro abs (MW)	Erro (%)	Erro (%)	Erro (%) com filtro
1	10008	4942	1	-1318.22	-1316.18	2.04	-0.16	0.15	0.15
2	10008	10209	1	387.69	387.53	-0.16	-0.04	0.04	0.04
3	598	597	1	Erro absoluto < 5		-0.45	Erro relativo > 10		
4	598	596	1			-0.31			
5	599	859	1	103.83	102.82	-1.01	0.98	0.98	0.98
6	539	758	1	61.99	63.47	1.48	2.33	2.33	2.33
7	599	912	1	453.84	453.59	-0.25	0.05	0.05	0.05
8	571	4986	2	-18.22	-21.59	-3.37	15.61	15.61	15.61
9	591	191	1	-81.23	-82.39	-1.16	1.41	1.41	1.41
10	546	538	1	-499.01	-498.02	0.99	-0.20	0.20	0.20
11	559	539	1	48.01	48.65	0.64	1.32	1.32	1.32
12	329	229	1	-100.55	-100.15	0.40	-0.40	0.40	0.40
13	11528	528	91	638.56	628.90	-9.66	-1.54	1.54	1.54
14	12901	13103	1	468.91	469.93	1.02	0.22	0.22	0.22
15	538	565	2	-333.75	-331.81	1.94	-0.58	0.58	0.58
16	328	90524	1	-46.68	-46.60	0.08	-0.17	0.17	0.17
17	528	546	1	529.67	529.36	-0.31	-0.06	0.06	0.06
18	538	564	1	-365.13	-363.34	1.79	-0.49	0.49	0.49

5ª etapa: Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes

Validação do ponto de operação - ANAREDE Completo x PSCAD:

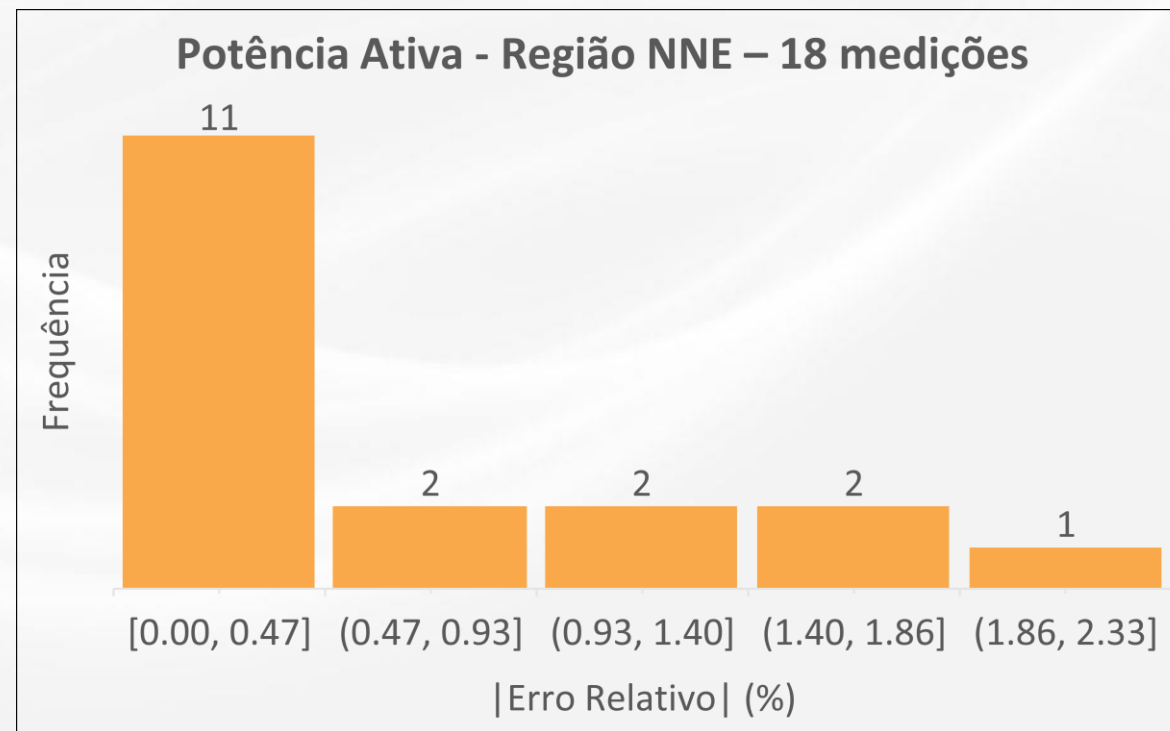
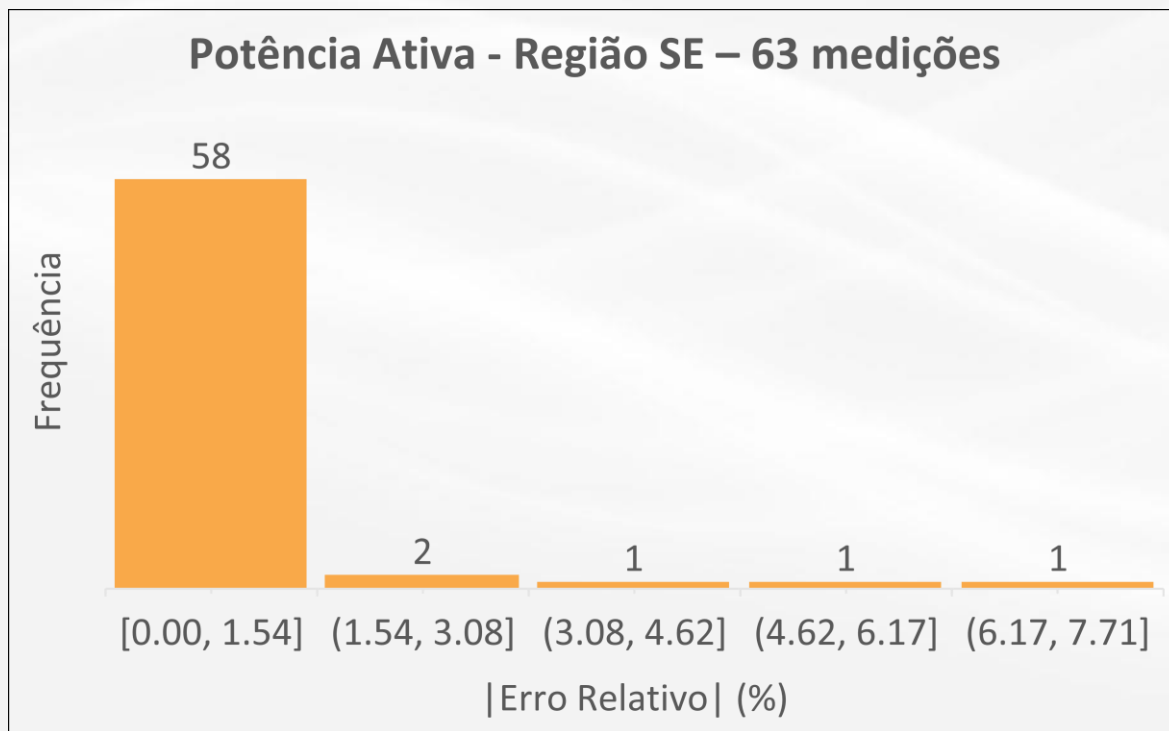
Vizinhança	Erro (%)
0	5
1	8
2	10



5ª etapa: Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes

Validação do ponto de operação - ANAREDE Completo x PSCAD:

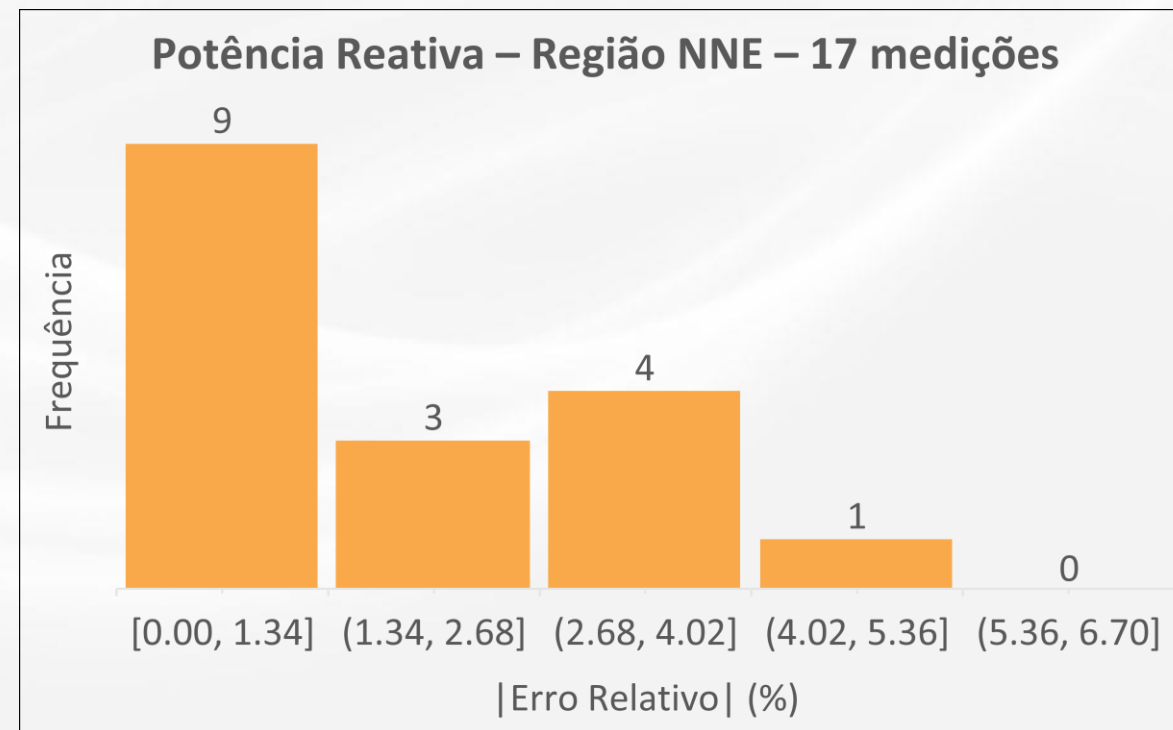
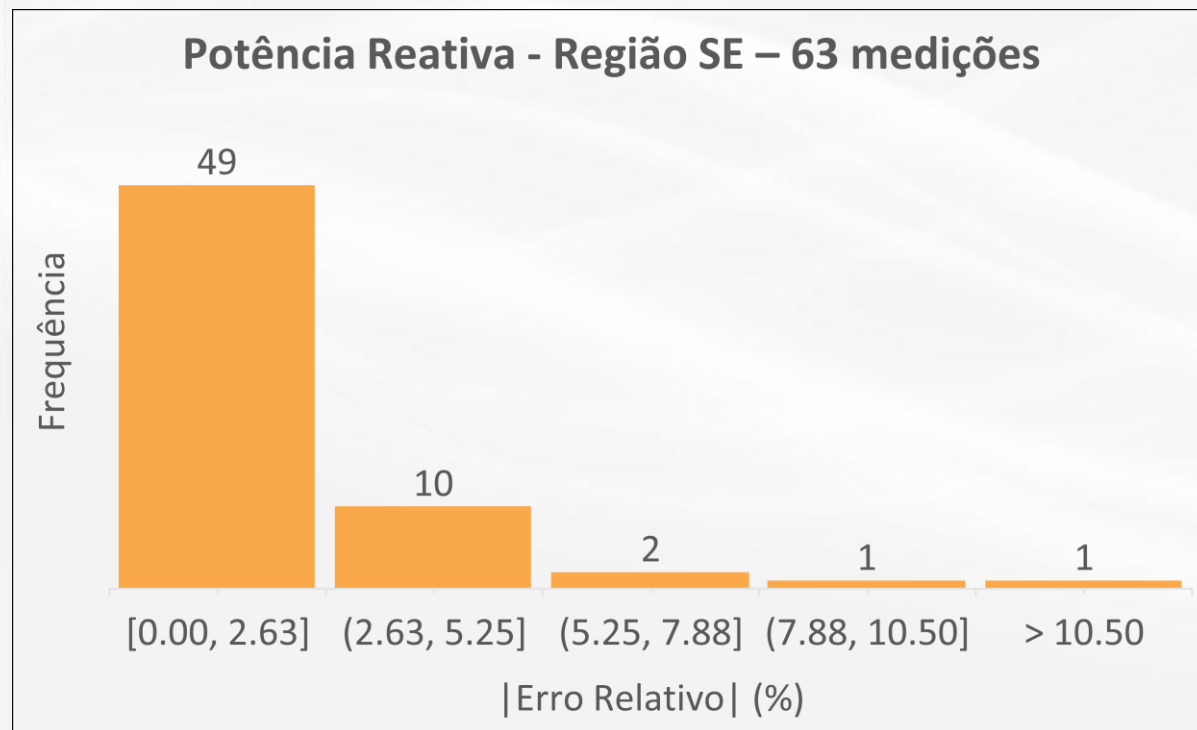
Vizinhança	Erro (%)
0	5
1	8
2	10



5ª etapa: Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes

Validação do ponto de operação - ANAREDE Completo x PSCAD:

Vizinhança	Erro (%)
0	5
1	8
2	10



5ª etapa: Ajuste e validação do ponto de operação dos equivalentes

Validação do ponto de operação - ANAREDE Completo x PSCAD:

Potência Reativa									
	Barra De	Barra PARA	Circuito	Q (MVar) PSCAD	Q (MVar) ANAREDE	Erro abs (MVar)	Erro (%)	Erro (%)	Erro (%) com filtro
1	3782	4291	1	0.23	-0.11	-0.34	307.82	307.82	
2	3853	3860	1	-1.18	-0.63	0.55	-87.32	87.32	
3	3946	4302	2	20	14.82	-5.18	-34.98	34.98	34.98
4	3807	27910	1	-12.45	-16.22	-3.77	23.25	23.25	
5	3810	3946	1	28.64	24.5	-4.14	-16.91	16.91	
6	2630	2618	1	8.58	9.91	1.33	13.44	13.44	
7	2630	5203	1	-28.88	-25.81	3.07	-11.88	11.88	
8	1485	1503	1	-76.7	-69.57	7.13	-10.25	10.25	10.25

A medição referente à linha 8 da tabela acima é fluxo 2.

Vizinhança	Erro (%)
0	5
1	8
2	10

Produto 1

Conclusão parcial

- Desenvolvimento e validação da rede estática:
 - Comparação com ANAFAS;
 - Comparação com ANAREDE.
- Portanto, a rede estática é representativa do sistema e pode-se seguir para o desenvolvimento dos equipamentos dinâmicos da rede retida:
 - Geradores e compensadores síncronos;
 - Compensadores estáticos de reativo (CER).

Programas Auxiliares

Programas desenvolvidos com o intuito de agilizar a construção e validação de redes equivalentes.

Programas auxiliares

PSCAD - Desafios

Necessidade de modelagem de um equivalente de rede.

Esforço significativo envolvido na elaboração do equivalente de rede.

Desafios na inicialização do equivalente.

Tempo de simulação prolongado.

Rede estática

Construção da rede:

- Conversão dos dados do ANAFAS e do ANAREDE para o PSCAD;
- Criação e parametrização automática dos elementos no PSCAD.

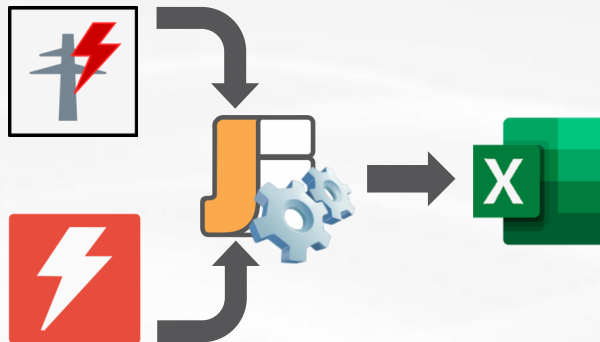
Validação da rede:

- Curto-circuito serializados de forma automática no PSCAD;
- Comparar o ponto de operação entre o ANAREDE e o PSCAD.

Programas auxiliares

Construção da rede:

- Conversão dos dados do ANAFAS e do ANAREDE para o PSCAD.



Linhas Curtas

Barra De	Nome Barra De	Barra Para	Nome Barra Para	NC	R1 (ohms/km)	X1 (ohms/km)	C1' (Mohm*km)	R0 (ohms/km)	X0 (ohms/km)	C0' (Mohm*km)	Comp. (km)
329	BESPER-MA230	229	B.ESPE-PI230	1	0.2645	1.4812	0.115	0.8369	3.3486	0.1327	1
528	TERES2-PI500	11528	TERES4-PI500	92	0.25	5.25	0.0079	6.2375	23.4	0.016	1
2630	ARARAQ-SP440	5203	ARARA2-SP440	1	0.2594	4.9387	0.013	3.1073	15.5848	0.018	1
2630	ARARAQ-SP440	5203	ARARA2-SP440	2	0.2594	4.9387	0.013	3.1073	15.5848	0.018	1
2630	ARARAQ-SP440	5203	ARARA2-SP440	3	0.2594	4.9387	0.013	3.1073	15.5848	0.018	1

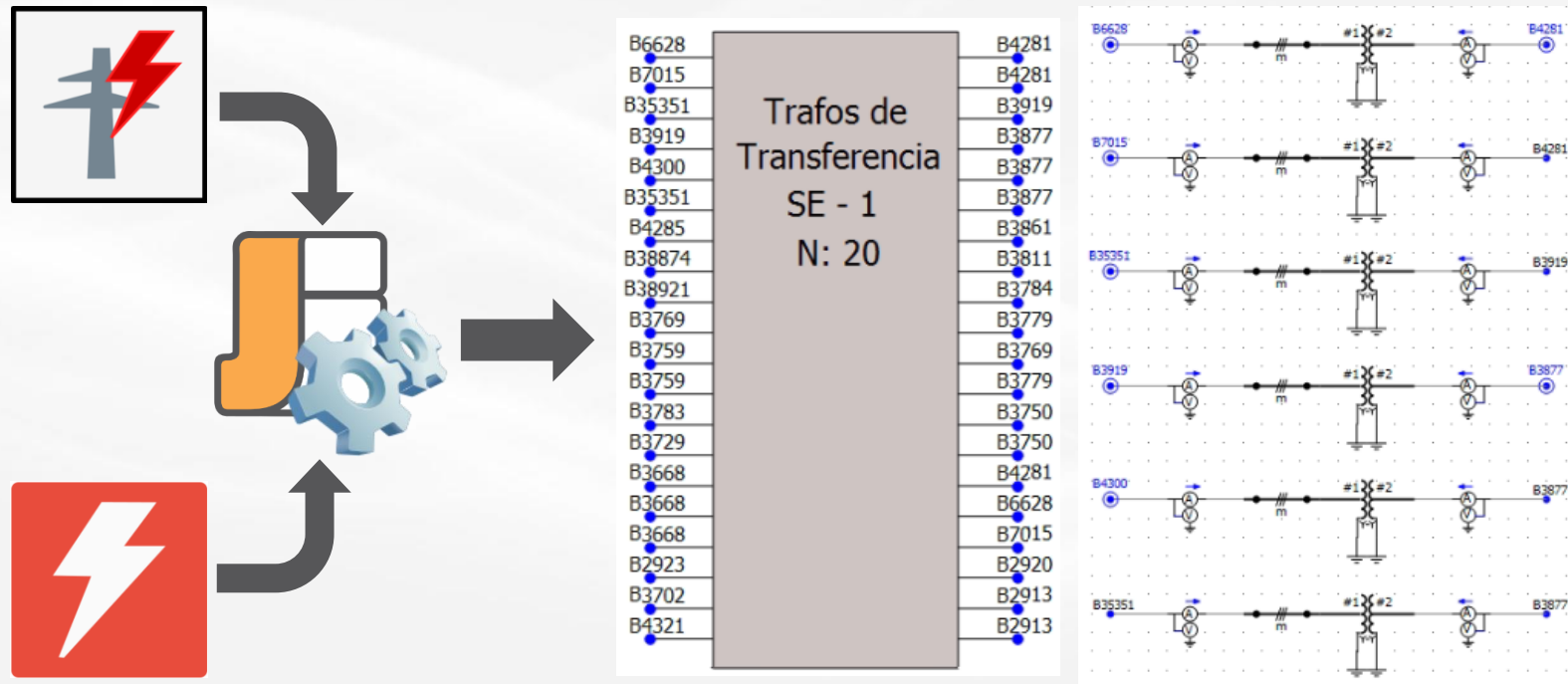
Geradores

Barra	Nome Barra	V (kV)	R0 (ohm)	X0 (ohm)	R1 (ohm)	X1 (ohm)
44	BESPE1UHE013	13.8	0	0.529042	0	0.529042
46	BESPE3UHE013	13.8	0	0.625405	0	0.625405
50	TUC1-5UHE013	13.8	0	0.030851	0	0.030851
52	TUC1-3UHE013	13.8	0	0.051609	0	0.051609

Programas auxiliares

Construção da rede:

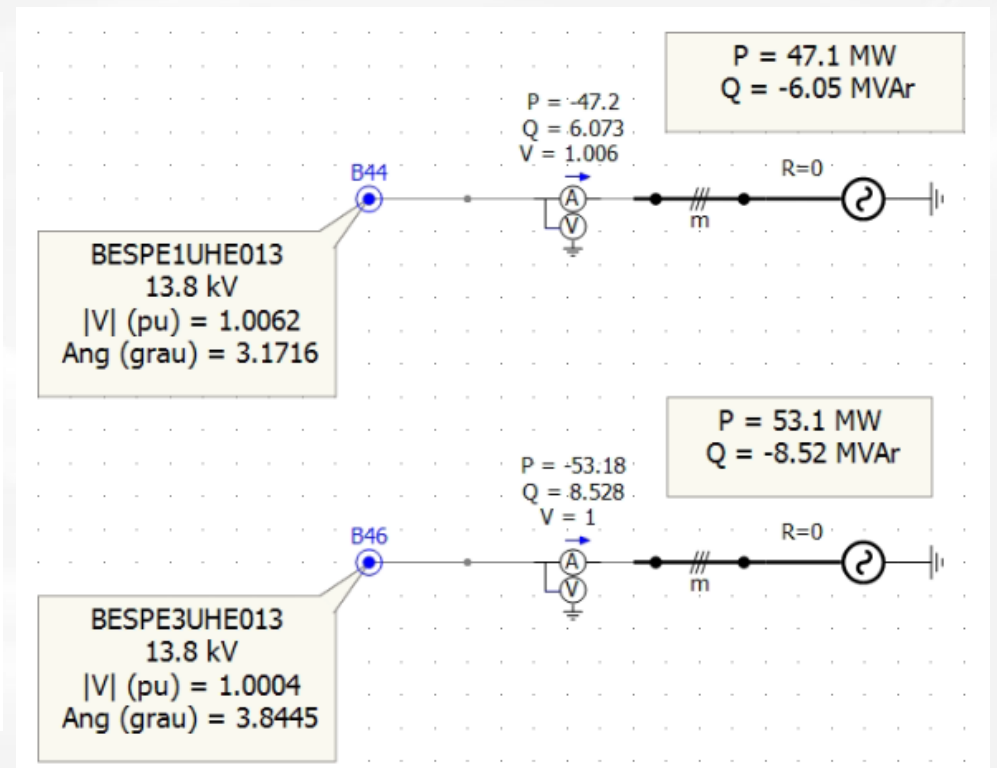
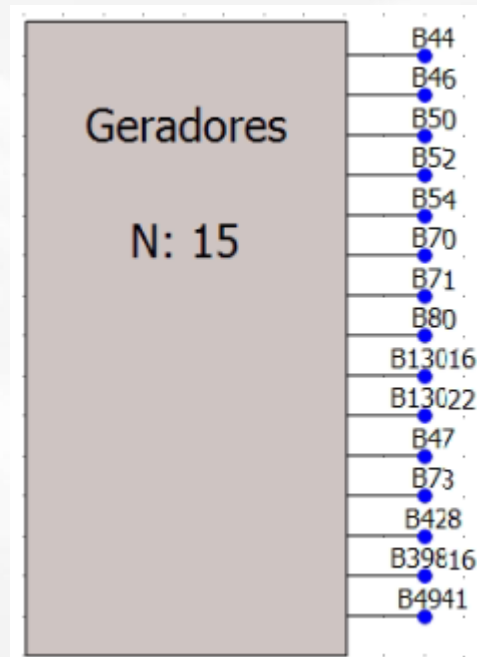
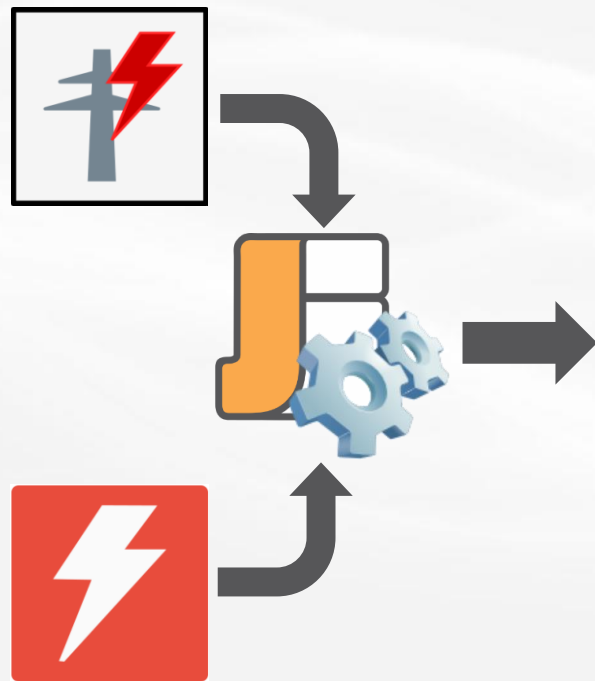
- Criação e parametrização dos elementos no PSCAD.



Programas auxiliares

Construção da rede:

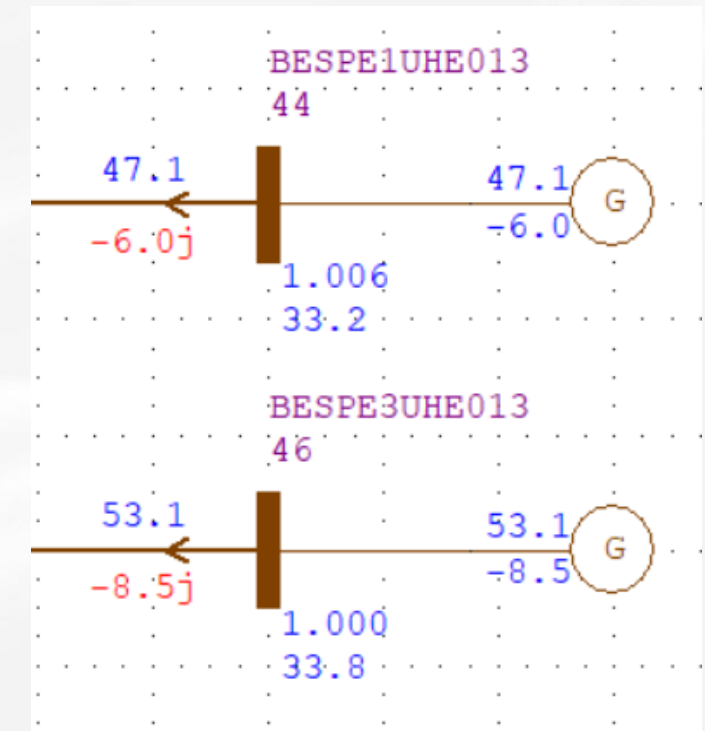
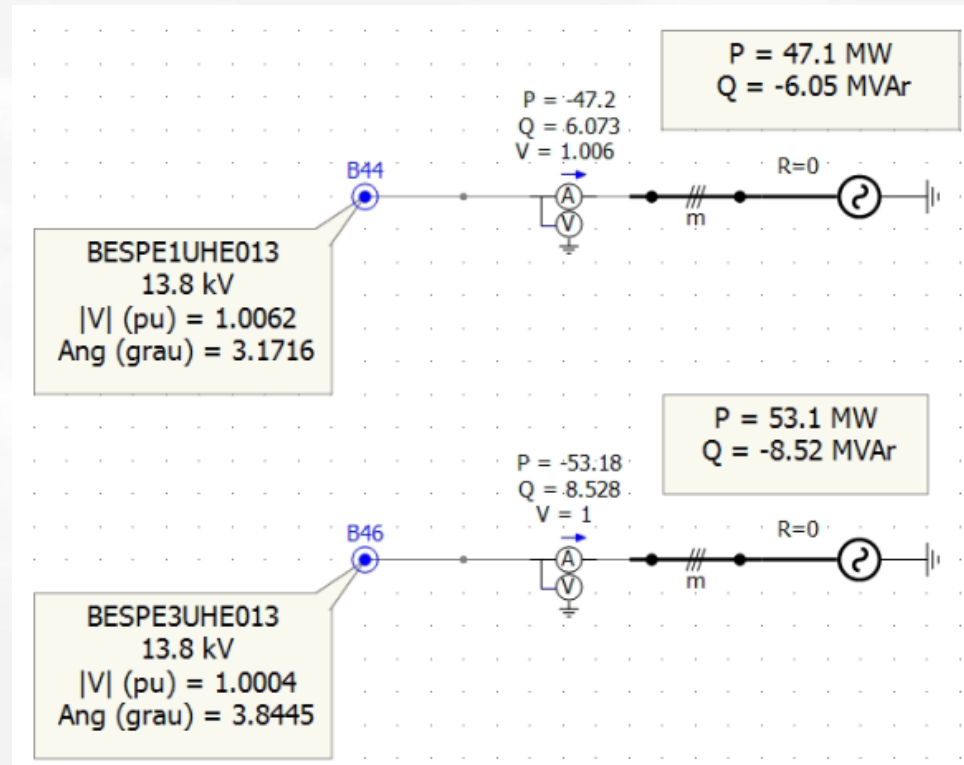
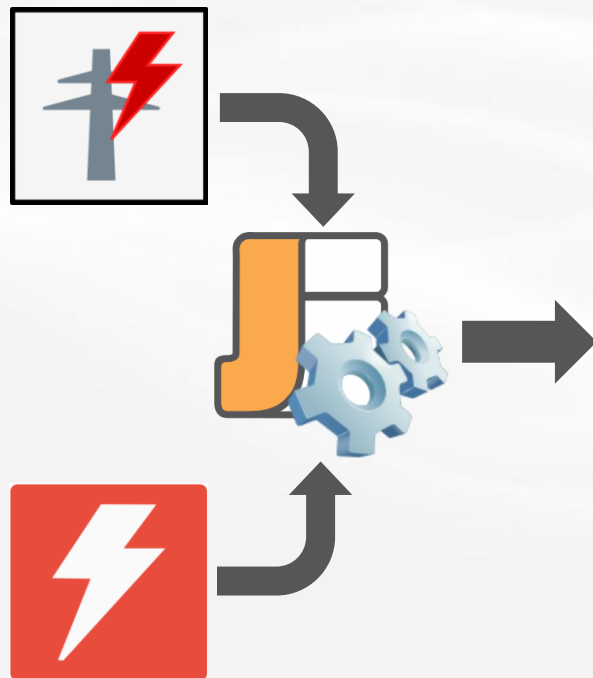
- Criação e parametrização dos elementos no PSCAD.



Programas auxiliares

Construção da rede:

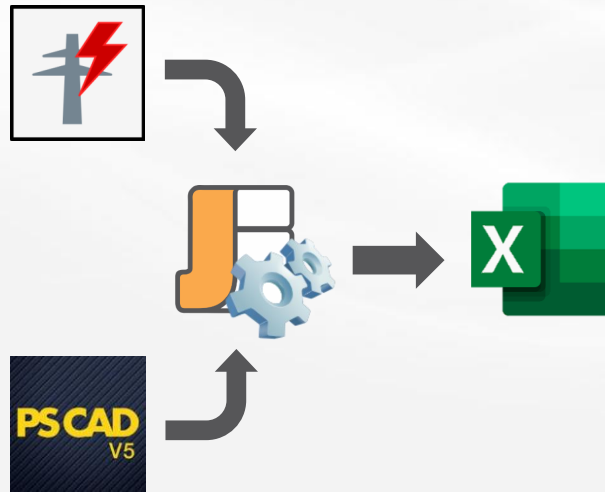
- Criação e parametrização dos elementos no PSCAD.



Programas auxiliares

Validação da rede:

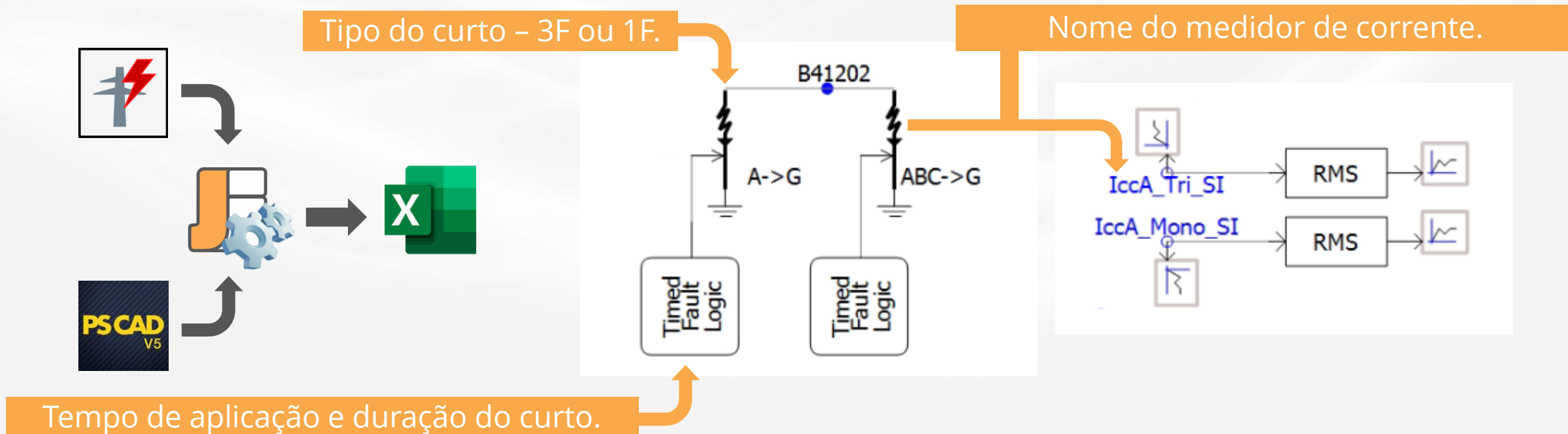
- Curto-circuito serializados de forma automática nas barras especificadas:
 - Retorna um arquivo contendo a comparação dos dados de curto-circuito do PSCAD e do ANAFAS;
 - Programa foi desenvolvido utilizando a biblioteca MHI PSCAD Automation Library.



Programas auxiliares

Validação da rede:

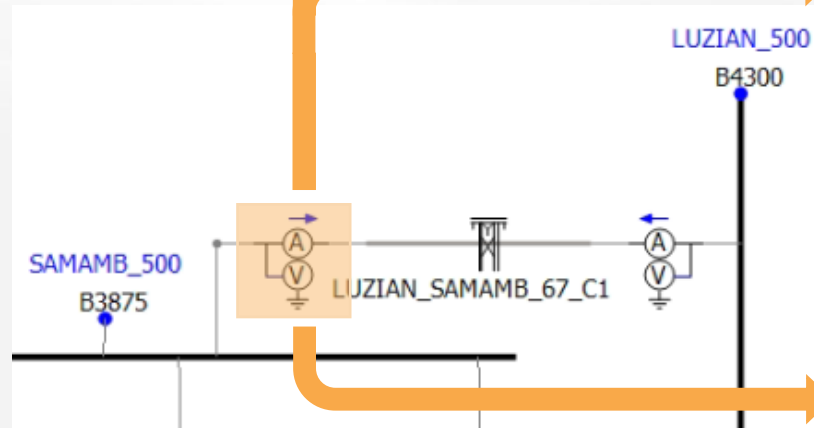
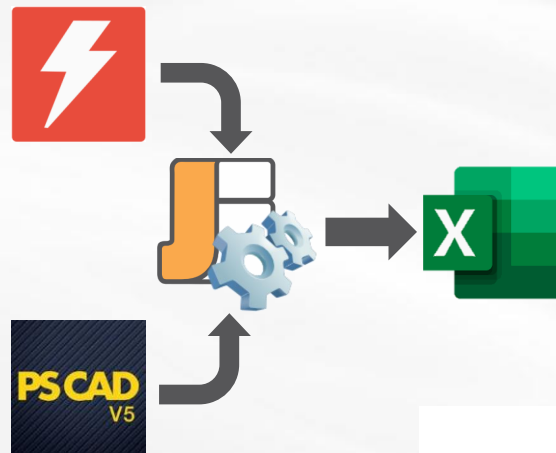
- Curto-circuito serializados de forma automática barras especificadas:
 - Retorna um arquivo contendo a comparação dos dados de curto-circuito do PSCAD e do ANAFAS;
 - Programa foi desenvolvido utilizando a biblioteca MHI PSCAD Automation Library.



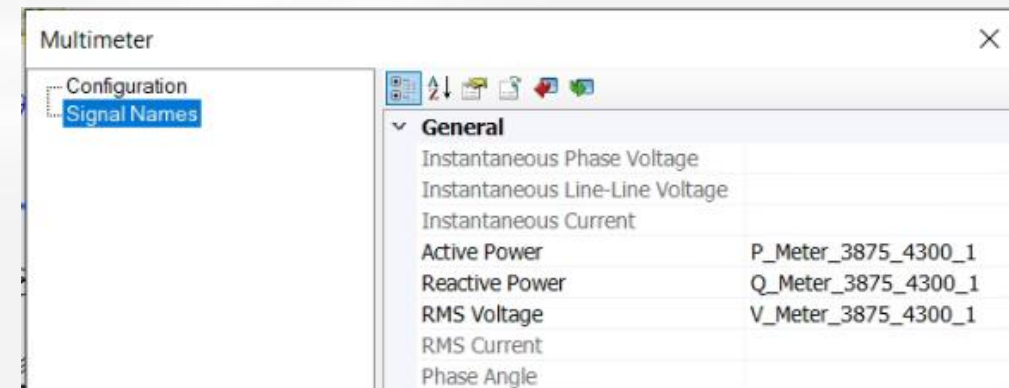
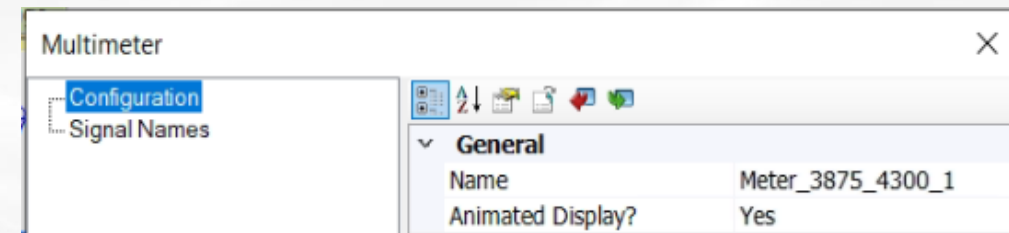
Programas auxiliares

Validação da rede:

- Comparar o ponto de operação entre o ANAREDE e PSCAD:
 - Nomear os medidores.



V_Meter_3875_4300_1 → V_Meter_3875_4300_1
P_Meter_3875_4300_1 → P_Meter_3875_4300_1
Q_Meter_3875_4300_1 → Q_Meter_3875_4300_1



Produto 1

Conclusão parcial

- Programas auxiliares foram desenvolvidos:
 - Agilizar a construção e validação das redes equivalentes:
 - Redução do tempo de desenvolvimento.
 - Redução de erros.



contato@jordaoenergia.com.br



+55 21 2413-5743 / 96777-5790



Av. Rio Branco, 120 - Grupo 830, Centro, Rio de Janeiro/RJ
CEP 20.040-001



www.jordaoenergia.com.br

Produto 02:

Modelagem, validação e inclusão dos modelos dinâmicos de máquinas síncronas e compensadores estáticos de reativo no Produto 01

Produto 02

Objetivos:

- **Modelar** e **validar** os equipamentos dinâmicos da rede retida;
- **Transferir** para os equivalentes de rede estáticos;
- **Ajustar** as máquinas para uma rápida **inicialização** do modelo final.

Produto 02

Resultados:

- 51 máquinas/compensadores síncronos modelados:
 - 46 modelos.
- Dois compensadores estáticos de reativo (CER):
 - Compensador Itatiba;
 - Compensador Fernão Dias.

Produto 02

1ª Etapa:

- **Desenvolvimento e validação** de modelos dinâmicos com equivalente Thévenin:
 - Geradores e compensadores Síncronos da rede retida;
 - Compensadores estáticos de reativo.

2ª Etapa:

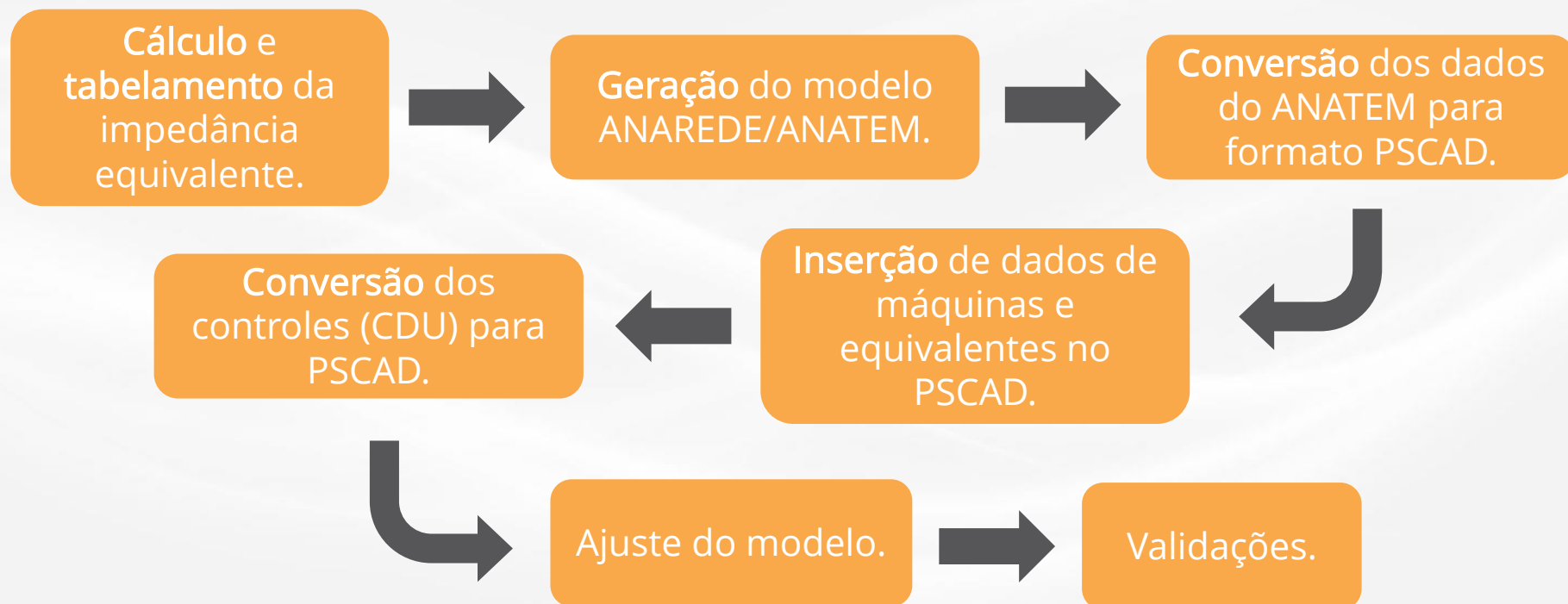
- **Transferir** os modelos da 1ª etapa para os cenários desenvolvidos no Produto 01.

1ª Etapa

Desenvolvimento e validação dos modelos de máquinas síncronas

Produto 02 – 1ª Etapa

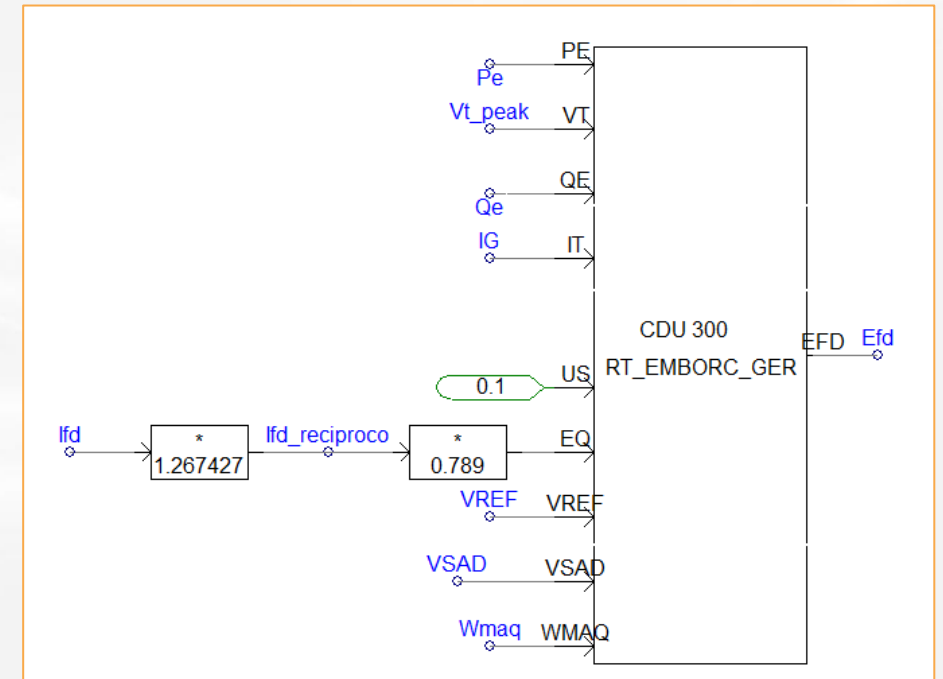
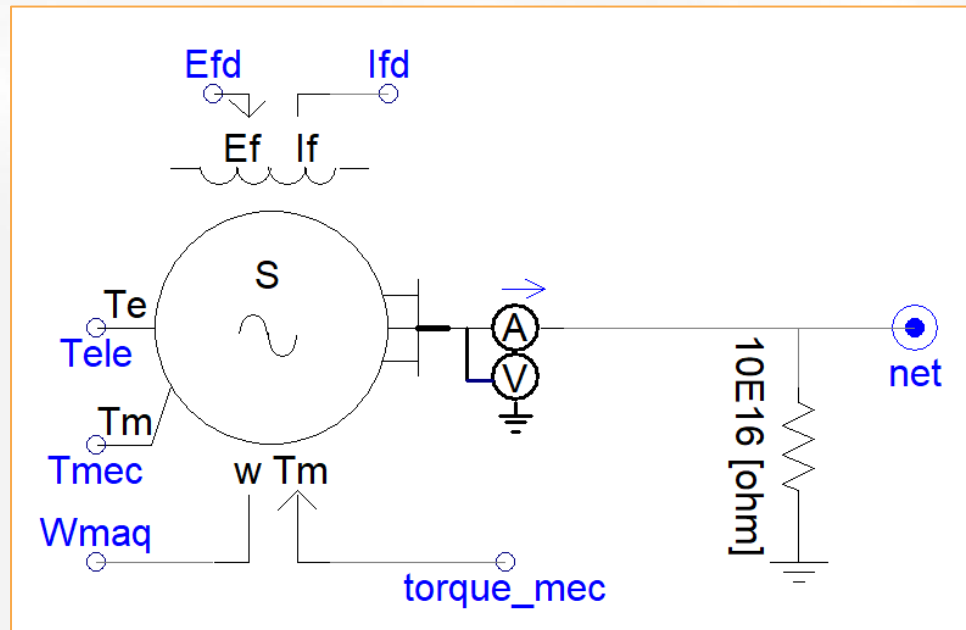
Desenvolvimento e validação dos Modelos de **Máquinas**:



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

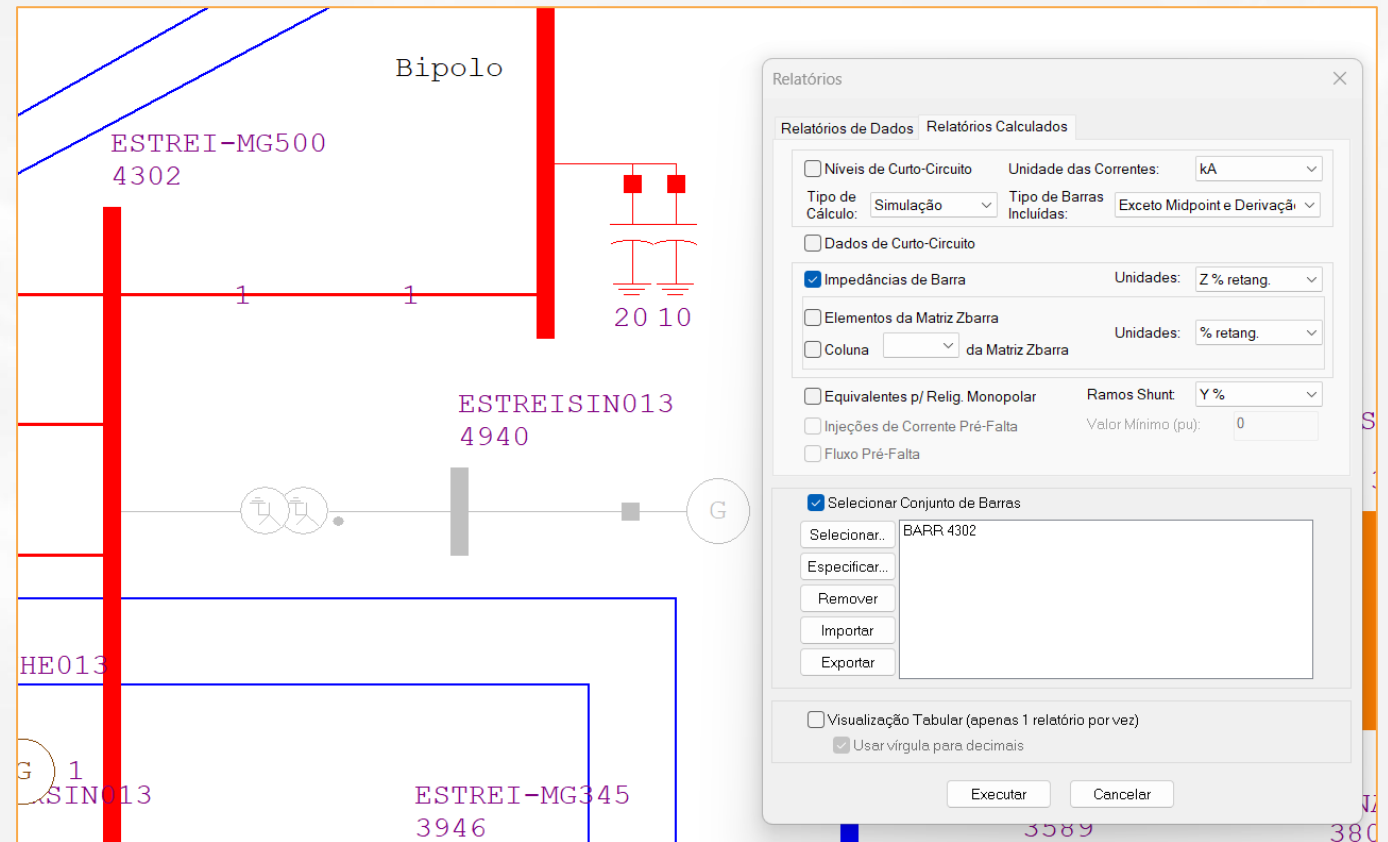
Modelo final de máquina:

Máquina
EMBORCUHE013
1426



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Cálculo e tabelamento da impedância equivalente vista de cada máquina:



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Cálculo e tabelamento da impedância equivalente vista de cada máquina:

Planilha de impedâncias

ANAFAS									
Barra de baixa	Nome Barra de baixa	Tensão baixa (kV)	Barra de alta	Nome barra de alta	Tensão Alta (kV)	x1(%)	CNX	Imp. Eq.	
								R(%)	X(%)
1426	EMBORCUHE013	13.8	1509	EMBORC-MG500	500	4.07	ED	0.03028	0.48965

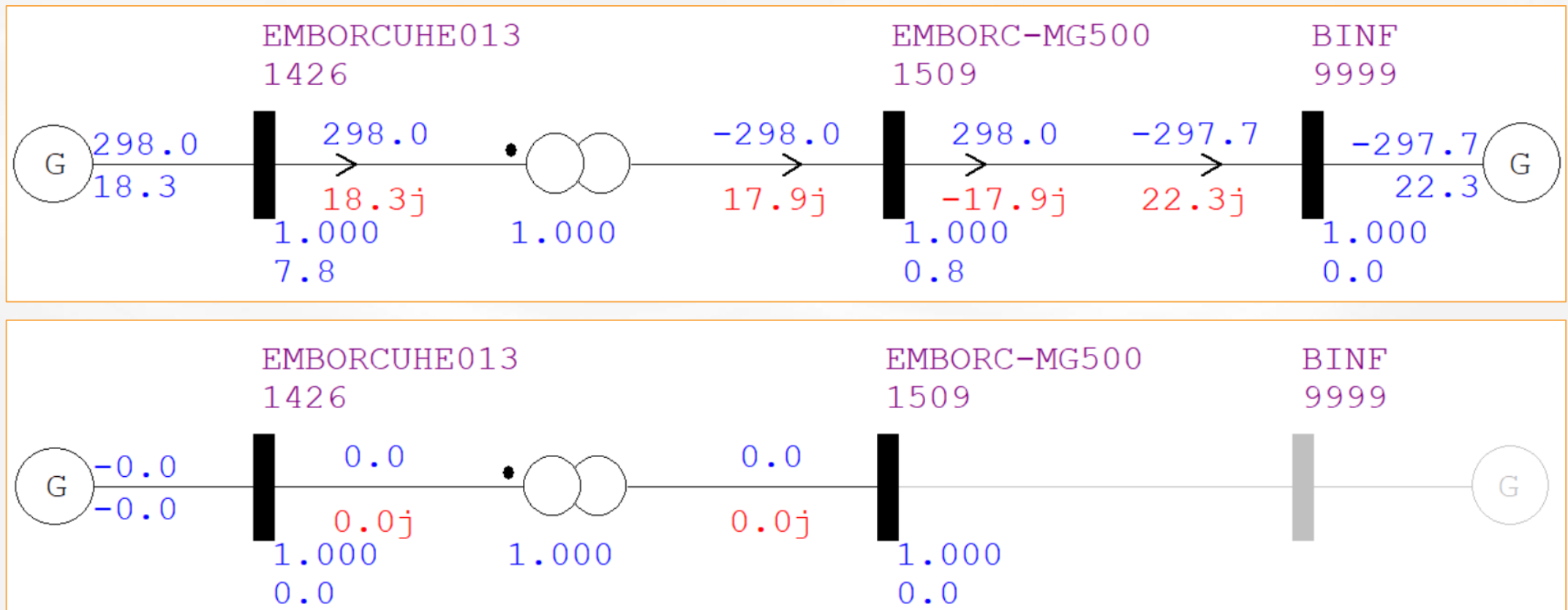
PSCAD			
Imp. Eq.		Xtrafo(pu)	Pbase (MW)
R(ohm)	L(H)		
0.75704	0.03247	0.0407	100

ANATEM
Potência ativa máxima (MW)
298

Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Geração do modelo ANAREDE / ANATEM da máquina:

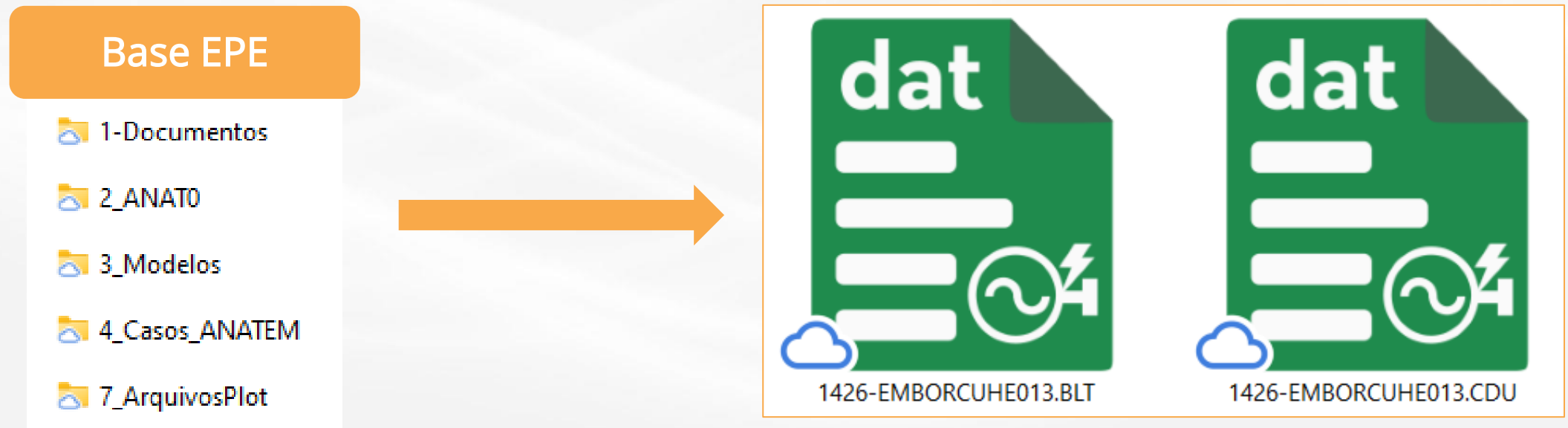
- Criação do modelo ANAREDE.



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Geração do modelo ANAREDE / ANATEM da máquina:

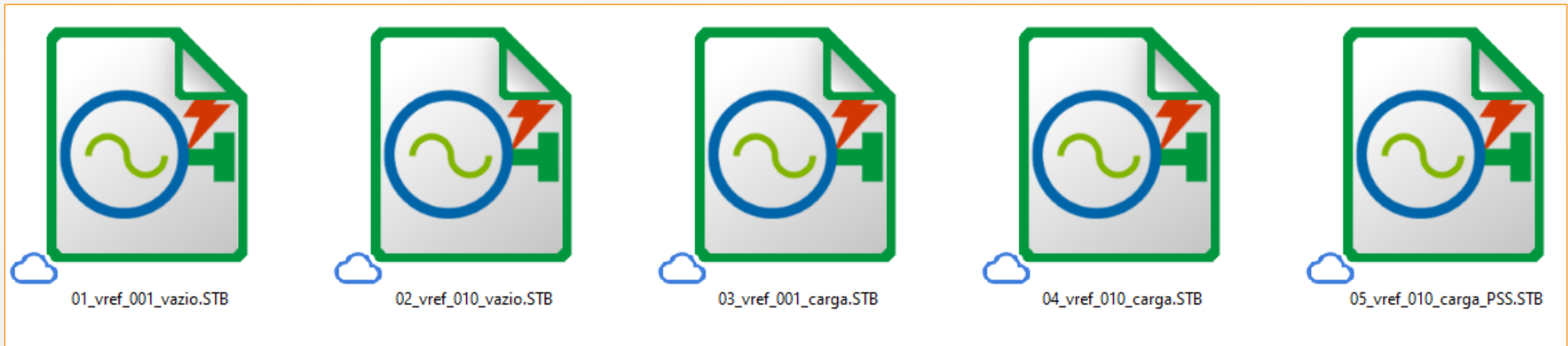
- Separação dos CDUs e BLTs da base de dados da EPE.



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Geração do modelo ANAREDE / ANATEM da máquina:

- Geração dos casos com eventos programados para validação.



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Conversão dos dados do ANATEM para formato PSCAD:

- Dados de máquinas

```
DMDG MD02
| (..... UHE Emborcacao
| (No) (CS) (Xd )(Xq )(X'd) (X''d)(Xl )(T'd) (T''d)(T''q)
| 0300 92.8968.9931.99 25.5913.99 5.00 .065 .085
| (No) (Ra )( H )( D )(MVA)Fr C
| 0300 4.722 313.6 N
| 999999
```



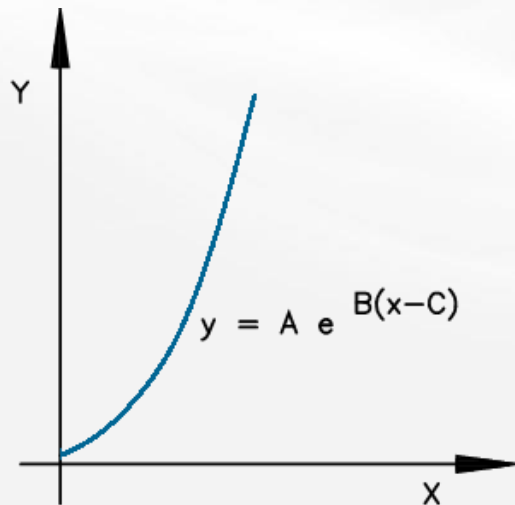
PSCAD		
Parâmetro	Valor	Observação
Nqaxw	1	Número de amortecedores do eixo q
V _{fase} (KV)	7,967	Tensão linha-neutro nominal
I(KA)	13,12	
OMO(rad/s)	376,991	Frequência angular nominal
H(s)	4,722	
D(pu)	0	
Ra(pu)	0	
xp(pu)	0,14	Reatância de Potier
xd(pu)	0,929	
xd_(pu)	0,32	x'd
Td0_(s)	5	T'd
xd__(pu)	0,256	x''d
Td0__(s)	0,065	T''d
Xq(pu)	0,69	
xq_(pu)	0,256	x''q = x''d
Tq0__(s)	0,085	T''q
AGFC	1	Fator de entreferro

Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Conversão dos dados do ANATEM para formato PSCAD:

- Curva de saturação

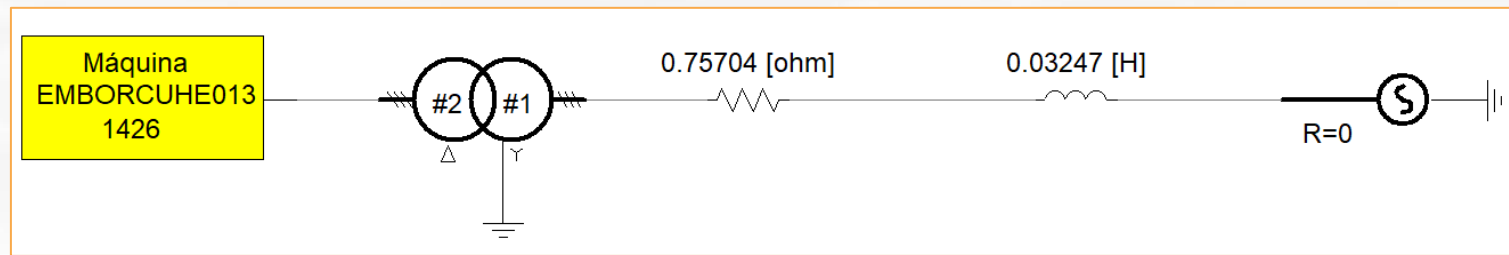
```
DCST
(..... UHE Emborcacao
(No)  T (  Y1  ) (  Y2  ) (  X1  )
0300  2   0.020   7.50   0.8
999999
```



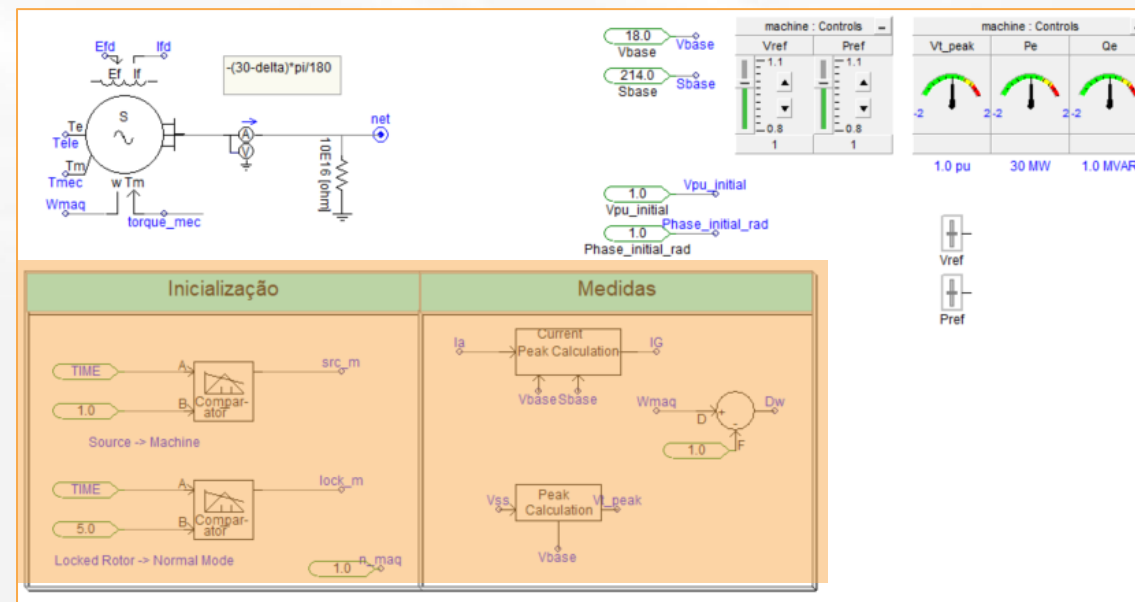
IFD (pu)	Vt (pu)
0,0	0,000
0,82	0,800
1,012	0,950
1,049	0,975
1,09	1,000
1,148	1,033
1,215	1,067
1,29	1,100
1,602	1,200
2,15	1,300

Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Inserção dos dados de máquinas (BLT) e equivalentes (planilha de impedâncias) no PSCAD:

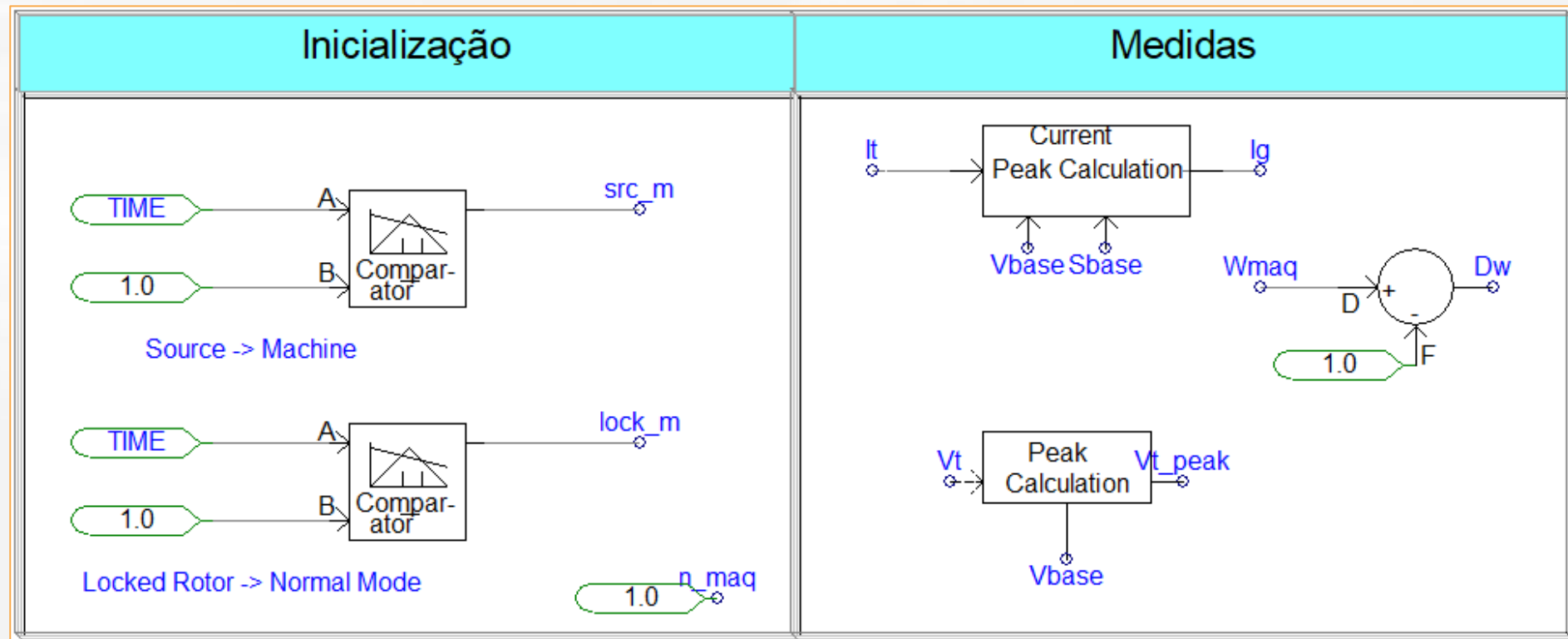


Ampliação



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

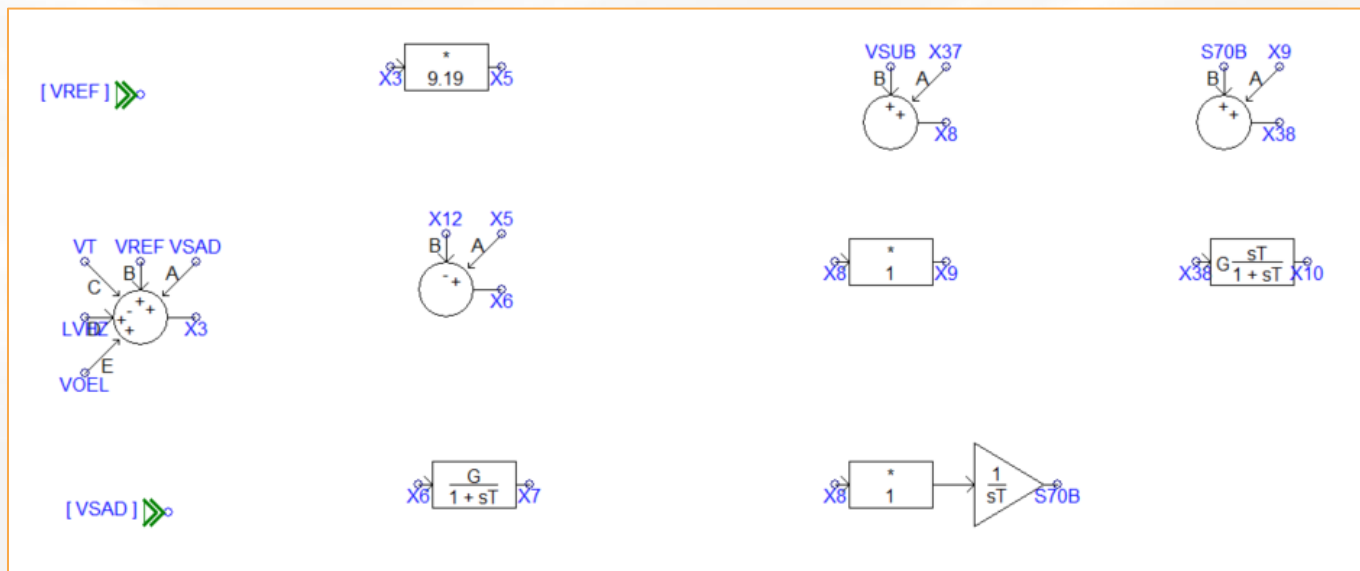
Inserção dos dados de máquinas (BLT) e equivalentes (planilha de impedâncias) no PSCAD:



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Conversão de CDU para PSCAD:

```
(-----  
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (  
(-----  
0002 ENTRAD          Vref  
0003 SOMA            Vsad X3  
                   Vref X3  
                   -Vt  X3  
                   LVHz X3  
                   Voel X3  
  
0004 IMPORT VSAD      Vsad  
0005 GANHO           X3  X5    #us  
0006 SOMA            X5  X6  
                   -X12 X6  
  
0007 LEDLAG          X6  X7    #Ka      1.0#Ta  
0008 SOMA            X37 X8  
                   Vsub X8  
  
0009 GANHO           X8  X9    #Bex  
0001 PROINT          X8  S70B  1.0    #S70B  
0038 SOMA            X9  X38  
                   S70B X38  
  
0010 WSHOUT          X38 X10  #Tse    1.0#Tse
```



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

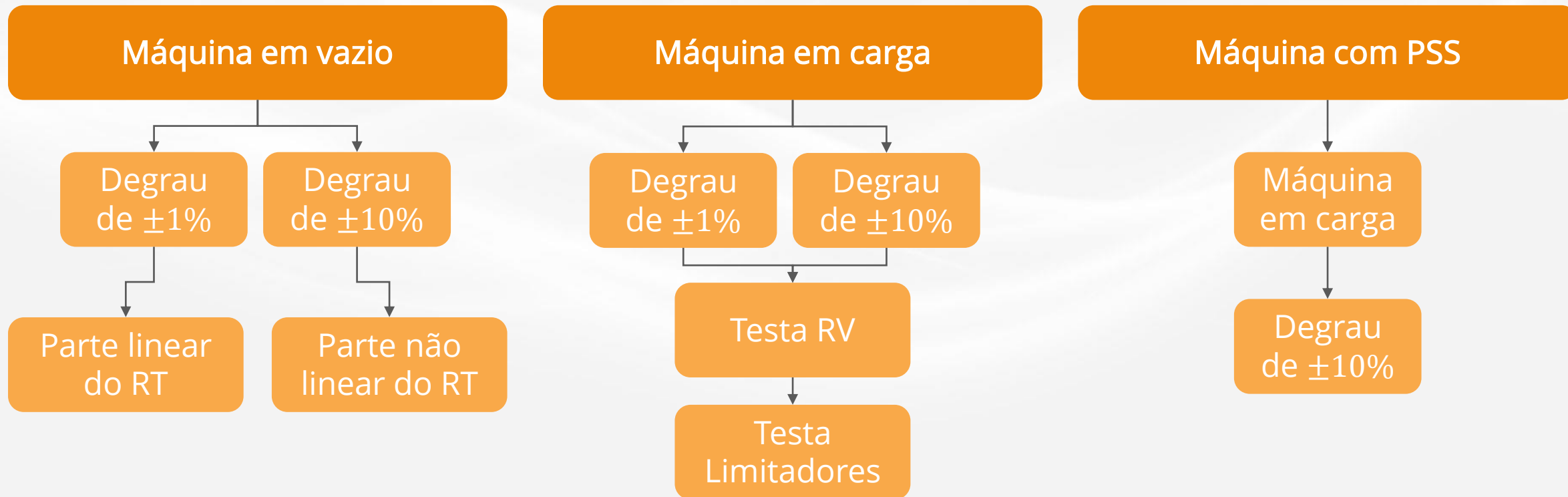
Ajuste do modelo:

- Adaptação da relação das correntes de campo do modelo simétrico para o não simétrico:
 - $i_{ANATEM}^{fd} = \frac{1}{x_d - x_p} \times i_{PSCAD}^{fd}$
- Ajustes manuais:
 - No **ANATEM** as variáveis de estado começam do **ponto de equilíbrio**;
 - No **PSCAD** a simulação inicia do **zero**;
 - **Potencial** diferença de convergência devido a atuação de algum limitador na inicialização.

Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Validação:

- Ajuste dos valores de referência dos controles iguais ao do modelo ANATEM.



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

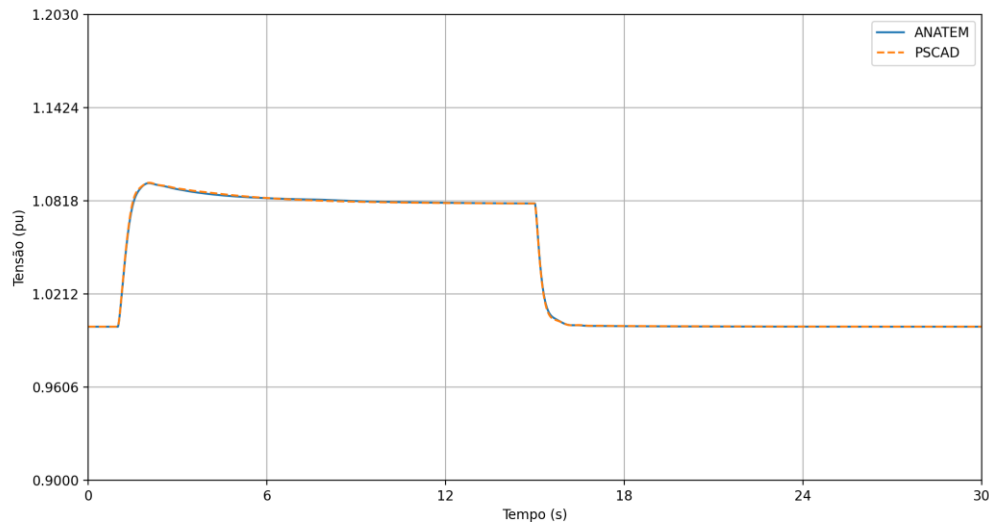
Validação:

- Tensão terminal;
- Tensão de Campo;
- Corrente de campo;
- Potência Ativa;
- Potência Reativa;
- Velocidade.

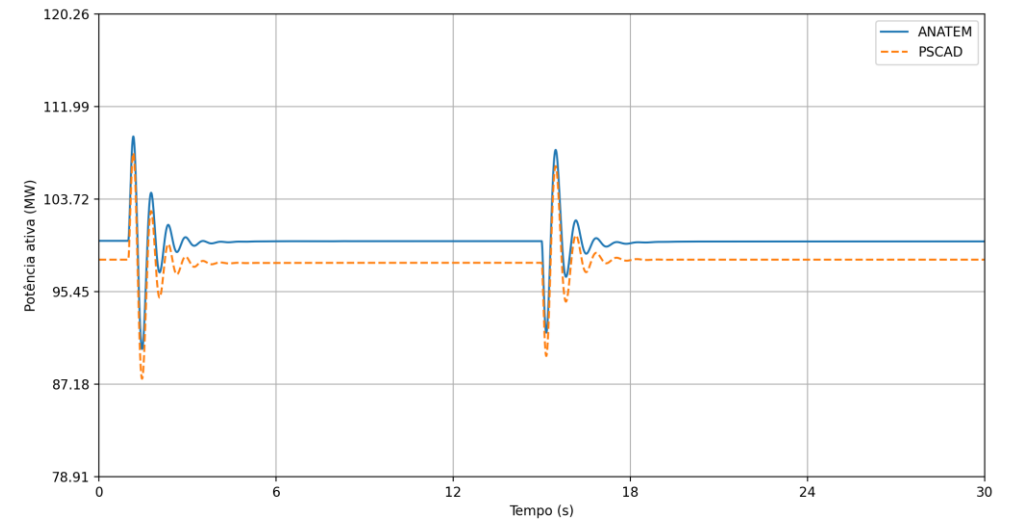
Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Validação:

Tensão terminal (pu)



Potência ativa (MW)



Desenvolvimento e validação dos Modelos de Máquinas

Validação:

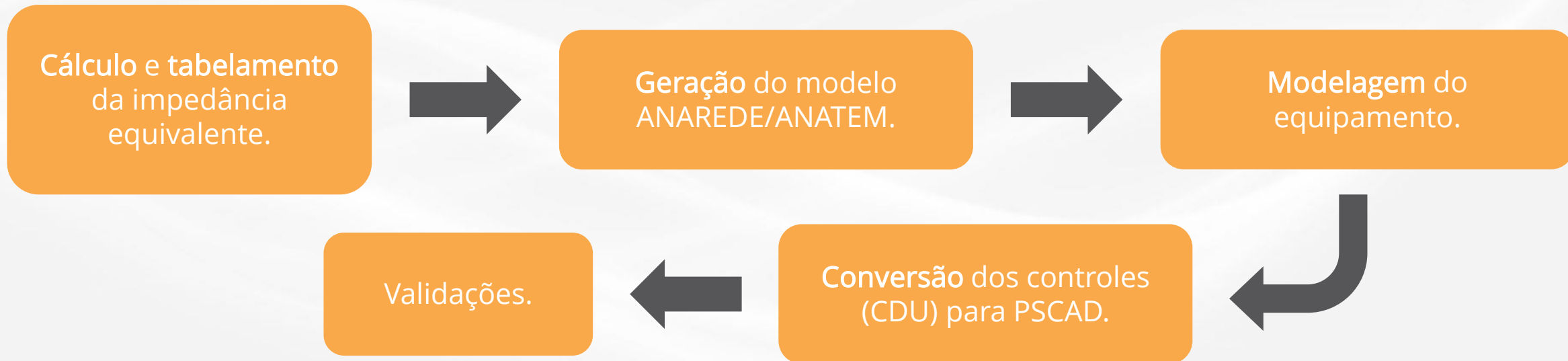
- Diferenças são esperadas:
 - Os controles são iguais;
 - Modelos de máquinas são diferentes (BLT PSCAD x BLT ANATEM) .

1ª Etapa

Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

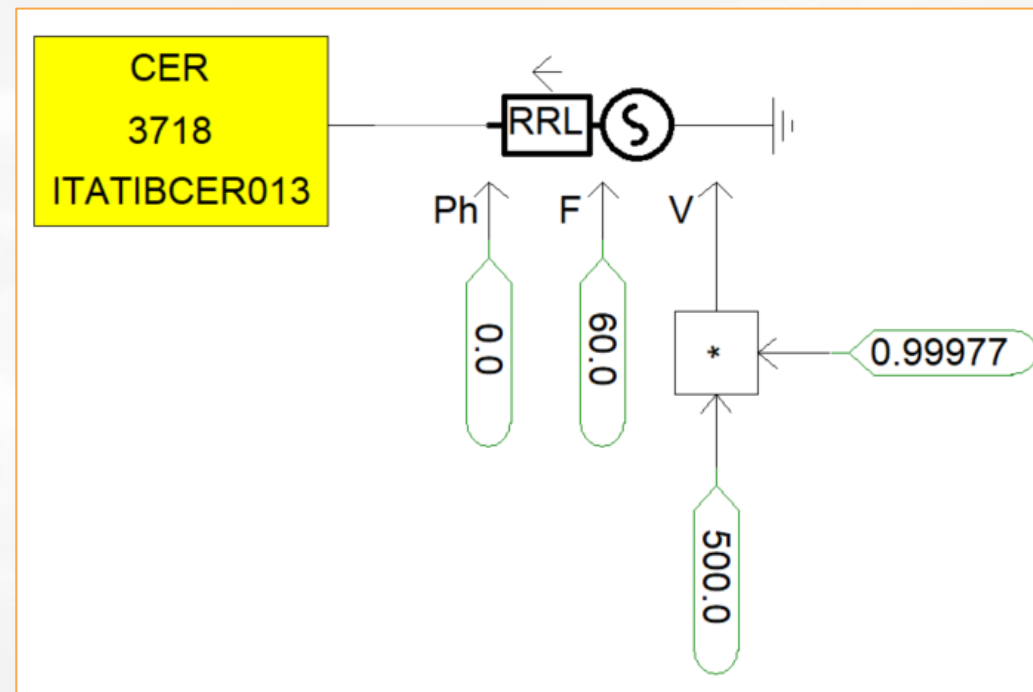
Produto 02 – 1ª Etapa

Desenvolvimento e validação dos modelos dos compensadores estáticos de reativo:



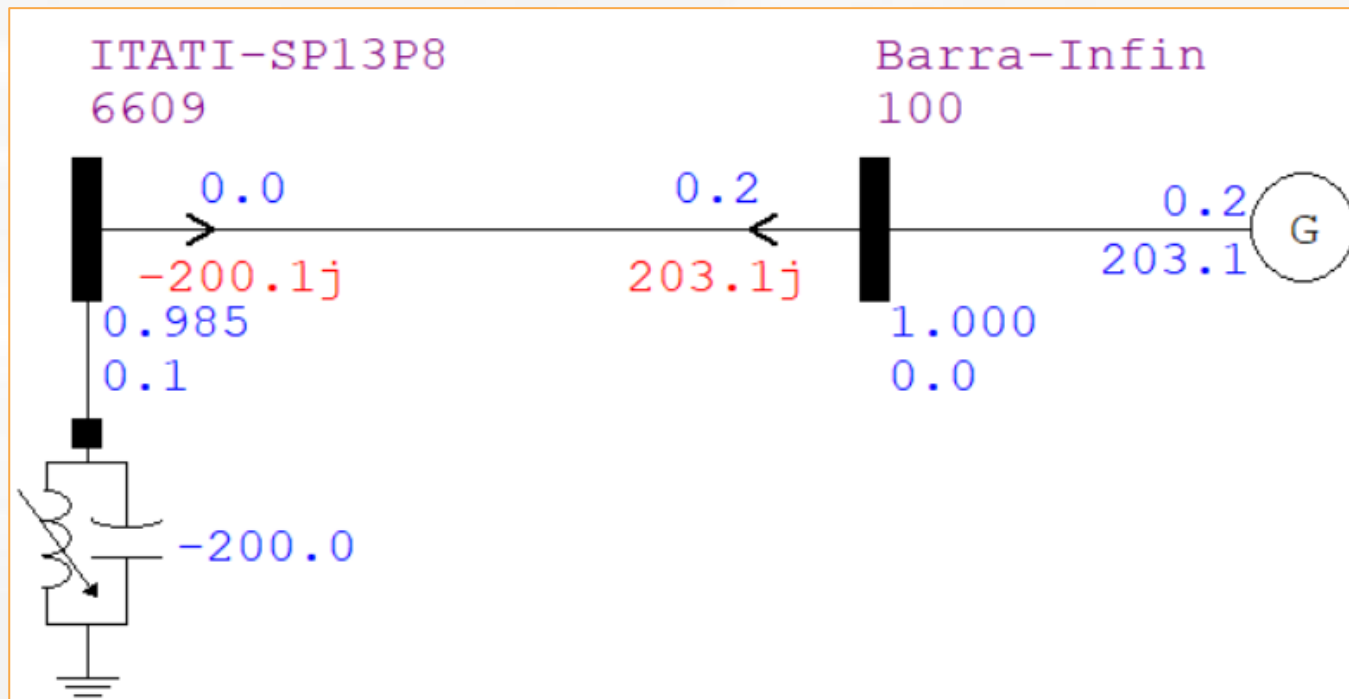
Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

Modelo Final dos CER:



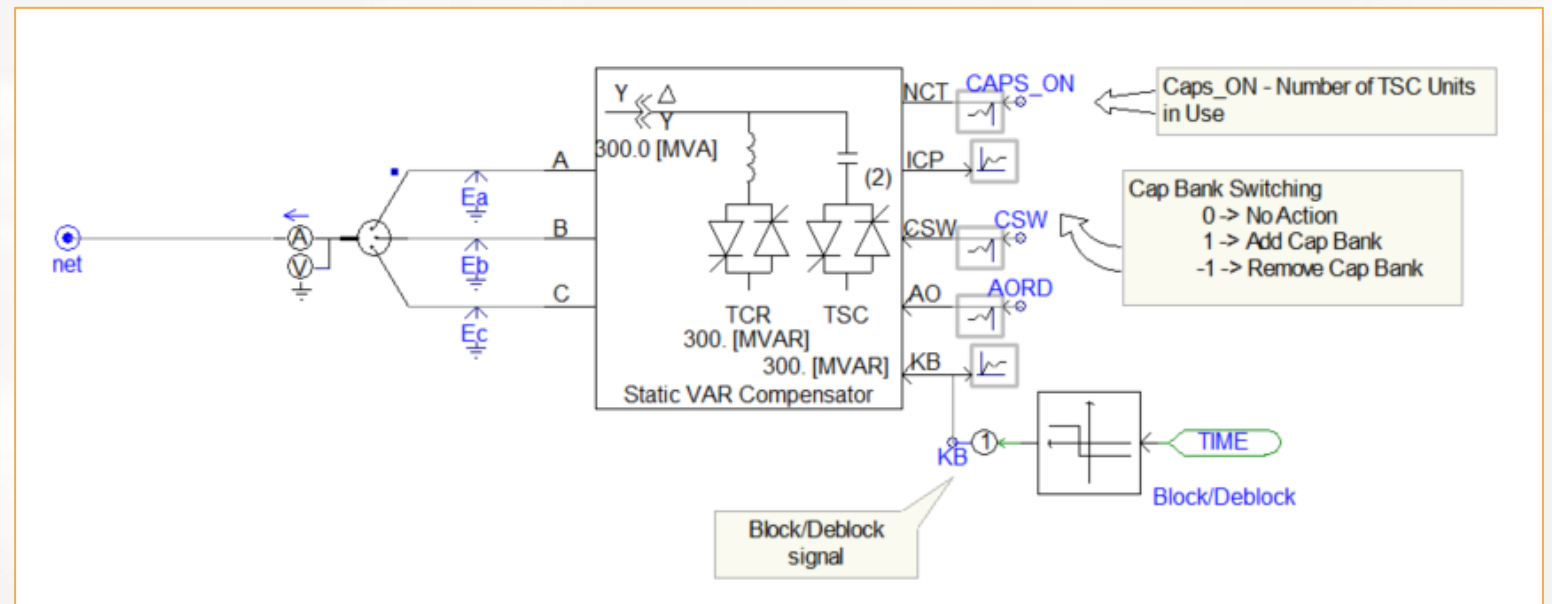
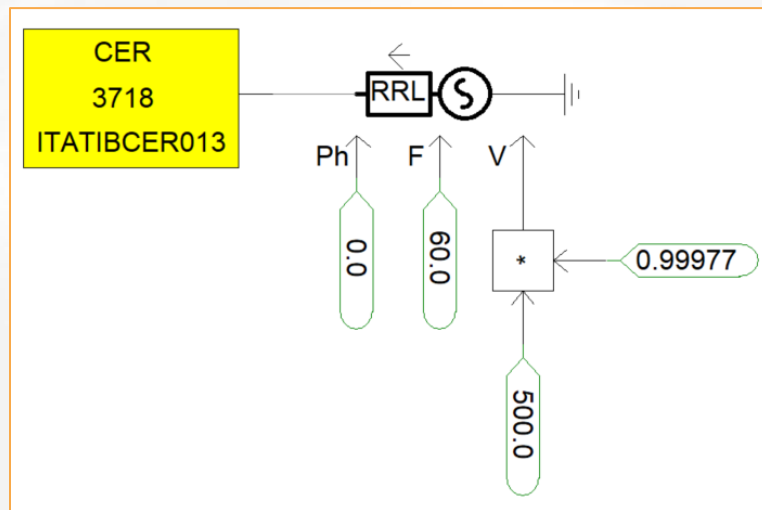
Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

Geração do Modelo ANAREDE/ANATEM:

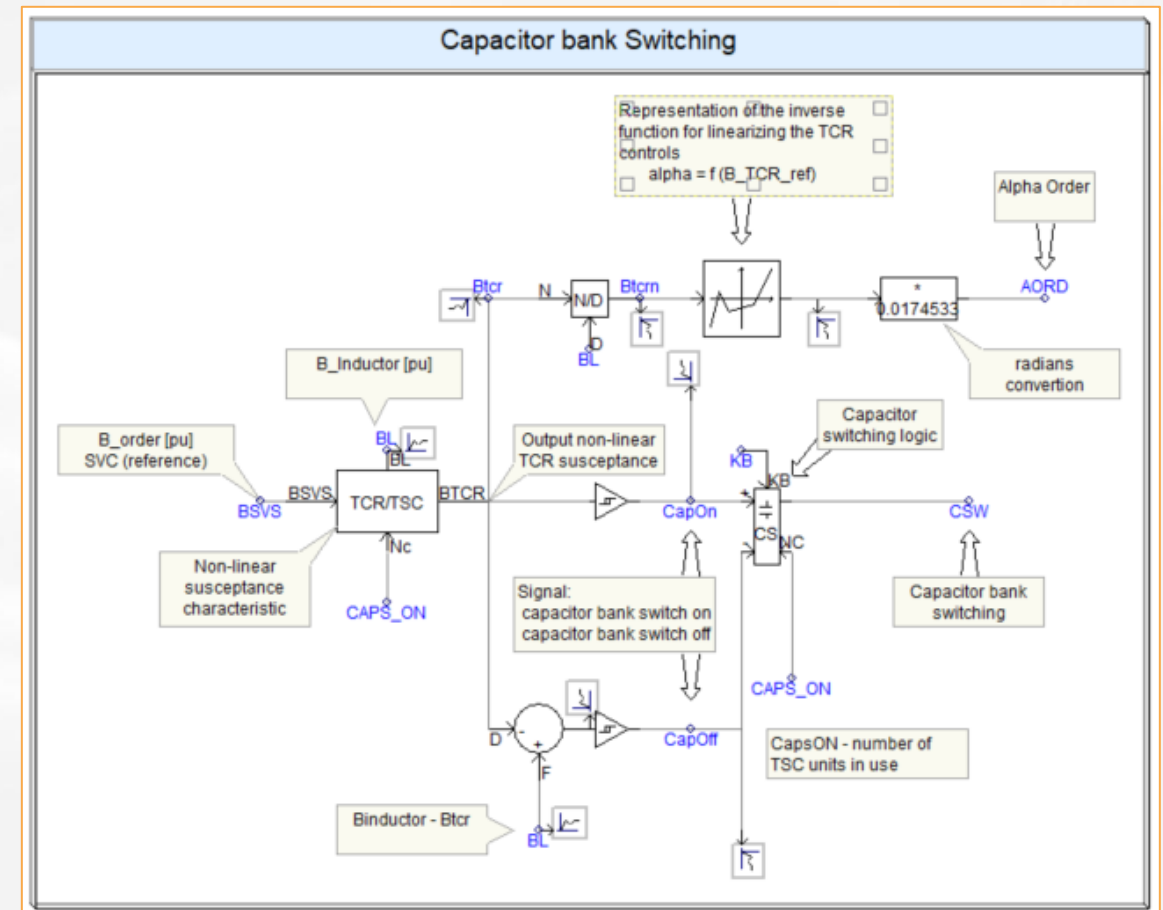


Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

Modelagem do equipamento:



Conversão do controle (CDU) para PSCAD:



Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

Validação:

- Aplicação de **eventos** em ambos os modelos:
 - Degrau de $\pm 2\%$ na referência de tensão;
 - Curto-circuito.

Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

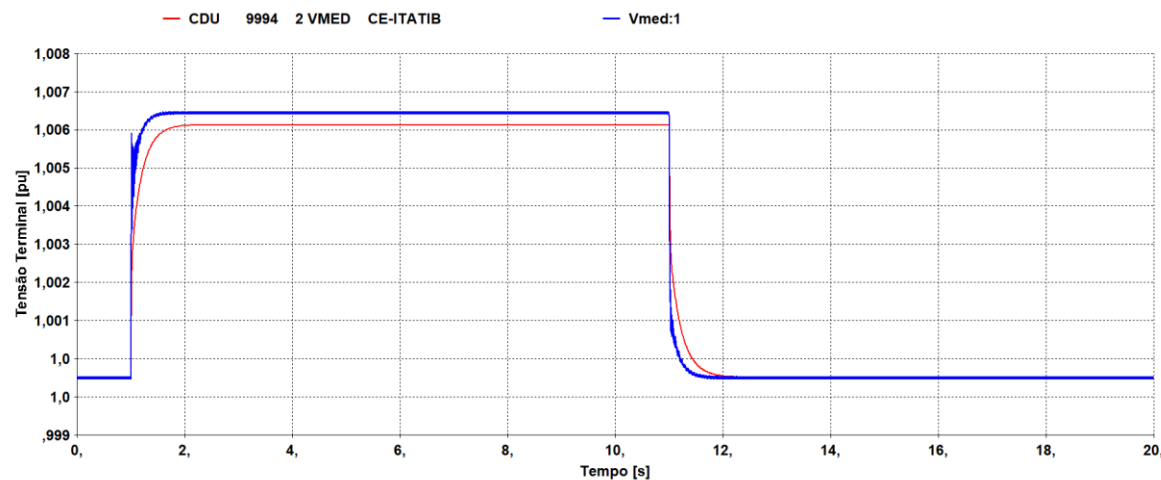
Validação:

- Tensão terminal;
- Corrente;
- Sinal de erro do controlador;
- Potência reativa.

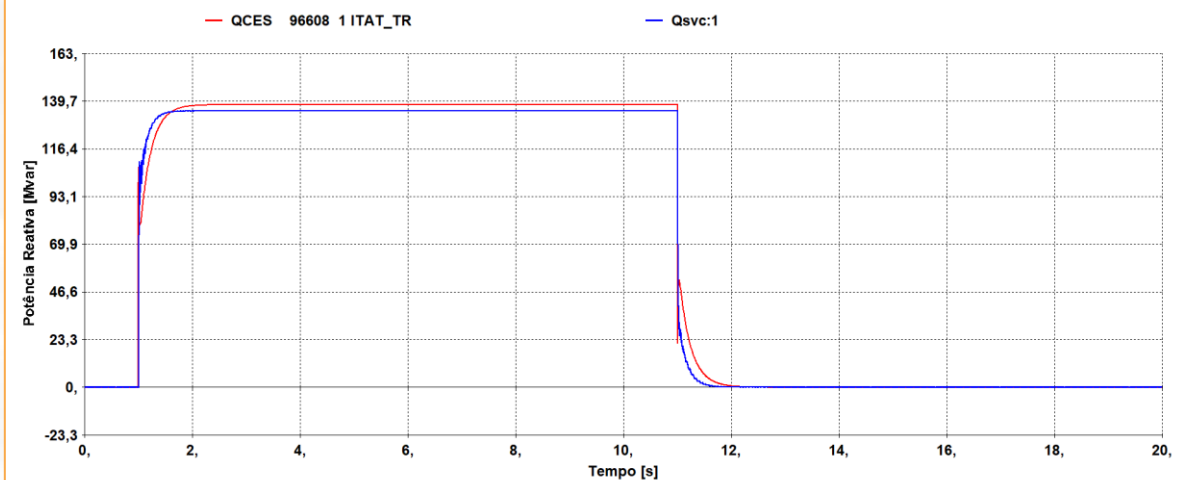
Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

Validação:

Tensão terminal (pu)



Potência reativa (Mvar)



Desenvolvimento e validação dos compensadores estáticos de reativo

Validação:

- Diferenças são esperadas:
 - Os controles são iguais;
 - Modelos de CER são diferentes (BLT PSCAD x BLT ANATEM) .

1ª Etapa

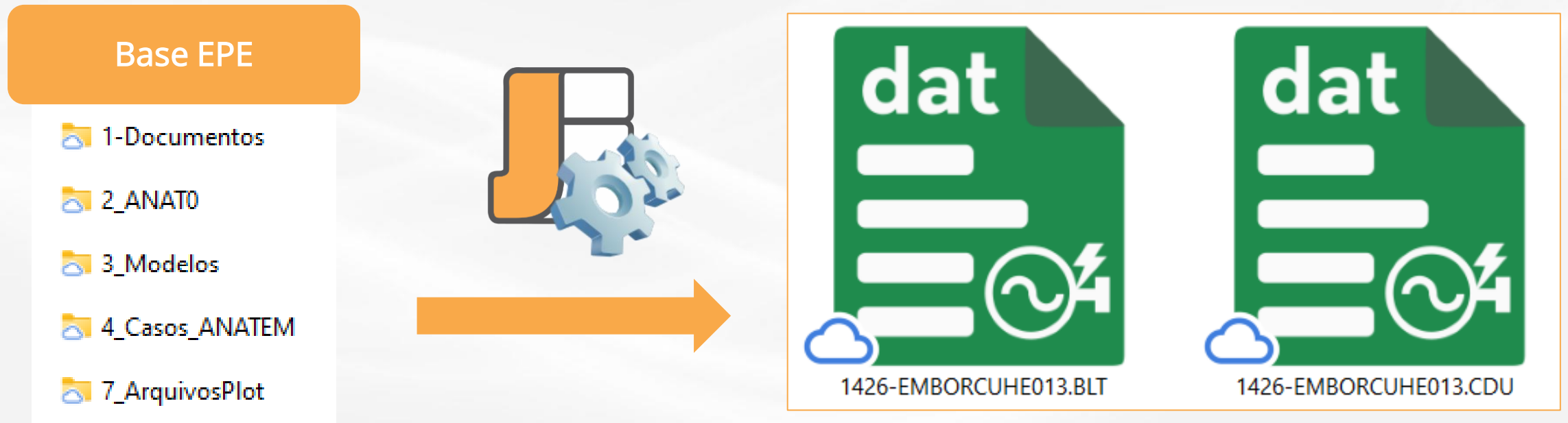
Desenvolvimento de rotinas auxiliares

Desenvolvimento de rotinas auxiliares

- Separação dos modelos dinâmicos da **base da EPE**;
- Geração de arquivo **ANAREDE** (.pwf) para cada sistema:
 - Função ULOG associa ao arquivo histórico (.sav).
- Produção dos modelos de teste do **ANATEM**;
- Transferência de CDU para **PSCAD**.

Desenvolvimento de rotinas auxiliares

Separação dos modelos dinâmicos da base da EPE:



Desenvolvimento de rotinas auxiliares

Geração de arquivo ANAREDE (.pwf) para cada sistema:



Desenvolvimento de rotinas auxiliares

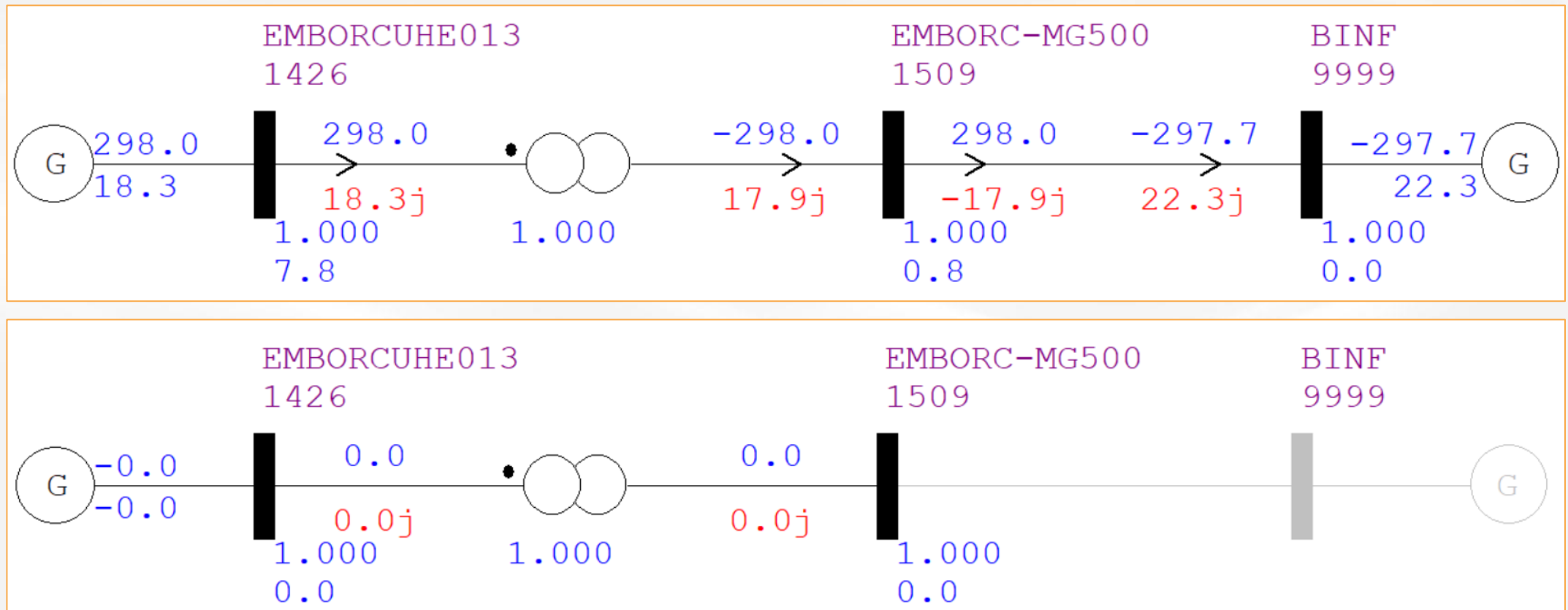
Geração de arquivo ANAREDE (.pwf) para cada sistema:



```
gen_sav1426-EMBORCUHE013.pwf
01 ULOG
02 2
03 1426-EMBORCUHE013.SAV
04 ARQV INIC
05 SIM
06 TITU
07 1426-EMBORCUHE013-BINF
08 DBAR
09 1426 L1 EMBORCUHE013 298 -999999999
10 1509 L EMBORC-MG500
11 9999 L2 BINF -999999999
12 99999
13 DLIN
14 1426 1509 4.07 1. 99999999 9999
15 1509 9999 0.0300.4896 99999999 9999
16 99999
17 EXLF
18 ARQV GRAV SUBS AREG NOVO
19 2
20 ARQV GRAV SUBS AREG NOVO
21 1
22 ARQV REST
23 1
24 TITU
25 1426-EMBORCUHE013-VAZIO
26 DBAR
27 1426ML2 EMBORCUHE013 298 -999999999
28 9999MD2 BINF -999999999
29 99999
30 EXLF
31 ARQV GRAV SUBS AREG NOVO
32 1
33 FIM
```

Desenvolvimento de rotinas auxiliares

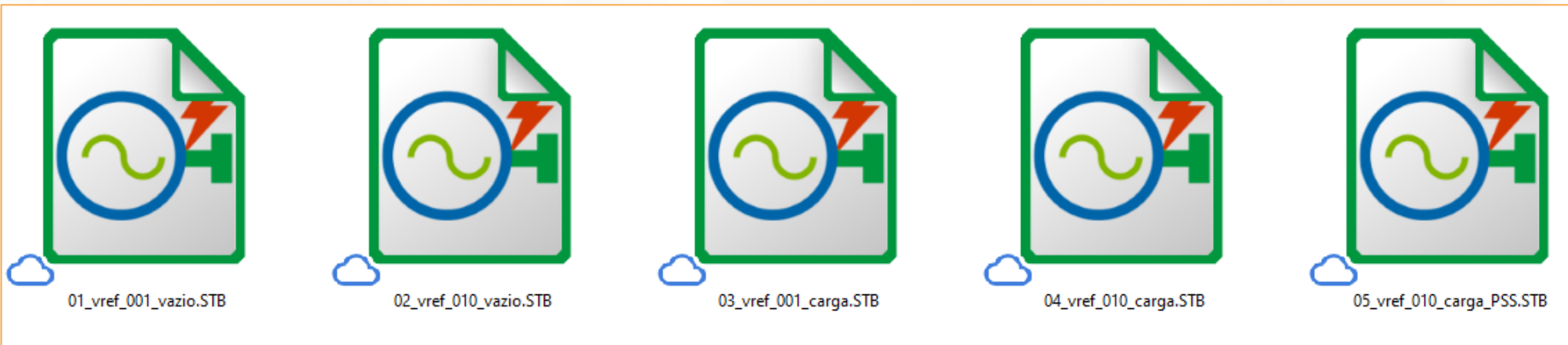
Geração de arquivo ANAREDE (.sav) para cada sistema:



Desenvolvimento de rotinas auxiliares

Produção dos modelos de testes do ANATEM:

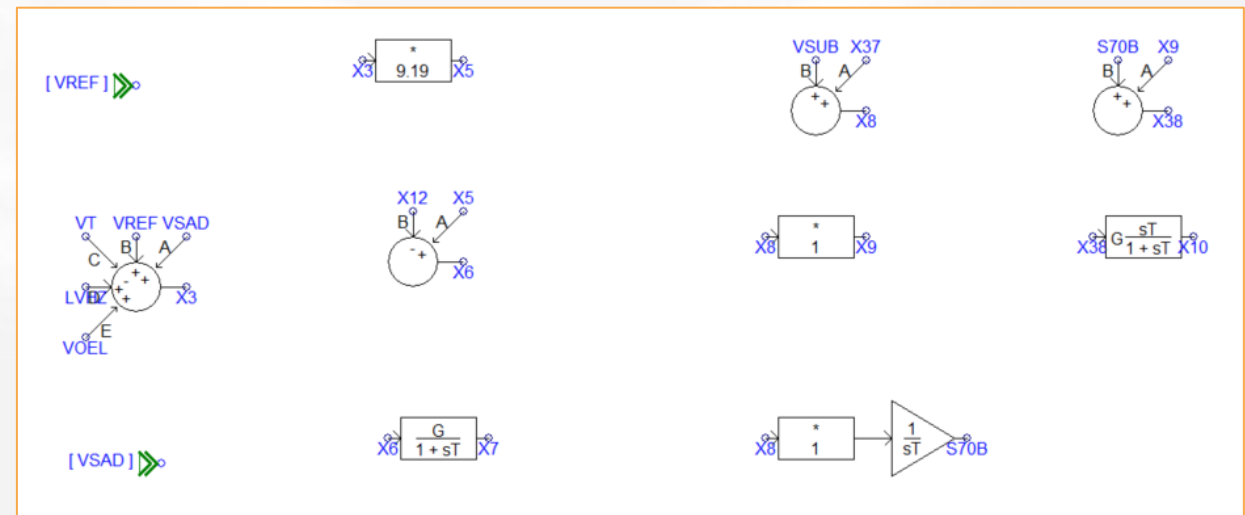
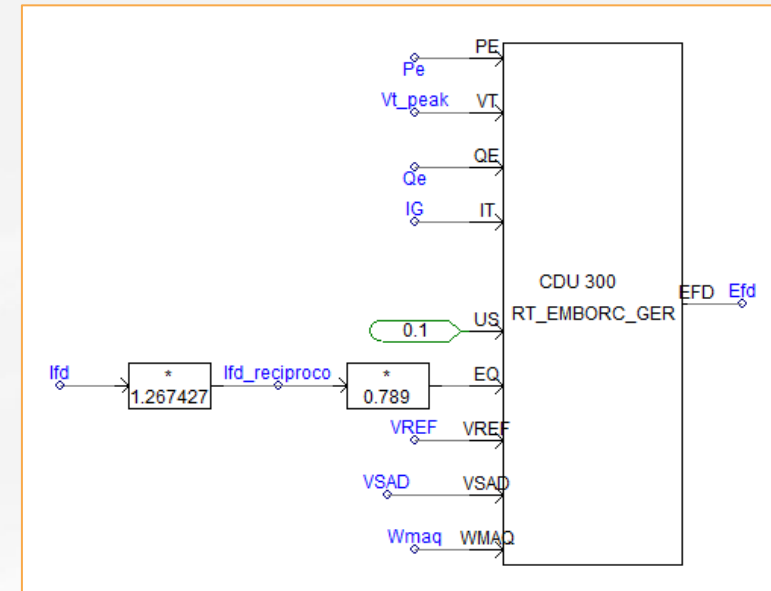
- Eventos programados;
- Associação com CDU e BLT.



Desenvolvimento de rotinas auxiliares

Transferência de CDU para PSCAD:

```
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (
(
0002 ENTRAD      Vref
0003 SOMA        Vsad X3      Vref X3
                -Vt X3
                LVHz X3
                Voel X3
0004 IMPORT VSAD  Vsad
0005 GANHO        X3 X5      #us
0006 SOMA        X5 X6
                -X12 X6
0007 LEDLAG       X6 X7      #Ka      1.0#Ta
0008 SOMA        X37 X8
                Vsub X8
0009 GANHO        X8 X9      #Bex
0001 PROINT       X8 S70B    1.0      #S70B
0038 SOMA        X9 X38
                S70B X38
0010 WSHOUT       X38 X10    #Tse      1.0#Tse
```



2ª Etapa

Transferir os modelos dinâmicos para a rede
estática



2ª Etapa

Transferir os modelos dinâmicos para o Produto 01:

- Ajuste das variáveis dos **CERs**:
 - Referência de tensão.
- Ajuste das variáveis das **máquinas**:
 - Tensão e ângulo;
 - Quantidade de máquinas sincronizadas;
 - Ajuste da reatância dos transformadores.

2ª Etapa

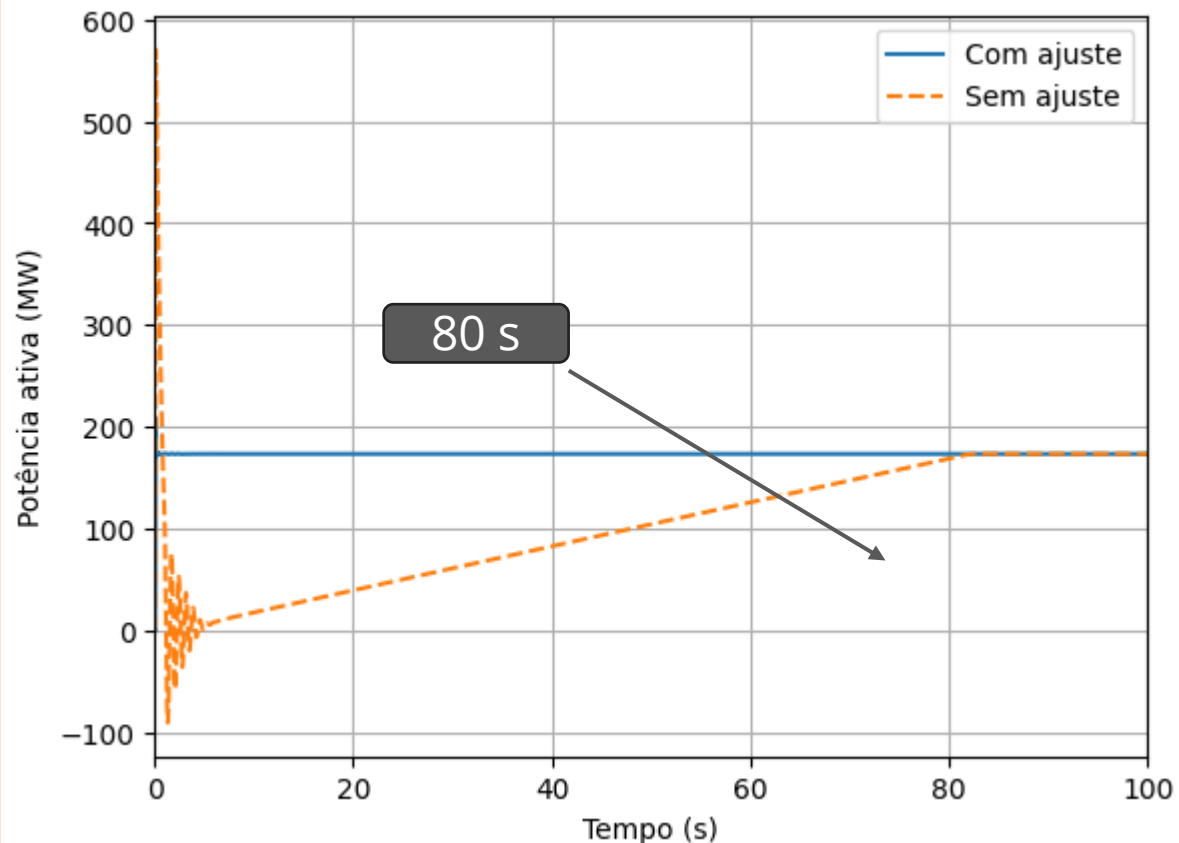
Transferir os modelos dinâmicos para o Produto 01:

- Ajustes para facilitar a **inicialização**:
 - Ajustar o valor inicial das variáveis de estados mais lentas;
 - Bloqueio temporário do PSS;
 - Bloqueio ou by-pass temporário de qualquer variável que facilite a inicialização.

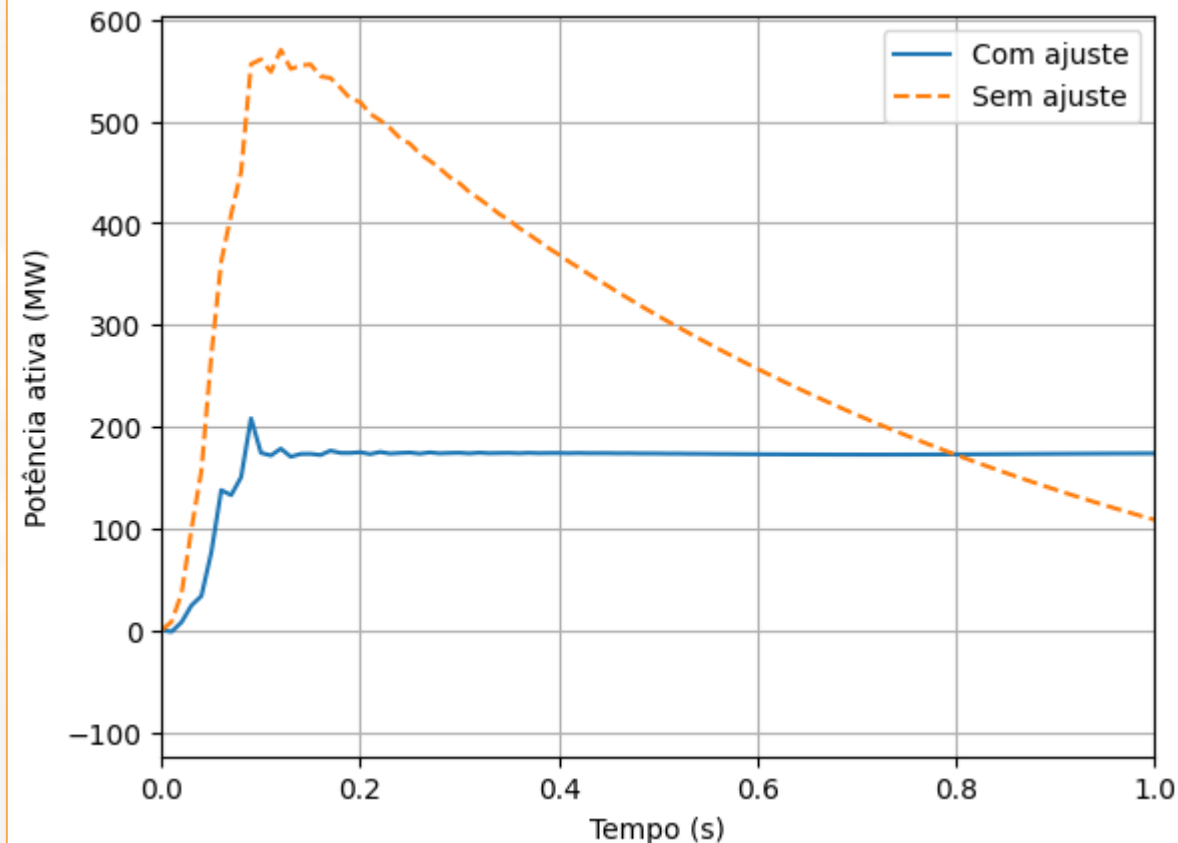
2ª Etapa - Inicialização das Máquinas

Exemplo de uma máquina X barra infinita:

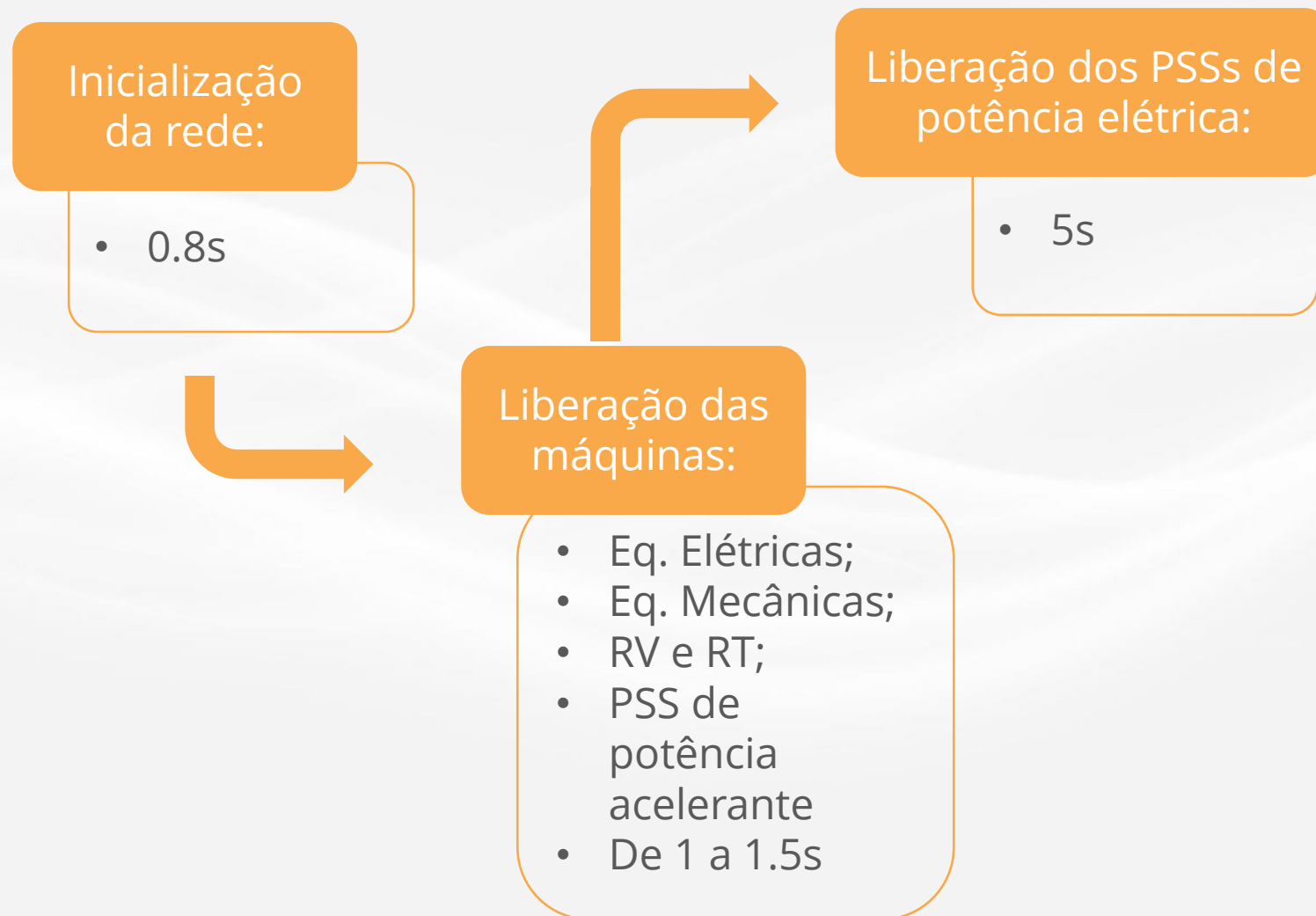
Potência ativa (MW)



Potência ativa zoom (MW)



2ª Etapa - Inicialização do sistema



Produto 2

Conclusão parcial:

- Equipamentos dinâmicos foram modelados e validados para a rede retida:
 - Geradores e compensadores síncronos;
 - Compensadores estáticos de reativo.
- Programas auxiliares foram desenvolvidos;
- Transferência dos equipamentos dinâmicos para rede completa:
 - Ajustes para facilitar a inicialização.

Produto 03:

Inclusão dos modelos dinâmicos de elos em corrente contínua no Produto 02 e comparação com ANATEM

Objetivos

Ajustar o elo Graça Aranha – Silvânia:

- Baseado no modelo padrão EPE [1];
- Comparar com ANATEM.

Transferir os elos para o modelo desenvolvido no Produto 02:

- Comparar com ANATEM.

[1] - EPE, "Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste - Elo de corrente Contínua 800kV Xingu - Terminal Rio - Relatório R2", 2014.

Modelo do Elo

Modelo padrão EPE:

- Desenvolvido por Don. Menzies;
- Utilizado nos estudos do bipolo Xingu.

Controle de potência de Bipolo (BPC):

- Compensação rápida de potência após perda de um polo:
 - Controle de sobrecarga.
- Manutenção da potência CC constante durante variações lentas de tensão CA.

Modelo do Elo

Controle a nível de polo:

- Inclui o sistema de disparo das válvulas (PLL);
- Controle de corrente de polo (CCA);
- Controle de tensão de polo (VCA).

Comparação ANATEM X PSCAD

ANATEM:

- O comando **APCC** simula um curto-circuito 1ϕ ;
- Calcula-se uma **impedância** de falta **aproximada**;
- **Afundamento** de tensão aproximado até 0.7 pu.

PSCAD:

- Aplica-se um curto-circuito 3ϕ com a mesma impedância de falta.

Desenvolvimento do produto 3

1ª Etapa:

- Elo Graça Aranha – Silvânia conectado por equivalentes:
 - Ajuste;
 - **Comparação** com ANATEM.

2ª Etapa:

- Consolidação do Produto 3:
 - **Transferência** dos elos para o Produto 2 (rede completa);
 - **Comparação** com o ANATEM.

1ª Etapa

Ajuste e comparação do elo Graça Aranha –
Silvânia com equivalentes thévenin

1ª Etapa – Ajuste e comparação do elo

Características do elo Graça Aranha – Silvânia:

- Modelo **Padrão EPE** utilizados em estudos passados;
- Parâmetros:
 - $P_{dc} = 5000 \text{ MW}$;
 - $V_{dc} = \pm 800 \text{ kV}$;
 - $L \approx 1468 \text{ km}$.

1ª Etapa - Ajuste e comparação do elo

Elo Graça Aranha – Silvânia :

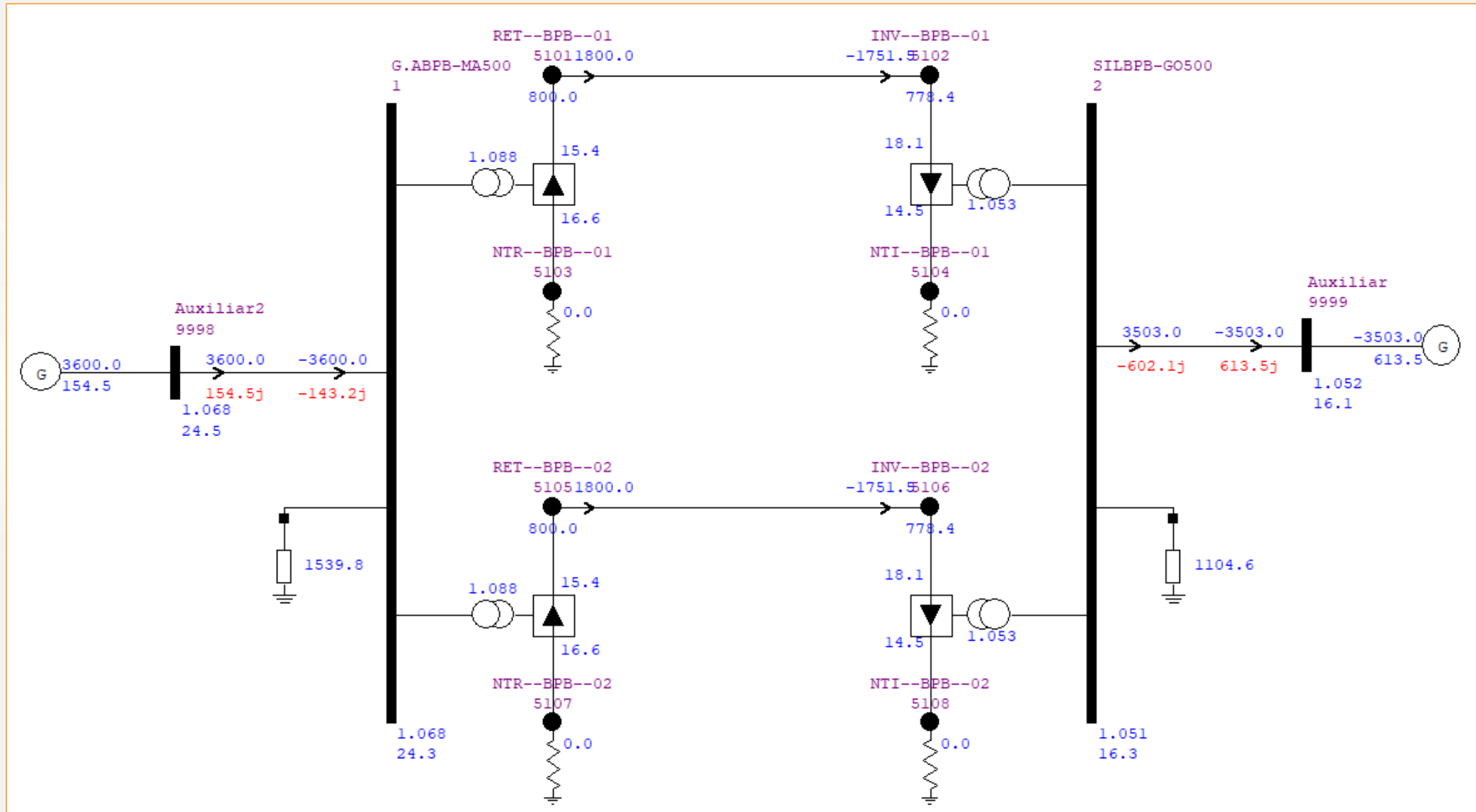
- Ajuste dos parâmetros do **VDCOL**:
 - I_o^{min} ;
 - T_d^{up} .
- Ajuste **dos parâmetros do PI** do controle de corrente;
- Adequação dos **filtros passivos**;
- Modelagem da malha de **sobrecarga temporária**.

1ª Etapa - Ajuste e comparação do elo

Comparação do elo Graça Aranha – Silvânia com ANATEM:

- Aplicação de **eventos**:
 - Degrau na referência de potência de 5%;
 - Bloqueio do Polo 2;
 - Curto-circuito trifásico na inversora:
 - Tensão remanescente de 0.2 pu;
 - Tensão remanescente de 0.7 pu.

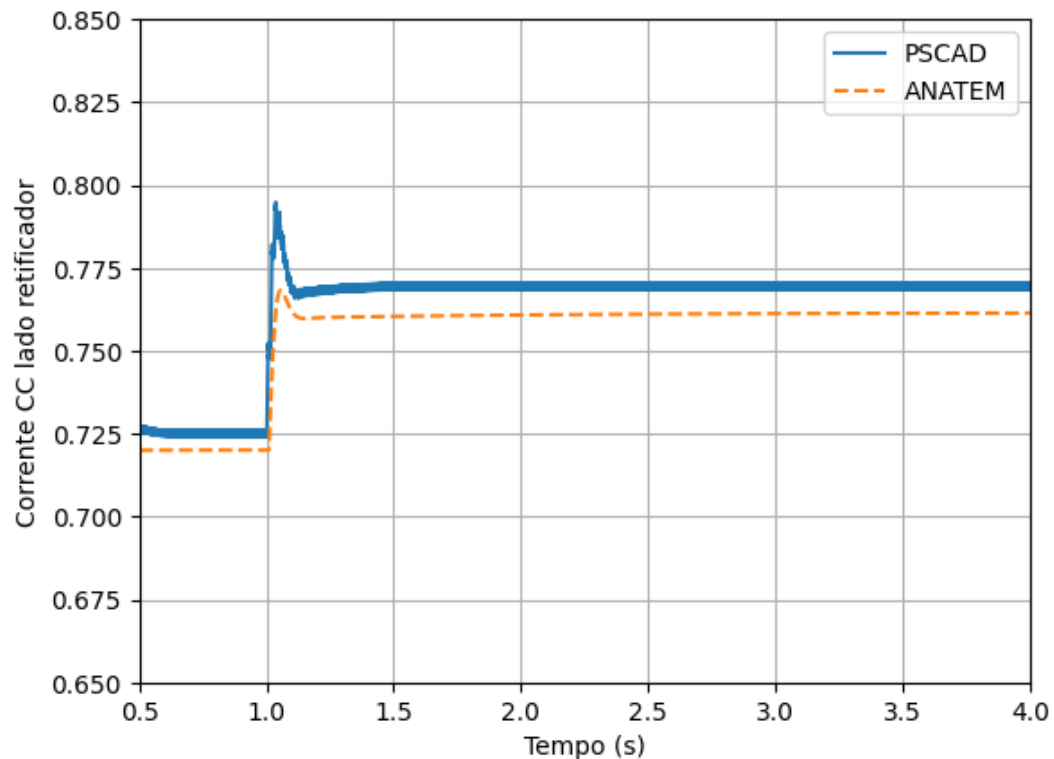
1ª Etapa - Ajuste e comparação do elo



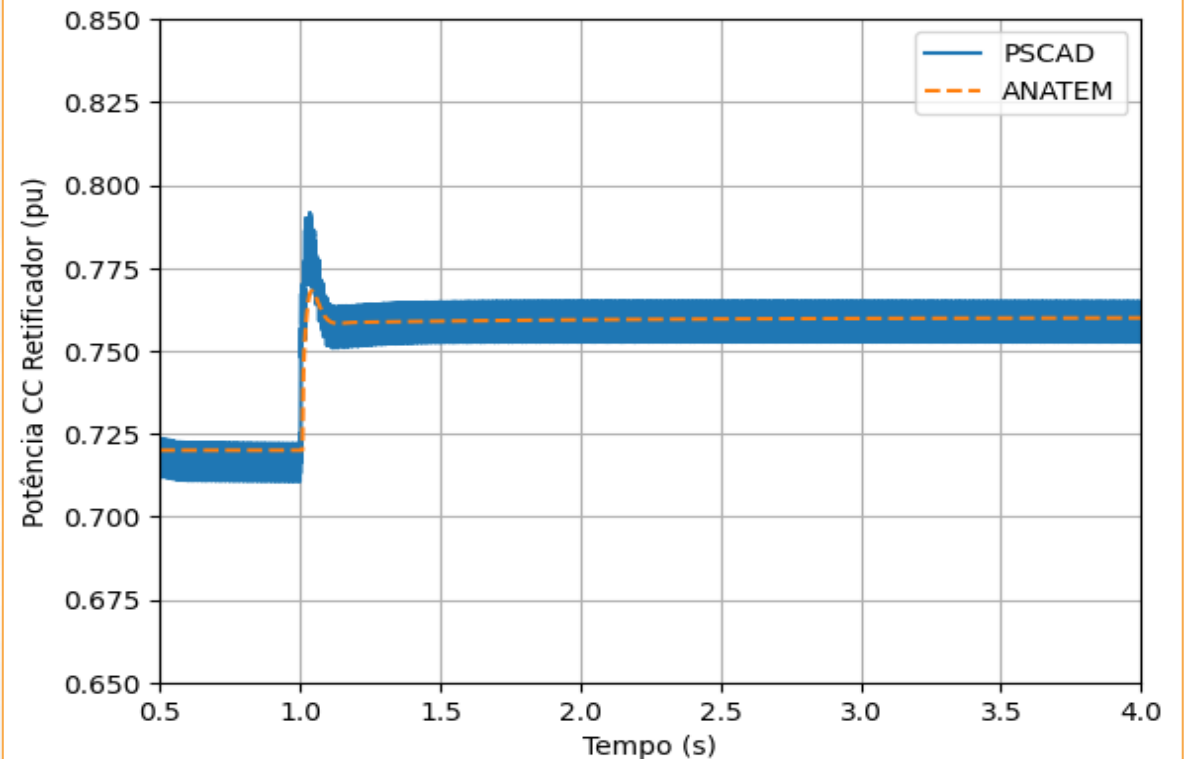
1ª Etapa - Ajuste e comparação do elo

Degrau na referência de potência de 5%:

Corrente CC retificador (pu)



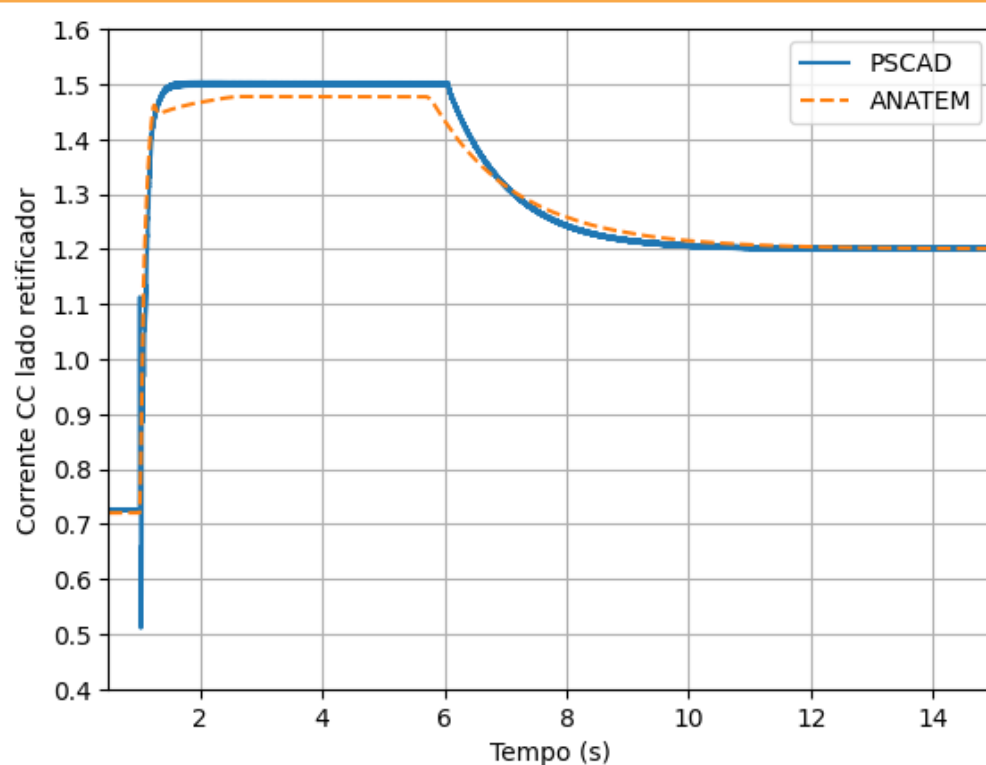
Potência CC retificador (pu)



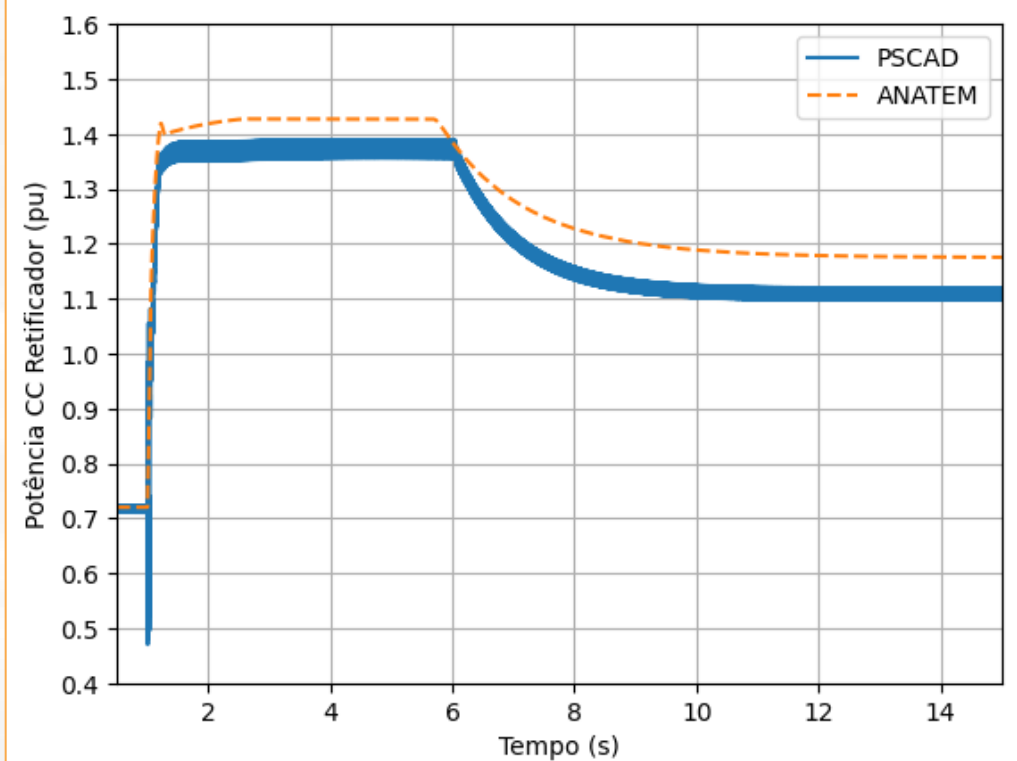
1ª Etapa - Ajuste e comparação do elo

Bloqueio do polo 2:

Corrente CC retificador (pu)



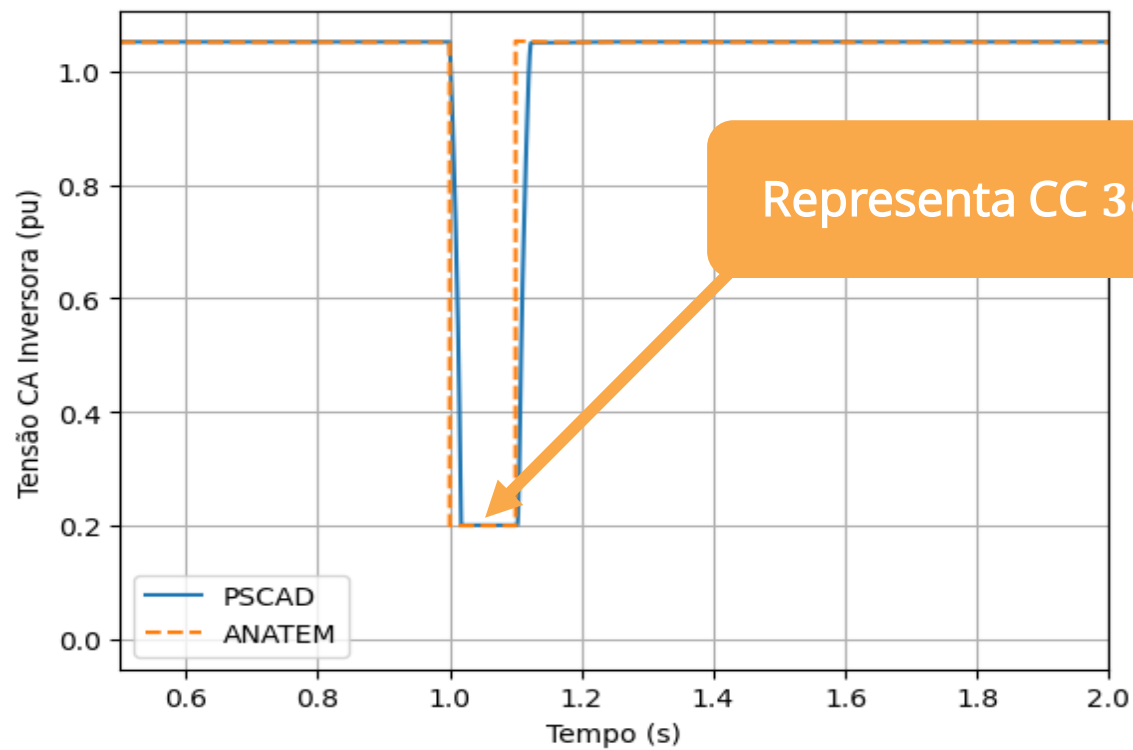
Potência CC retificador (pu)



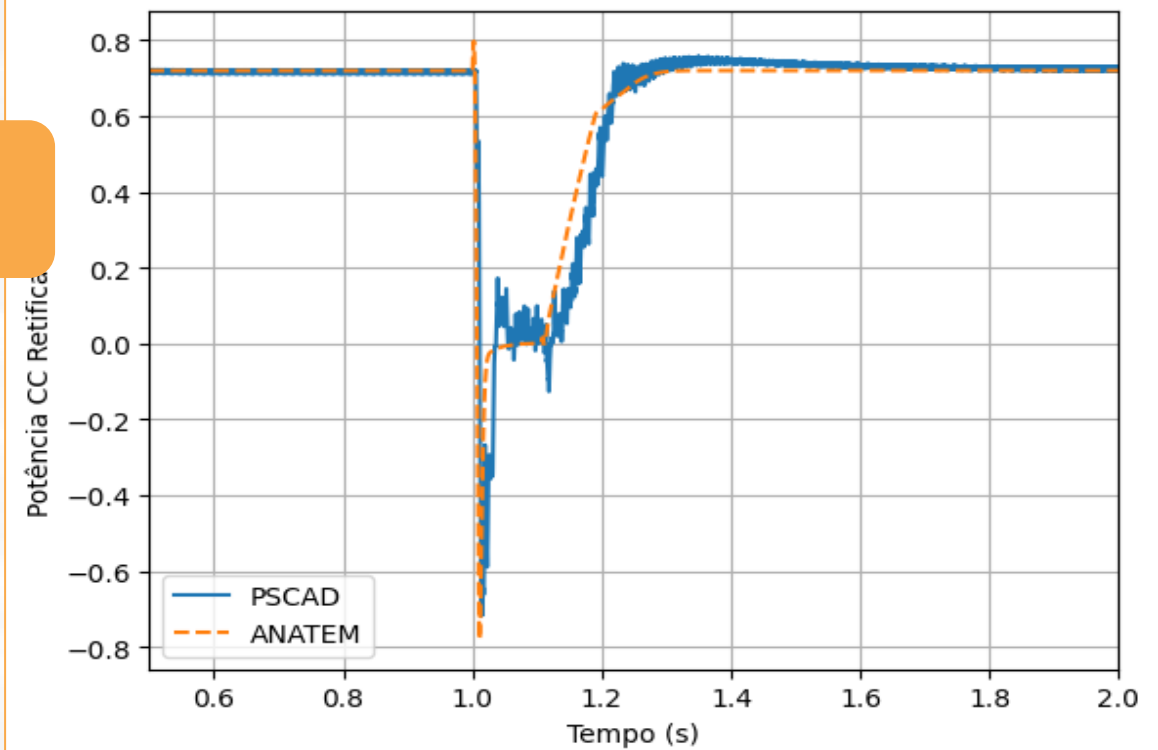
1ª Etapa - Ajuste e comparação do elo

Curto-circuito na inversora com tensão remanescente de 0.2 pu:

Tensão CA inversora (pu)

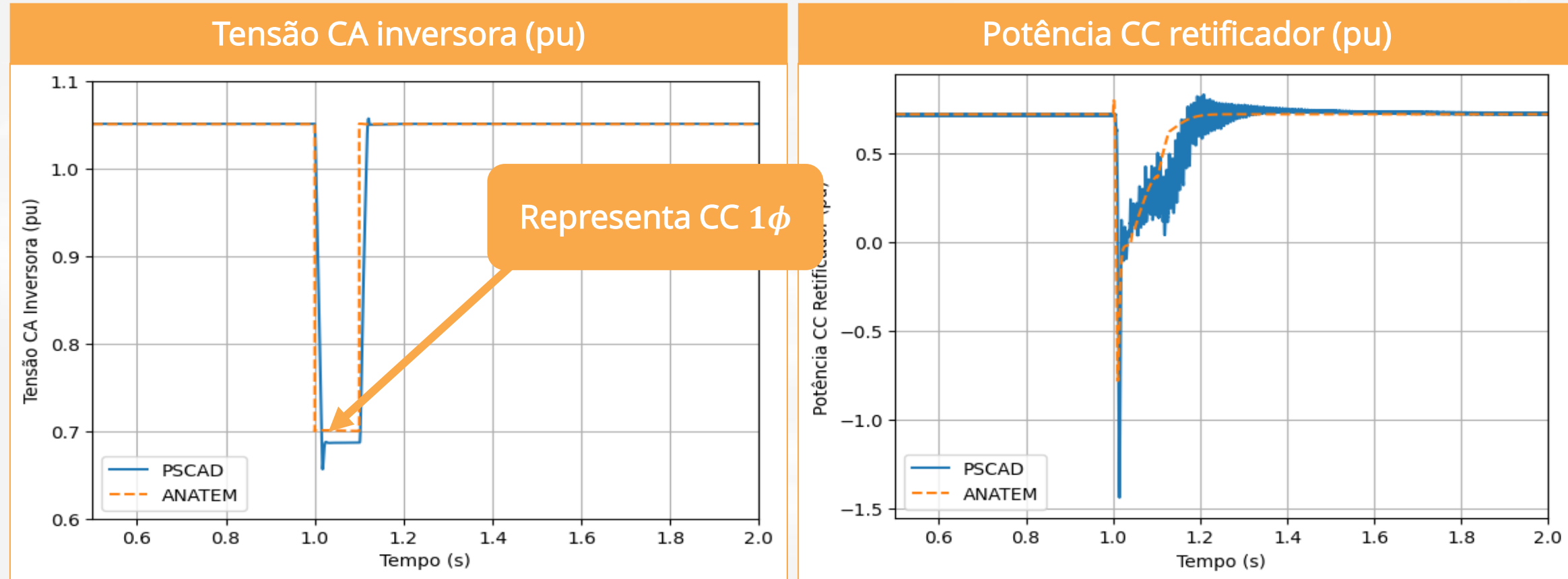


Potência CC retificador (pu)



1ª Etapa - Ajuste e comparação do elo

Curto-circuito na inversora com tensão remanescente de 0.7 pu:



2ª Etapa

Inserção dos Bipolos na rede e comparação da rede com o ANATEM

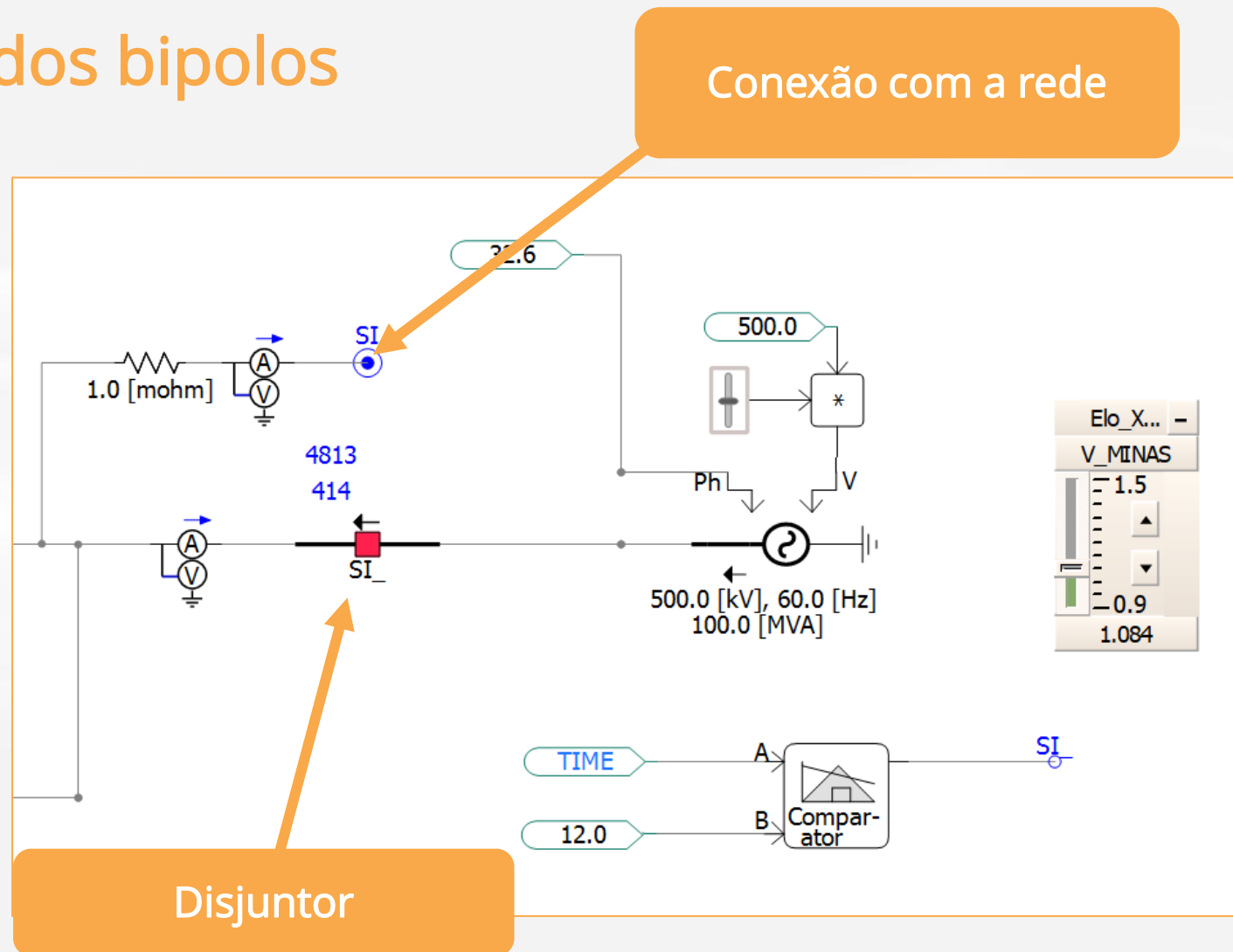


Inicialização dos Bipolos

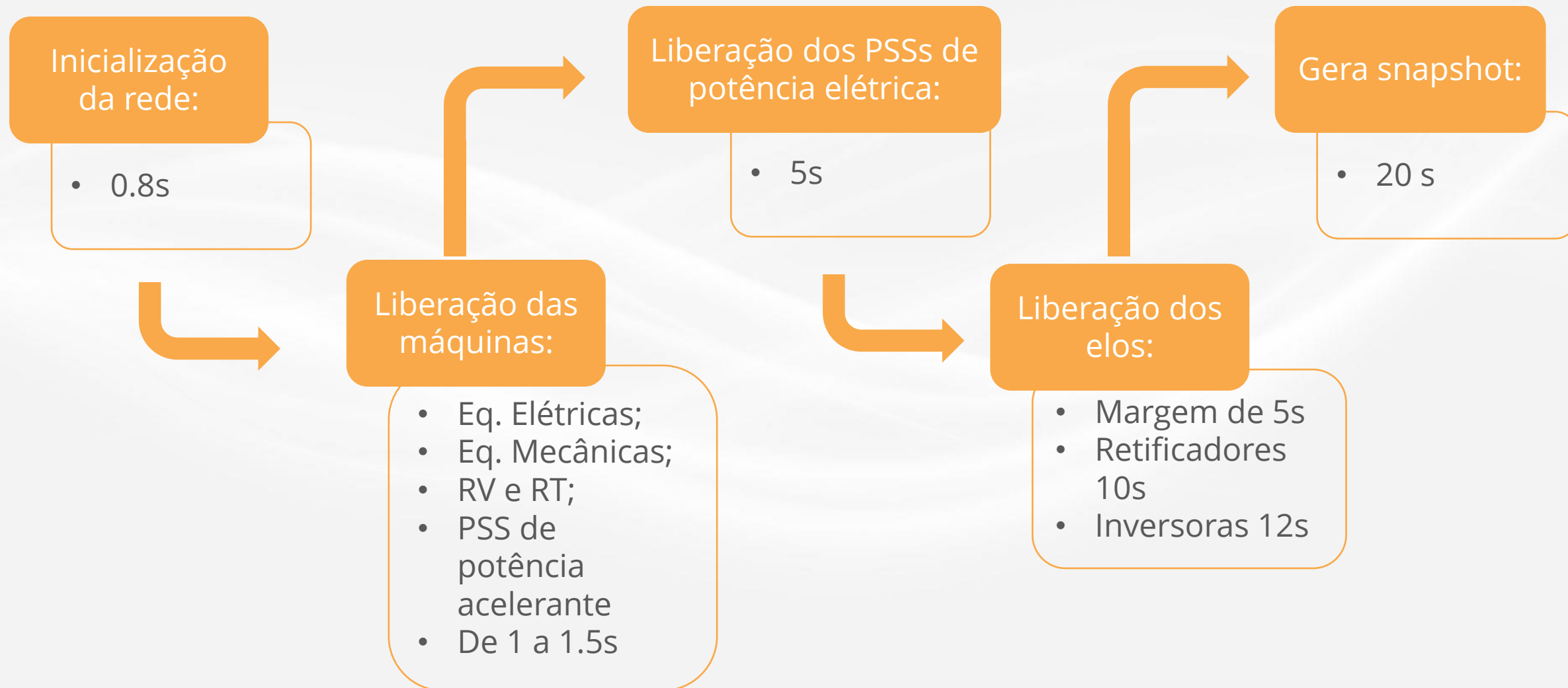


2ª Etapa

Inicialização dos bipolos



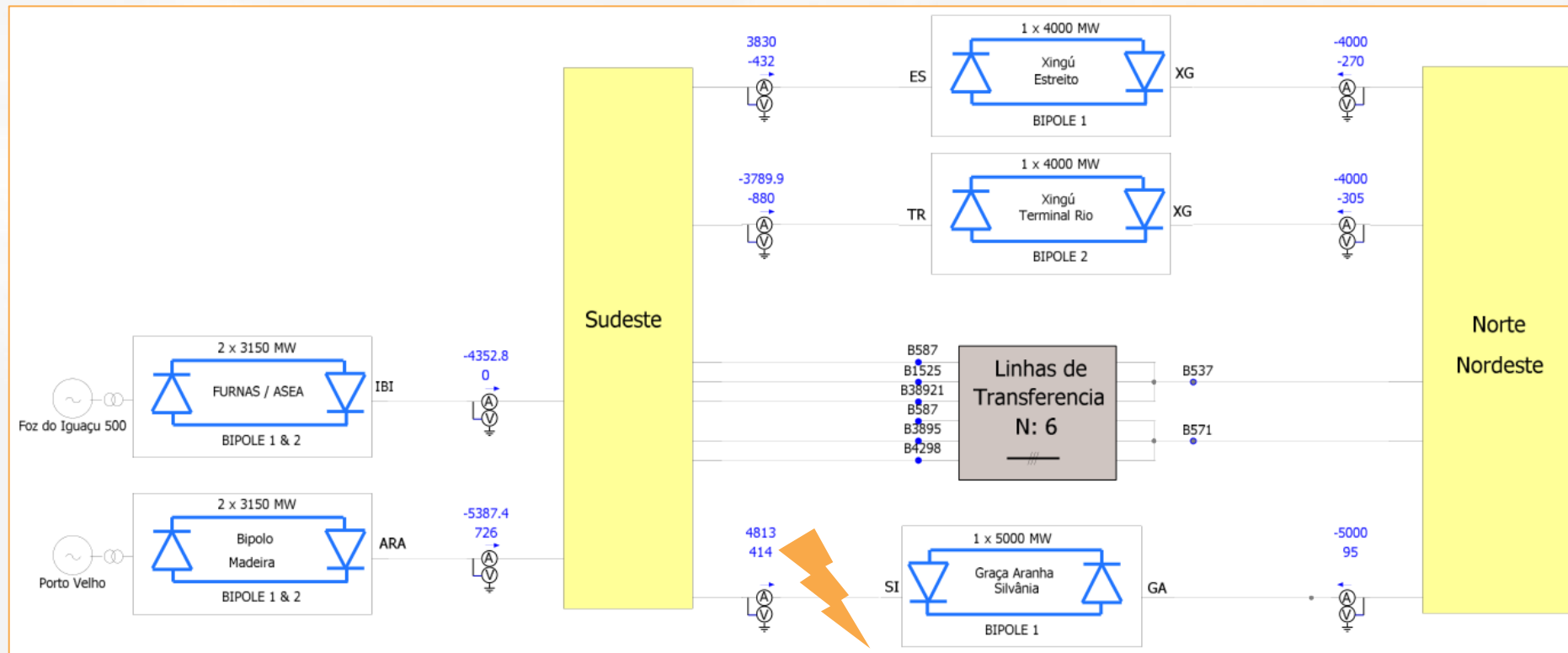
2ª Etapa - Inicialização do sistema



2ª Etapa

Comparação da rede completa com o ANATEM:

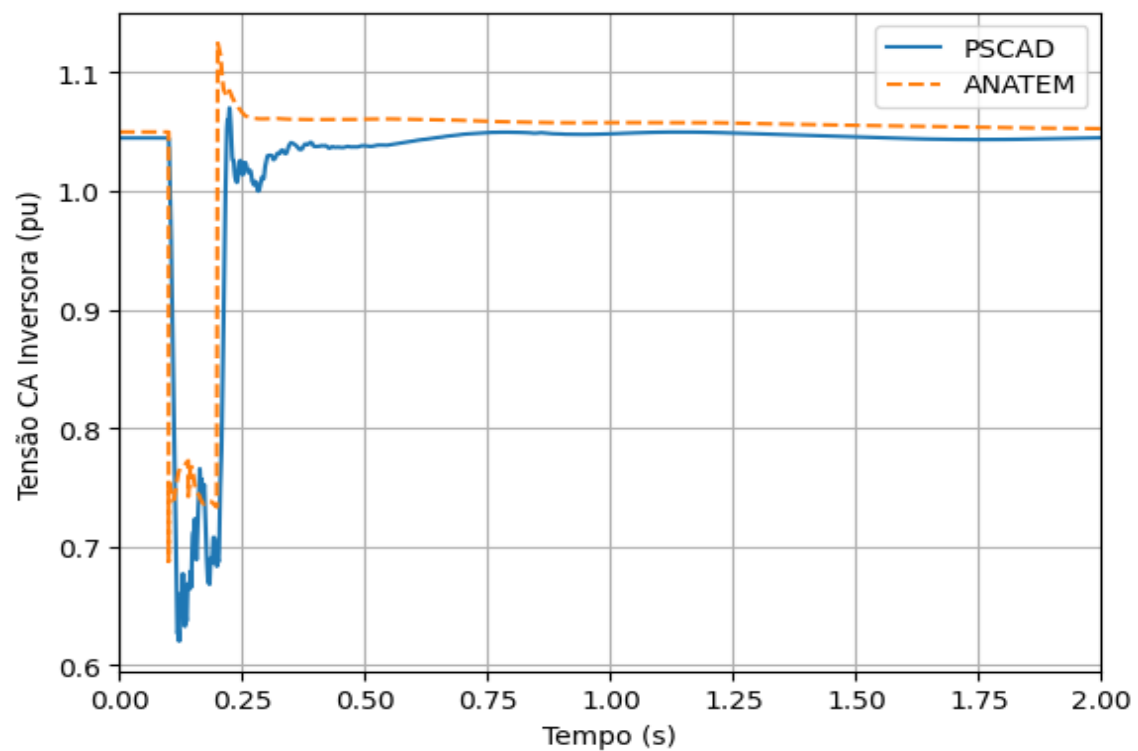
- Aplicação de **curto-circuito** na inversora do elo Graça Aranha – Silvânia para cada cenário.



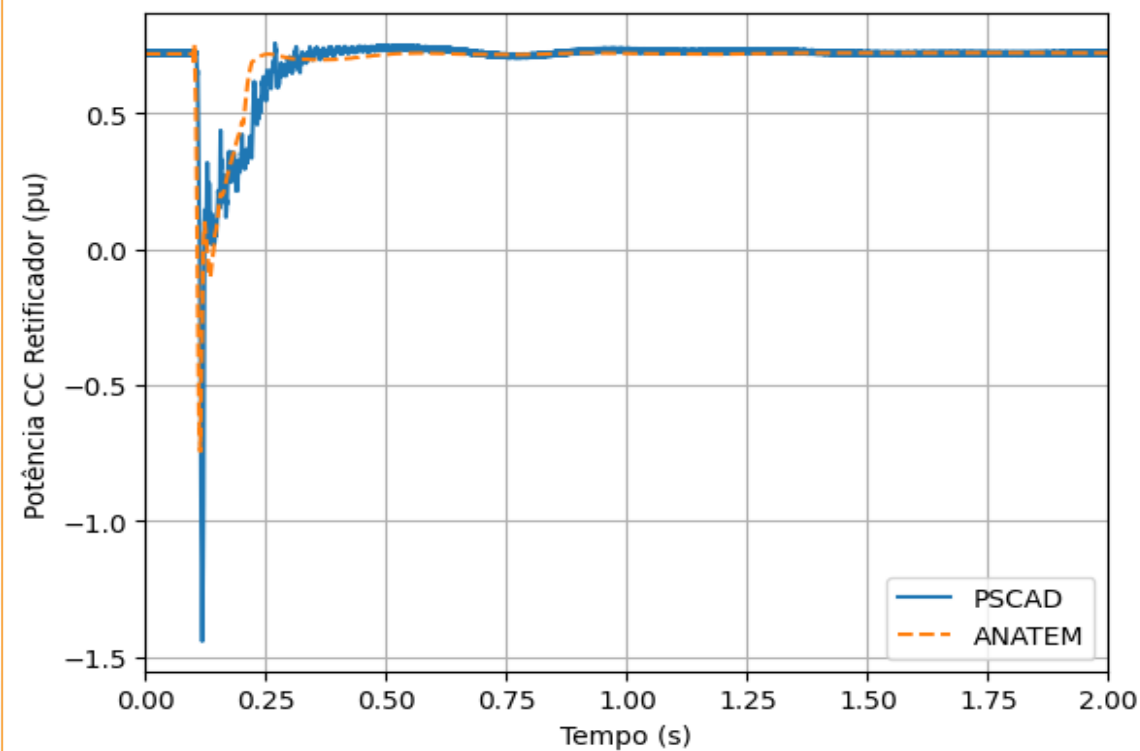
2ª Etapa – Comparação com ANATEM

CEN1 – Leve:

Tensão CA inversora (pu)



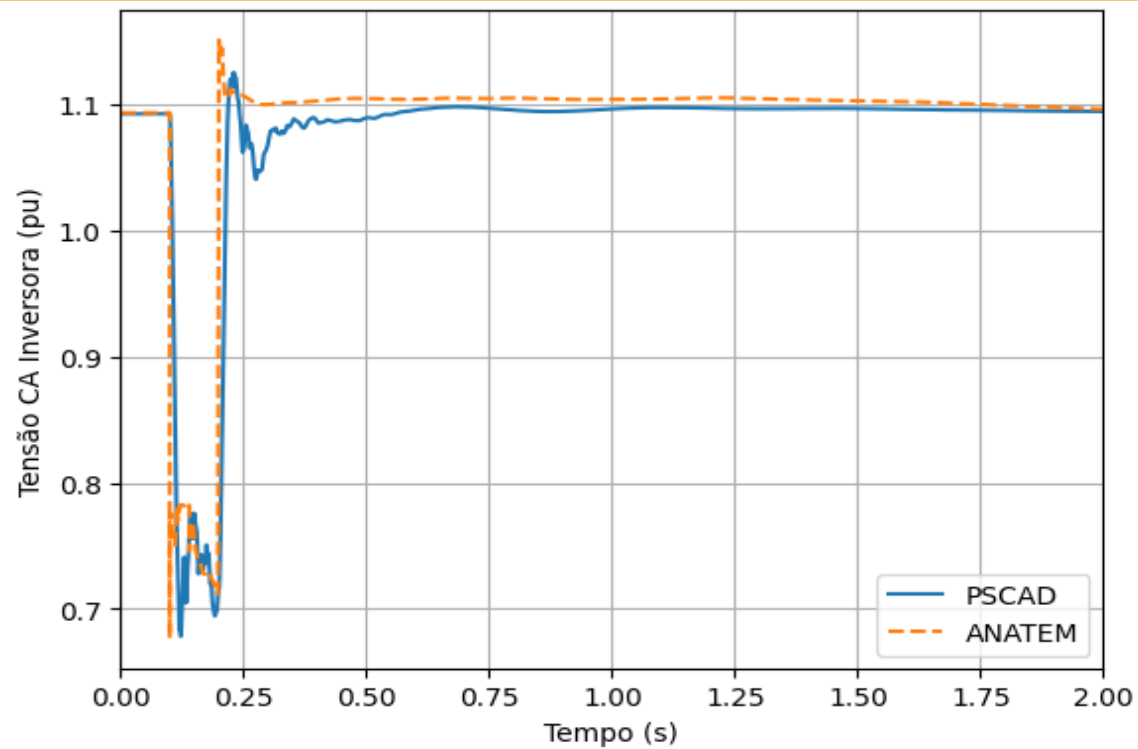
Potência CC retificador (pu)



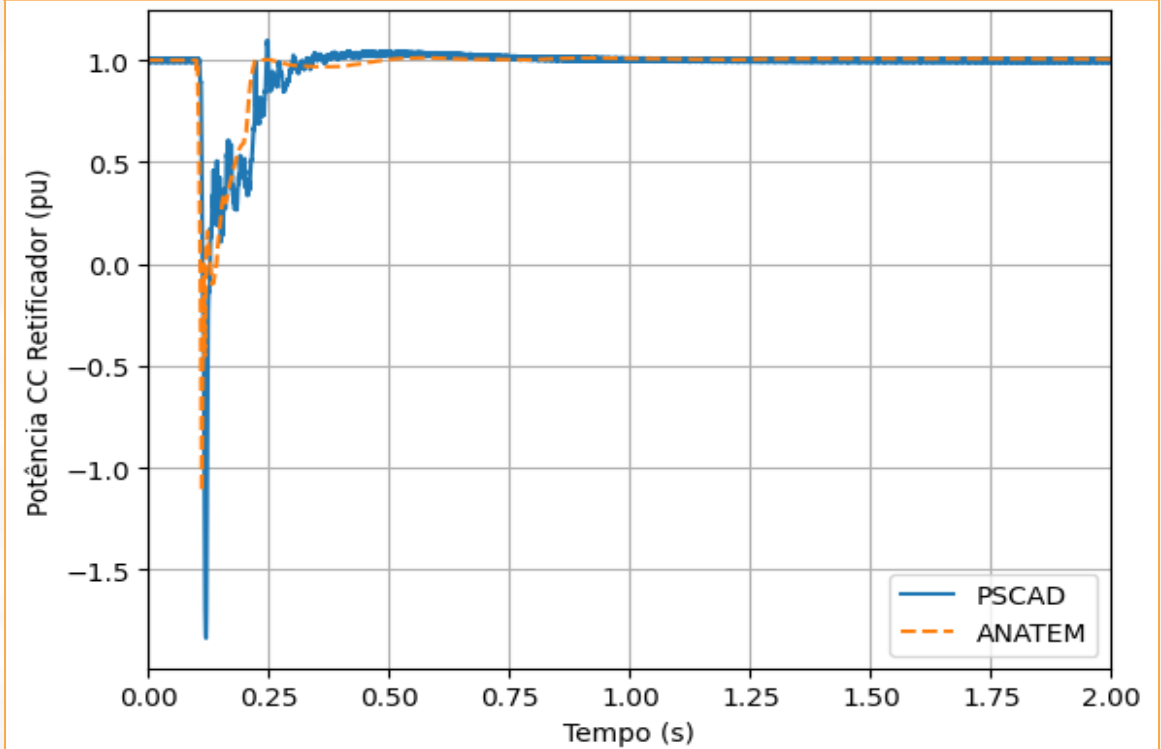
2ª Etapa – Comparação com ANATEM

CEN1 – Média:

Tensão CA inversora (pu)



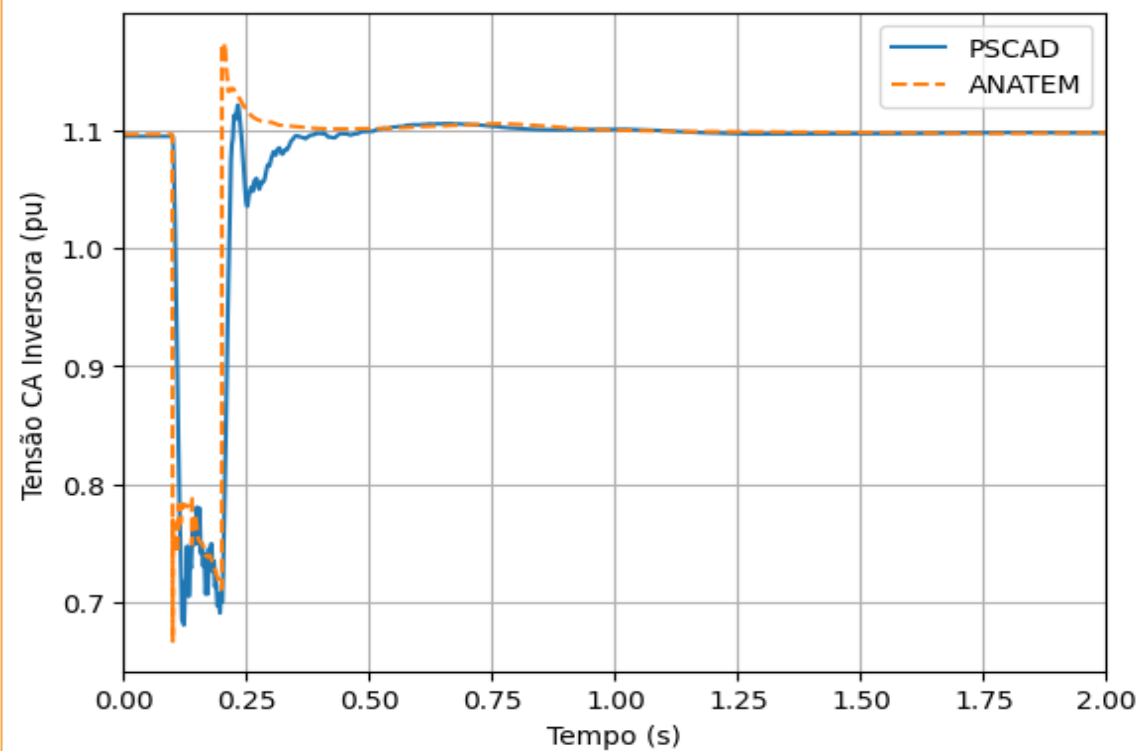
Potência CC retificador (pu)



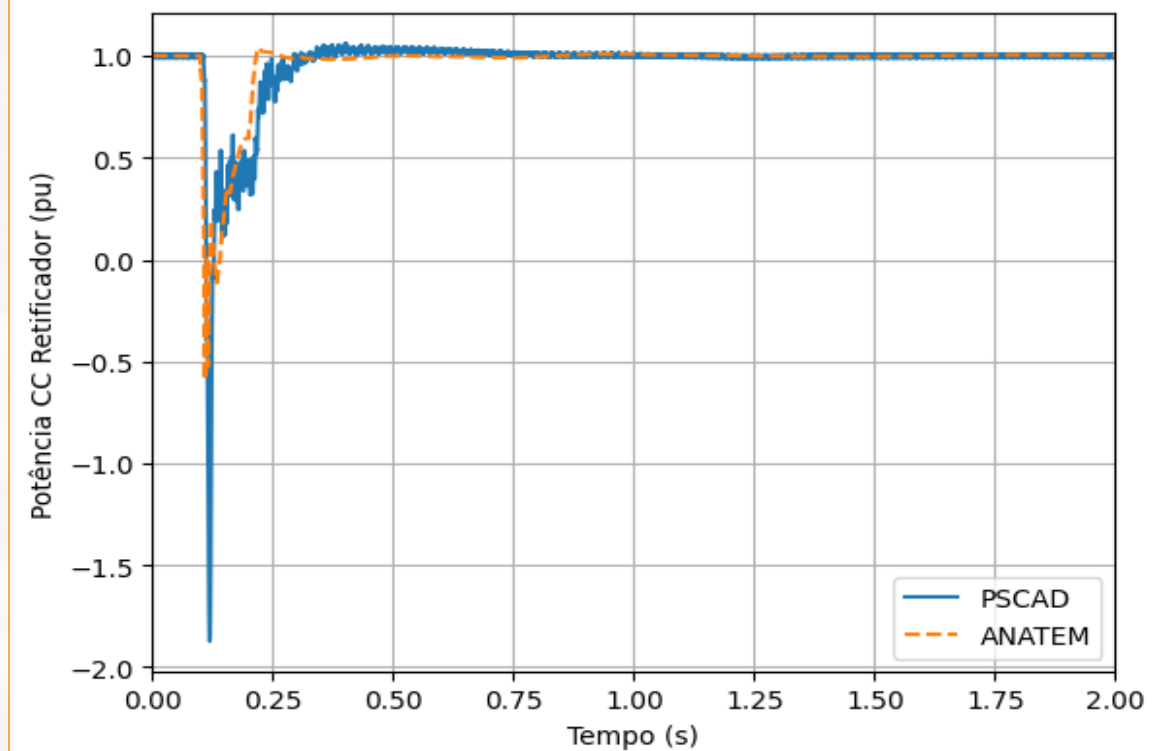
2ª Etapa – Comparação com ANATEM

CEN2 – Média:

Tensão CA inversora (pu)



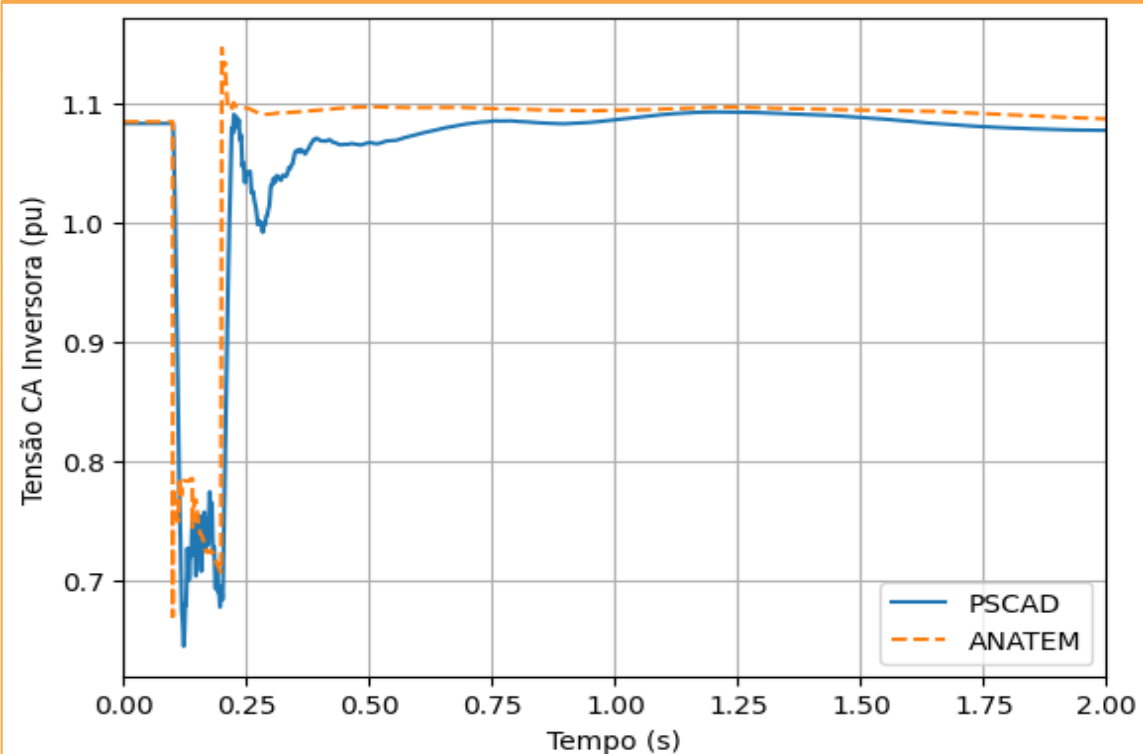
Potência CC retificador (pu)



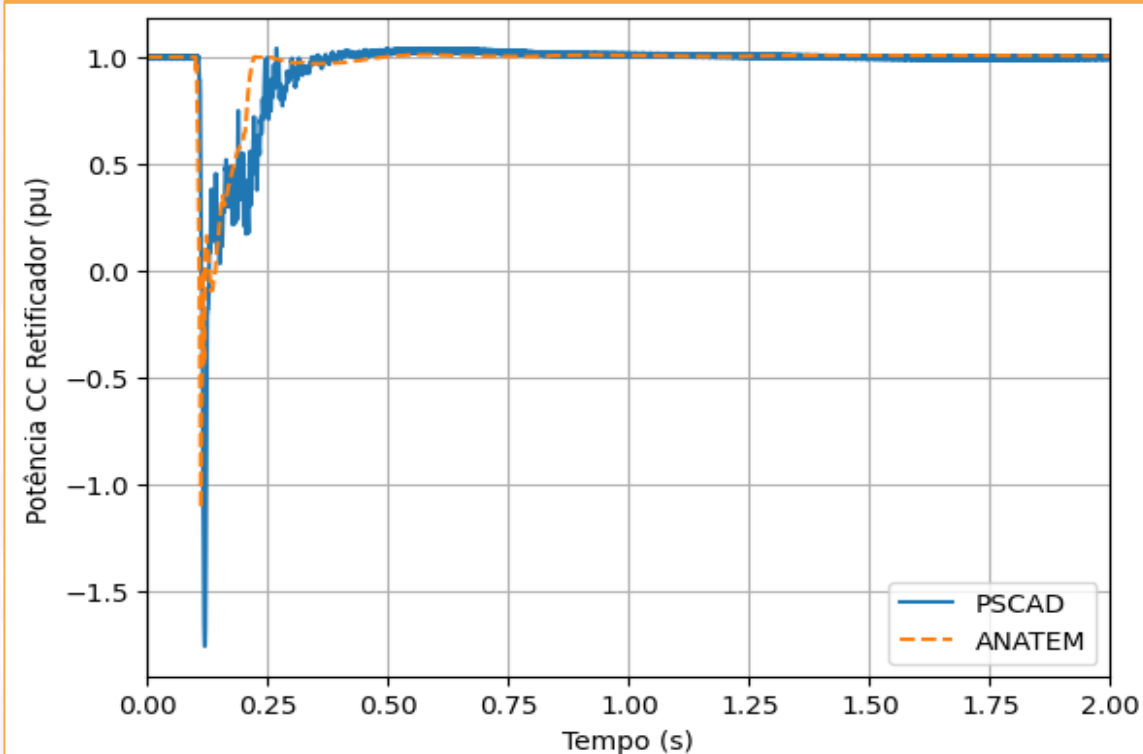
2ª Etapa – Comparação com ANATEM

CEN3 – Média:

Tensão CA inversora (pu)



Potência CC retificador (pu)



Produto 3

Comparação do elo Graça Aranha – Silvânia com ANATEM:

- Diferenças são esperadas:
 - PSCAD possui modelo detalhado do elo.
 - ANATEM utiliza as equações de regime permanente.

Produto 3

Conclusão parcial

- Ajuste e comparação do modelo genérico de elo no PSCAD:
 - Ajuste dos parâmetros em relação aos do ANATEM.
 - Comparação com o ANATEM.
- Inserção dos elos na rede do produto 02 e comparação com o ANATEM.

Desenvolvimento dos modelos de rede para a concepção do Bipolo Graça Aranha - Silvânia

Conclusão

- Foi desenvolvida uma rede elétrica representativa do sistema elétrico Brasileiro para estudos de *Multi-infeed*;
- Validações foram realizadas:
 - Os erros encontrados encontram-se dentro das faixas de tolerância.
- Comparação da rede completa com o ANATEM:
 - O comportamento dinâmico obtido apresenta aderência com o ANATEM.
- Portanto, o modelo pode ser considerado representativo e pode ser utilizado nos estudos de análise de interação *Multi-infeed*.



contato@jordaoenergia.com.br



+55 21 2413-5743 / 96777-5790



Av. Rio Branco, 120 - Grupo 830, Centro, Rio de Janeiro/RJ
CEP 20.040-001



www.jordaoenergia.com.br