

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)

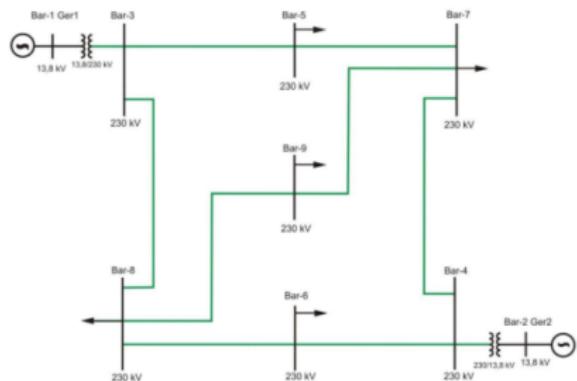
19 de fevereiro de 2026

Sumário

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

Introdução

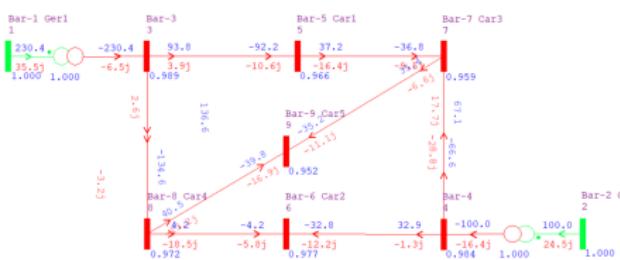
- Trata-se de um circuito elétrico com 9 barras: a Barra 1 é de geração (referência), a Barra 2 é do tipo PV, e as Barras 3 a 9 são do tipo PQ.
- Todos os dados do circuito estão presentes no anexo enviado pelo professor.



Fonte: Anexo disponibilizado pelo professor.

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)	0.986	-12.6	-
5	Bar-5 Carl 1 (PO)	0.965	-11.6	55.0 (Carga)
6	Bar-6 Car2 (PO)	0.977	-14.0	37.0 (Carga)
7	Bar-7 Car3 (PO)	0.959	-15.2	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)

Diagrama unifilar do STB-9

Tensões nas barras

Fluxos bidirecionais

Fonte: Simulações no ANAREDE.

Formulação da Matriz Ybus

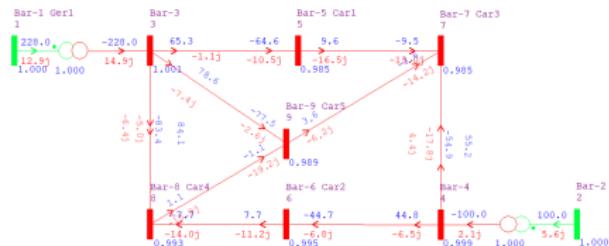
- Os dados das linhas foram obtidos do relatório do ANAREDE, e um script em Python foi desenvolvido para gerar a matriz admitância. O código está disponível no repositório abaixo:

	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.



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
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.

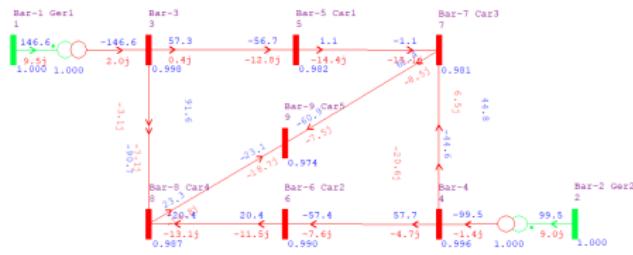
Matriz Ybus – Caso com Linha 3–9

	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.

Inserção de Geração Eólica na Barra 7

- Adicionou-se uma fonte eólica de 80 MW na barra 7 (topologia original do Caso Base).



Barra	Nome	Mod. (pu)	Ang. ($^{\circ}$)	Pg/Pt (MW)
1	Bar-1 Ger1	1,000	-0,0	147,4 (Gen)
2	Bar-2 Ger2	1,000	-1,1	100,0 (Gen)
3	Bar-3	0,992	-4,3	-
4	Bar-4	0,985	-5,3	-
5	Bar-5 Carl	0,970	-7,2	55,0 (Carga)
6	Bar-6 Carl2	0,979	-7,8	37,0 (Carga)
7	Bar-7 Carl3	0,959	-7,2	80,0 (Ger. eólica)
8	Bar-8 Carl4	0,976	-8,8	90,0 (Carga)
9	Bar-9 Carl5	0,955	-10,7	75,0 (Carga)

Ramo (i-j)	P_{ij} (MW)	Q_{ij} (Mvar)	P_{ji} (MW)	Q_{ji} (Mvar)
1-3	147,4	21,5	-147,6	-9,6
2-4	100,0	23,7	-100,0	-15,5
3-5	56,7	6,9	-56,1	-18,9
3-8	90,9	2,7	-90,1	-12,4
4-6	57,5	-4,9	-57,2	-7,0
4-7	42,5	20,4	-42,3	-33,6
5-7	1,1	-8,1	-1,1	-20,3
6-8	20,2	-11,0	-20,1	-13,1
7-9	55,4	-10,9	-55,0	-4,9
8-9	20,2	-9,4	-20,0	-23,1

Diagrama unifilar do STB-9 com Injeção Eólica

Tensões nas barras

Fluxos bidirecionais

Fonte: Simulações no ANAREDE.

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.
- Permite 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.

Dispositivos FACTS

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.