

Fluxo de Carga em Sistemas Elétricos

Análise do Sistema-Teste Brasileiro de 9 Barras (STB-9)

Daniel Loula Souza Dourado
José Vanilson de Brito Junior
Kildary Jonathan Silva Leite
Marcos Aurélio Pinheiro Leal
Melquisedeque Leite e Silva
Nicholas Gomes da Costa

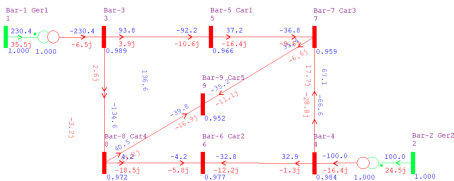
Professor: Huilman Sanca Sanca

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Disciplina: Sistemas Elétricos (2025.2)

- Introdução
- Convergência do Caso Base
- Formulação da Matriz Ybus
- Reforço Topológico com Linha 3–9
- Inserção de Geração Eólica na Barra 7
- Dispositivos FACTS

Convergência do Caso Base

- Ao montar o circuito e colocar os dados no ANAREDE, foi possível observar as seguintes informações de tensão e fluxo de potência nas barras.



Barra	Nome	Mod. (pu)	Ang. (°)	Pg/Pt (MW)
1	Bar-1 Ger1 (Slack)	1,000	0,0	230,4 (Gen)
2	Bar-2 Ger2 (PV)	1,000	-8,4	100,0 (Gen)
3	Bar-3 (PQ)	0,989	-6,8	-
4	Bar-4 (PQ)	0,984	-12,6	-
5	Bar-5 Carl (PQ)	0,966	-11,9	55,0 (Carga)
6	Bar-6 Car2 (PQ)	0,977	-14,0	37,0 (Carga)
7	Bar-7 Car3 (PQ)	0,959	-15,7	68,0 (Carga)
8	Bar-8 Car4 (PQ)	0,972	-13,7	90,0 (Carga)
9	Bar-9 Car5 (PQ)	0,952	-17,9	75,0 (Carga)

Ramo (i-j)	P_{ij} (MW)	Q_{ij} (Mvar)	P_{ji} (MW)	Q_{ji} (Mvar)
1-3	230,4	35,5	-230,4	-6,5
2-4	100,0	24,5	-100,0	-16,4
3-5	93,8	3,9	-92,2	-10,6
3-8	136,6	2,6	-134,6	-3,2
4-6	32,9	-1,3	-32,8	-12,2
4-7	67,1	17,7	-66,6	-28,8
5-7	37,2	-16,4	-36,8	-9,5
6-8	-4,2	-5,8	4,2	-18,5
7-9	35,4	-6,6	-35,2	-11,1
8-9	40,5	-13,2	-39,8	-16,9

Diagrama unifilar do STB-9

Tensões nas barras

Fluxos bidirecionais

Fonte: Simulações no ANAREDE.

Formulação da Matriz Ybus

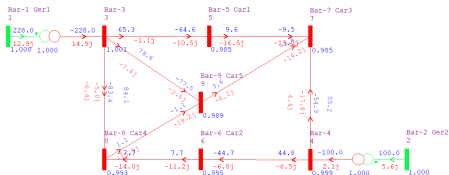
- Os dados das linhas foram obtidos do relatório do ANAREDE, e um script em Python foi desenvolvido para gerar a matriz admitância. O código está disponível no repositório abaixo:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,00000 - j18,72659	0	0,00000 + j18,72659	0	0	0	0	0	0
2	0	0,00000 - j13,02083	0	0,00000 + j13,02083	0	0	0	0	0
3	0,00000 + j18,72659	0	3,30738 - j40,67437	0	-1,94219 + j10,51068	0	0	-1,36519 + j11,60410	0
4	0	0,00000 + j13,02083	0	3,04072 - j39,05936	0	-1,61712 + j13,69798	-1,42360 + j12,49605	0	0
5	0	0	-1,94219 + j10,51068	0	3,12980 - j16,25382	0	-1,18760 + j5,97513	0	0
6	0	0	0	-1,61712 + j13,69798	0	3,14980 - j25,19953	0	-1,53267 + j11,70405	0
7	0	0	0	-1,42360 + j12,49605	-1,18760 + j5,97513	0	3,76629 - j27,91695	0	-1,15509 + j9,78427
8	0	0	-1,36519 + j11,60410	0	0	-1,53267 + j11,70405	0	4,17987 - j28,50140	-1,28201 + j5,58824
9	0	0	0	0	0	0	-1,15509 + j9,78427	-1,28201 + j5,58824	2,43710 - j15,08902



Reforço Topológico (Linha 3–9): Tensões e Fluxos

- Observa-se melhoria geral do perfil de tensão nas barras de carga, especialmente nas barras terminais (8 e 9), que passam a operar com módulos mais elevados.



Barra	Nome	Mod. (pu)	Ang. (°)	Pg/Pi (MW)
1	Bar-1 Ger1	1.000	0.0	228.0 (Gen)
2	Bar-2 Ger2	1.000	-4.5	100.0 (Gen)
3	Bar-3	1.001	-6.7	-
4	Bar-4	0.999	-8.6	-
5	Bar-5 Carl	0.985	-10.1	55.0 (Carga)
6	Bar-6 Car2	0.995	-10.4	37.0 (Carga)
7	Bar-7 Car3	0.985	-11.1	68.0 (Carga)
8	Bar-8 Car4	0.993	-10.8	90.0 (Carga)
9	Bar-9 Car5	0.989	-10.9	75.0 (Carga)

Ramo (i-j)	P_{ij} (MW)	Q_{ij} (Mvar)	P_{ji} (MW)	Q_{ji} (Mvar)
1-3	228.0	12.9	-228.0	14.9
2-4	100.0	5.6	-100.0	2.1
3-5	65.3	-1.1	-64.6	-10.5
3-8	84.1	-6.4	-83.4	-5.0
3-9	78.6	-7.4	-77.5	-2.6
4-6	44.8	-6.5	-44.7	-6.8
4-7	55.2	4.4	-54.9	-17.8
5-7	9.6	-16.5	-9.5	-13.0
6-8	7.7	-11.2	-7.7	-14.0
7-9	-3.6	-14.2	3.6	-6.2
8-9	1.1	-15.9	-1.1	-19.2

Diagrama unifilar do STB-9 com a nova linha 3–9

Tensões nas barras

Fluxos bidirecionais

Fonte: Simulações no ANAREDE.

Matriz Ybus – Caso com Linha 3–9

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$0,00000 - j18,72659$	0	$0,00000 + j18,72659$	0	0	0	0	0	0
2	0	$0,00000 - j13,02083$	0	$0,00000 + j13,02083$	0	0	0	0	0
3	$0,00000 + j18,72659$	0	$5,24957 - j51,10605$	0	$-1,94219 + j10,51068$	0	0	$-1,36519 + j11,60410$	$-1,94219 + j10,51068$
4	0	$0,00000 + j13,02083$	0	$3,04072 - j39,05936$	0	$-1,61712 + j13,69798$	$-1,42360 + j12,49605$	0	0
5	0	0	$-1,94219 + j10,51068$	0	$3,12980 - j16,25382$	0	$-1,18760 + j5,97513$	0	0
6	0	0	0	$-1,61712 + j13,69798$	0	$3,14980 - j25,19953$	0	$-1,53267 + j11,70405$	0
7	0	0	0	$-1,42360 + j12,49605$	$-1,18760 + j5,97513$	0	$3,76629 - j27,91695$	0	$-1,15509 + j9,78427$
8	0	0	$-1,36519 + j11,60410$	0	0	$-1,53267 + j11,70405$	0	$4,17987 - j28,50140$	$-1,28201 + j5,58824$
9	0	0	$-1,94219 + j10,51068$	0	0	0	$-1,15509 + j9,78427$	$-1,28201 + j5,58824$	$4,37929 - j25,52070$

Fonte: Anexo disponibilizado pelo professor.

Dispositivos FACTS

- Desenvolvidos no final da década de 1980 pelo EPRI (EUA) para aumentar a flexibilidade e capacidade de transmissão sem novas linhas.
- Baseados em eletrônica de potência com chaves semicondutoras controladas.
- Permitem regulação de tensão e controle de fluxo de potência ativa e reativa com alta rapidez.

Dois grupos principais:

- **Baseados em tiristores:** reatores controlados, capacitores chaveados (ex: TCSC).
- **Baseados em conversores VSC:** comportam-se como fontes de tensão controlada.

Principais dispositivos FACTS:

- **SVC**: compensador shunt para controle de reativos e regulação de tensão.
- **STATCOM**: compensador shunt VSC, resposta rápida, suporte em baixas tensões.
- **TCSC**: compensador série controlado, ajusta reatância da linha.
- **SSSC**: compensação série VSC, injeta tensão em quadratura com a corrente.
- **UPFC**: combinado série-shunt, controle simultâneo de tensão, impedância e ângulo.

Equipamentos complementares em subestações:

- Bancos de capacitores, reatores shunt, transformadores com OLTC.
- Compensadores síncronos, sistemas de proteção (relés digitais), SCADA e PMUs.