

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Elétrica

SAMUEL SOUTO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA
FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE
DE TENSÃO NO SOFTWARE PSP-UFU: UMA
PLATAFORMA GRATUITA E DE CÓDIGO ABERTO
PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Uberlândia

2022

SAMUEL SOUTO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA
FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE
DE TENSÃO NO SOFTWARE PSP-UFU: UMA
PLATAFORMA GRATUITA E DE CÓDIGO ABERTO
PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães

Uberlândia

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48
2022 Oliveira, Samuel Souto de, 1988-
Desenvolvimento de uma nova ferramenta para análise de estabilidade de tensão no software PSP-UFU: uma plataforma gratuita e de código aberto para estudos de sistemas de potência [recurso eletrônico] / Samuel Souto de Oliveira. - 2022.

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.388>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Guimarães, Geraldo Caixeta, 1954-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

SAMUEL SOUTO DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO NO SOFTWARE PSP-UFU: UMA PLATAFORMA GRATUITA E DE CÓDIGO ABERTO PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Uberlândia, 18 de agosto de 2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães – Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Dr. Thales Lima Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Dr. Fernando Bento Silva – Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Dr. Fabrício Augusto Matheus Moura – Universidade Federal do Triângulo Mineiro. (UFTM)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 778, PPGEELT				
Data:	dezoito de agosto de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:00
Matrícula do Discente:	12022EEL014				
Nome do Discente:	Samuel Souto de Oliveira				
Título do Trabalho:	DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO NO SOFTWARE PSP-UFU: UMA PLATAFORMA GRATUITA E DE CÓDIGO ABERTO PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA				
Área de concentração:	Sistemas de energia				
Linha de pesquisa:	Dinâmica de Sistemas Elétricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Geraldo Caixeta Guimarães Título do projeto: Implementação e Análise de Indicadores de Proximidade de Colapso de Tensão Utilizando o Software PSP-UFU Agência financiadora: Universidade Federal de Uberlândia Número do processo na agência financiadora: Não se aplica Vigência do projeto: Início em 2021. Situação atual: em andamento.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Thales Lima Oliveira - FEELT/UFU; Fernando Bento Silva - FEELT/UFU; Fabrício Augusto Matheus Moura - UFTM; Geraldo Caixeta Guimarães - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Geraldo Caixeta Guimarães, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Caixeta Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/08/2022, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thales Lima Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/08/2022, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Bento Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/08/2022, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabício Augusto Matheus Moura, Usuário Externo**, em 18/08/2022, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3809497** e o código CRC **0290DA10**.

A Jesus, pelo infinito amor e graça.

À minha mãe e ao meu pai, minha eterna gratidão.

Ao meu irmão e minhas irmãs, pelo apoio e incentivo irrestrito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela graça com que me guia e amor irrestrito.

Ao professor Dr. Geraldo Caixeta Guimarães (do grupo de Dinâmica de Sistemas Elétricos), pela chance que me foi dada, por sua orientação quanto a escolha do tema, no desenvolvimento da pesquisa, pelo incentivo nas horas difíceis, pela amizade que se formou, que tornou possível a realização deste trabalho. Meus sinceros agradecimentos.

Ao professor Dr. Thales Lima Oliveira, por todo aconselhamento e apoio concedido, os quais se fizeram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço a meu pai Eduardo José de Oliveira, meus irmãos Ruth Souto de Oliveira, Ester Bertolani Peres de Oliveira e Eduardo José de Oliveira Filho, por todo incentivo. Agradeço em especial a minha mãe, Eva Araujo Souto, por todo apoio, financeiro, psicológico e espiritual.

Sou grato pelos amigos que fiz em Uberlândia tanto na UFU como fora, pelo companheirismo, orações, ouvindo e compartilhando dos momentos vividos no período da realização deste trabalho.

Agradeço a secretaria do mestrado, por todos os serviços.

“CONSERVEM-SE LIVRES DO AMOR
AO DINHEIRO E CONTENTEM-SE
COM O QUE VOCÊS TÊM, PORQUE
DEUS MESMO DISSE: “NUNCA O
DEIXAREI, NUNCA O
ABANDONAREI.”

(Bíblia, Hebreus, 13, 5)

RESUMO

Nos últimos anos vários índices de estabilidade de tensão têm sido desenvolvidos e implementados em programas de simulação de sistemas elétricos de potência com o intuito de auxiliar a análise do problema de instabilidade de tensão, resultando na criação de novas ferramentas computacionais capazes de aprimorar o planejamento e a operação do sistema. Seguindo esta proposta, o presente trabalho tem por objetivo implementar três índices de estabilidade de tensão dentro do programa PSP-UFU (um software livre e de código aberto que realiza estudo de estabilidade dinâmica e transitória, fluxo de potência, curto-circuito e harmônicos) e verificar o desempenho destes quando submetidos a análise dinâmica. O estudo é aplicado a dois casos, sendo o primeiro um sistema radial reduzido de três barras e o segundo o sistema *IEEE* 14 barras. Os testes são realizados através de incrementos sucessivos de carga em um determinado barramento até que a tensão deste se torne instável. Foram feitos testes considerando diferente tipos de cargas: potência constante, impedância constante e composição mista (40% impedância constante e 60% potência constante). No segundo caso ainda foi estudado o comportamento dos indicadores com e sem a atuação de *AVRs*. Todos os indicadores mostraram-se promissores, pois seus valores sensitivos diminuíram à medida que o sistema tendia a instabilidade. No segundo caso os indicadores foram capazes de mostrar que o colapso de tensão é postergado quando se utiliza *AVRs*. Evidencia-se, que o primeiro indicador, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, apresentou a maior sensibilidade, detectando pequenos incrementos de carga, entretanto, o terceiro indicador, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, apresenta a vantagem de contemplar duas situações extremas, incrementos de carga cujas potências sejam puramente ativa ou puramente reativa, contrastando com fato de que os indicadores 1 ($VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$) e 2 ($VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$) tem sua aplicação limitada a somente uma dessas situações.

Palavras-chave: Índices de estabilidade de tensão; Sistemas de potência; Simulador dinâmico; Análise de sensibilidade; PSP-UFU.

ABSTRACT

In recent years, several voltage stability indices have been developed and implemented in simulation programs with the aim of helping the analysis of the voltage instability problem of electrical power systems, resulting in the creation of new computational tools capable of improving the system planning and operation. Following this proposal, the present work aims to implement three voltage stability indices within the PSP-UFU software (a free and open-source software that performs studies of transient and dynamic stability, power flow, short-circuit calculation and harmonic) and verify their performance, when submitted to dynamic analysis. The study is applied to two cases, the first is a reduced 3-bus radial system and the second the 14-bus IEEE system. The tests are carried out through successive increments of load on a given bus until its voltage becomes unstable. Tests were performed considering different types of loads: constant power, constant impedance and mixed composition (40% constant impedance and 60% constant power). In the second case, the behavior of the indices with and without the action of AVRs was studied. All indices proved to be promising, because their sensitive values decreased as the system tended to instability. In the second case, the indicators were also able to show that voltage collapse is delayed when using AVRs. It is noteworthy that the first indicator, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, presented greater sensitivity, detecting small increments of load, however, the third indicator, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, has the advantage of contemplating two extreme situations: load increments whose powers are purely active or purely reactive. In contrast, indicators 1 ($VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$) and 2 ($VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$) can be applied to only one of these two situations.

Keywords: Voltage stability indices; Power systems; Dynamic simulator; Sensitivity analysis; PSP-UFU.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Classificação de estabilidade de tensão.	27
Figura 2	Sistema elétrico simples.	28
Figura 3	Curvas PV para fatores de potência variando de 90° a -80° com $Z_t = 1$ e $\alpha_t = 60$.	33
Figura 4	Curva PV. Exemplo Simples	34
Figura 5	Classificação de índices de estabilidade de tensão	38
Figura 6	Fluxograma para implementação de índices.	45
Figura 7	Sistema simplificado 3 barras - cargas de impedância constante.	48
Figura 8	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Tensões nos barramentos.	50
Figura 9	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Comparação entre a potência ativa fornecida gerador e a potência ativa consumida na barra de carga.	51
Figura 10	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Comparação entre a potência reativa fornecida gerador e a potência reativa consumida na barra de carga.	52
Figura 11	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	53
Figura 12	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	53
Figura 13	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	54
Figura 14	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 1.	54
Figura 15	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Comparação entre índices normalizados.	55
Figura 16	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Curva PV para o fator de potência 0,9487 indutivo.	56
Figura 17	Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Curvas PV para diferentes valores de fatores de potência indutivos: 0,9487 - 0,9138 - 0,8532.	57

Figura 18	Sistema simplificado 3 barras - cargas de potência constante.	58
Figura 19	Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Tensões nos barramentos.	59
Figura 20	Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Comparação entre potência ativa fornecida pelo gerador e potência ativa consumida na barra de carga.	60
Figura 21	Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Comparação entre potência ativa fornecida pelo gerador e potência ativa consumida na barra de carga.	61
Figura 22	Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	62
Figura 23	Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	62
Figura 24	Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	63
Figura 25	Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Comparação entre indicadores normalizados.	64
Figura 26	Sistema simplificado 3 barras - composição (40% impedância constante e 60% potência constante).	66
Figura 27	Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Tensões nos barramentos.	67
Figura 28	Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Comparação entre a potência ativa fornecida gerador e a potência ativa consumida na barra de carga.	68
Figura 29	Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Comparação entre a potência reativa fornecida gerador e a potência reativa consumida na barra de carga.	69
Figura 30	Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	70
Figura 31	Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	70
Figura 32	Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.	71

Figura 33	Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Comparação entre indicadores normalizados.	71
Figura 34	Incremento de carga (impedância constante) no sistema <i>IEEE</i> 14 barras.	73
Figura 35	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Tensões nos barramentos com <i>AVRs</i> .	74
Figura 36	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Tensões nos barramentos sem <i>AVRs</i> .	75
Figura 37	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	76
Figura 38	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Indicador 1 ampliado, para melhor visualização.	76
Figura 39	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	77
Figura 40	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	78
Figura 41	Sistema 14 barras (impedância constante): Comparação entre índices normalizados com <i>AVRs</i> .	79
Figura 42	Sistema 14 barras (impedância constante): Comparação entre índices normalizados sem <i>AVRs</i> .	79
Figura 43	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Curva P-V para o fator de potência 0,9487 com e sem <i>AVRs</i> .	80
Figura 44	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante) - Curvas P-V para diferentes valores de fatores de potência indutivos: 0,9487 - 0,9138 - 0,8532. Com <i>AVRs</i>	81
Figura 45	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Potência ativa consumida com e sem <i>AVRs</i> .	82
Figura 46	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (impedância constante): Potência reativa consumida com e sem <i>AVRs</i> .	82

Figura 47	Incremento de carga (potência constante) no sistema <i>IEEE</i> 14 barras.	83
Figura 48	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (potência constante): Tensões nos barramentos com <i>AVRs</i> .	84
Figura 49	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (potência constante): Tensões nos barramentos sem <i>AVRs</i> .	85
Figura 50	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (potência constante): Indicador 1, $VS11_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	86
Figura 51	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (potência constante): Indicador 2, $VS12_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	87
Figura 52	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (potência constante): Indicador 3, $VS13_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	87
Figura 53	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (potência constante): Indicadores normalizados com <i>AVRs</i> .	88
Figura 54	Sistema <i>IEEE</i> 14 barras (potência constante): Indicadores normalizados sem <i>AVRs</i> .	88
Figura 55	Sistema 14 barras (potência constante): Potência ativa consumida com e sem <i>AVRs</i> .	89
Figura 56	Sistema 14 barras (potência constante): Potência reativa consumida com e sem <i>AVRs</i> .	90
Figura 57	Incremento de carga (composição mista) no sistema <i>IEEE</i> 14 barras.	93
Figura 58	Sistema 14 barras (composição mista): Tensões nos barramentos com <i>AVRs</i> .	94
Figura 59	Sistema 14 barras (composição mista): Tensões nos barramentos sem <i>AVRs</i> .	95
Figura 60	Sistema 14 barras (composição mista): Indicador 1, $VS11_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	96
Figura 61	Sistema 14 barras (composição mista): Indicador 2, $VS12_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem <i>AVRs</i>).	96

Figura 62	Sistema 14 barras (composição mista): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem AVRs).	97
Figura 63	Sistema 14 barras (composição mista): Comparação entre indicadores normalizados com AVRs.	97
Figura 64	Sistema 14 barras (composição mista): Comparação entre indicadores normalizados sem AVRs.	98
Figura A.1	Modelo de AVR utilizado na simulação, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	111
Figura A.2	Modelo de regulador de velocidade e turbina utilizado nas simulações, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparação de recursos de simuladores de sistema de potência de código aberto.	43
Tabela 2	Parâmetros do gerador.	48
Tabela 3	Parâmetros da linha de transmissão.	48
	Parâmetros do transformador.	49
Tabela 4		
Tabela 5	Parâmetros do barramento.	49
Tabela 6	Sistema simplificado 3 barras (potência constante). Dados de cargas, tensão e indicador normalizado na barra 3.	65
Tabela 7	Sistema 3 barras (composição mista). Dados de cargas, tensão e indicador normalizado na barra 3.	72
Tabela 8	Sistema IEEE 14 barras (potência constante). Dados de potência consumida, tensão e indicador normalizado na barra 14 (com e sem <i>AVRs</i>).	91
Tabela 9	Sistema IEEE 14 barras (composição mista). Dados de potência consumida, tensão e indicador normalizado na barra 14 (considerando a atuação de <i>AVRs</i>).	99
Tabela A.1	Dados de geradores, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	105
Tabela A.2	Dados de compensadores síncronos, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras	106
Tabela A.3	Dados de transformadores, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	107
Tabela A.4	Dados de transformadores, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	107
Tabela A.5	Dados de linhas, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	108
Tabela A.6	Dados de linhas, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	108
Tabela A.7	Dados de linhas, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	109
Tabela A.8	Dados de linhas, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	109
Tabela A.9	Dados de cargas, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras	110
Tabela A.10	Dados de cargas, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras	110
Tabela A.11	Dados de <i>AVRs</i> , sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	111
Tabela A.12	Dados do regulador de velocidade utilizado nas simulações, sistema exemplo <i>IEEE</i> 14 barras.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APC	Autonomia de Programas Comerciais
ACP	Autonomy of Commercial Programs
CAD	Computer-Aided Design
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
CP	Cross Platform
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FOSS	Free and Open-Source Software
GUI	Graphical User Interface
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MJ	Matriz Jacobiana
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
PMU	Phasor Measurement Unit
PSAT	Power System Analysis Toolbox
PSP-UFU	Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia
SDP	Standard Design Pattern
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VS	Variáveis do Sistema
VSI	Voltage Stability Indices
VST	Voltage Stability Toolbox

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO.....	22
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	22
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24

CAPÍTULO II

ASPECTOS GERAIS SOBRE ESTABILIDADE DE TENSÃO	25
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	25
2.2 MECANISMO DO COLAPSO DE TENSÃO	28
2.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ATRAVÉS DA CURVA P-V.....	34
2.4 ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA	35

CAPÍTULO III

FORMULAÇÃO DOS ÍNDICES	36
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	36

3.2	CLASSIFICAÇÃO DE ÍNDICES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO	36
3.3	ÍNDICES SENSITIVOS.....	38
3.4	ÍNDICES INCREMENTAIS	39

CAPÍTULO IV

	IMPLEMENTAÇÃO DOS INDICADORES NO PSP-UFU	41
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	41
4.2	O SOFTWARE PSP-UFU.....	42
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DOS INDICADORES NO PSP-UFU	44

CAPÍTULO V

	SIMULAÇÕES E ANÁLISES.....	46
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	46
5.2	CASO 1: SISTEMA RADIAL SIMPLIFICADO DE 3 BARRAS	47
5.3	CASO 2: SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	73

CAPÍTULO VI

	CONCLUSÃO.....	100
--	----------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 102

ANEXO 1..... 105

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Devido ao tamanho do sistema elétrico, várias são as causas que podem levar linhas de transmissão e barramentos a apresentar instabilidade de tensão, acarretando, no pior caso, em um desligamento parcial ou total do sistema. A instabilidade de tensão é causada, na maior parte das vezes, por linhas sobrecarregadas, deficiência de potência reativa e características da carga em baixas tensões. Com o intuito de se evitar falhas no sistema elétrico muito se tem feito nos últimos anos, instalação de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) é umas das soluções mais atuais [1]–[4] .

Para a análise dos sistemas de potência quanto à sua estabilidade de tensão os índices de estabilidade de tensão prestam um serviço essencial: determinar o quão próximo da instabilidade o sistema se encontra. Tais coeficientes têm sido cada vez mais necessários, pois o sistema passa por diversas mudanças ao longo do tempo, como o aumento de demanda ou quando são inseridas fontes renováveis não despacháveis, solicitando cada vez mais um acompanhamento minucioso do problema da instabilidade de tensão. Os indicadores são capazes de identificar pontos fracos, sensíveis à instabilidade de tensão, permitindo estimar a quantidade máxima de carga para cada nó, assim como medir a proximidade do colapso de tensão, auxiliando no planejamento e operação do sistema [1][5][6]. Os índices podem ser submetidos a análise estática ou dinâmica. A análise estática é realizada através da verificação em regime permanente do sistema em diferentes situações de carregamento, sendo necessário múltiplas análises para então prever uma tendência. Este tipo de análise é muito útil para detectar pontos fracos no sistema, sendo utilizado um método de fluxo de potência ou um modelo dinâmico linearizado. Na análise dinâmica, utilizam-se modelos caracterizados por equações diferenciais e equações algébricas não lineares, incluindo o modelo dinâmico de

geradores, mudança de taps de transformadores e outros componentes dinâmicos do sistema. Com essa abordagem é possível realizar um estudo mais detalhado do sistema, pois tem a capacidade de apresentar como o sistema alcança o regime permanente, ou seja, inclui a natureza dinâmica do sistema, permitindo uma análise mais realista de como alterações no sistema impactam a estabilidade de tensão. Uma comparação entre os dois tipos de análises mostra que a estática é mais otimista em relação a dinâmica, necessitando maior cautela ao utilizá-la [7]–[9].

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo implementar uma nova ferramenta intitulada VSI (índices de estabilidade de tensão, do inglês “Voltage Stability Indices”), no *software* PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia), o qual é um programa livre e de código aberto. O PSP-UFU utiliza a linguagem C++ e atualmente realiza os seguintes estudos: fluxo de potência, curto-circuito, harmônicos, estabilidade transitória e dinâmica, sendo que os índices de estabilidade de tensão serão desenvolvidos no contexto desse último. Outros programas de computador como o MATACDC, MatDyn, MATPOWER, PSAT (*Power System Analysis Toolbox*), VST (Voltage Stability Toolbox), OpenDSS (Open Distribution System Simulator), PandaPower e GridCal, MATLAB/Simulink, ETAP, PowerWorld, ANARED, ANAFAS, ANATEM, são citados na literatura técnica como opções de simuladores de sistemas elétricos de potência. Destaca-se, porém, que poucos são utilizados para simulação de indicadores de colapso de tensão e um número ainda menor é livre e de código aberto, tornando o PSP-UFU uma ótima ferramenta a ser utilizada no âmbito do ensino e da pesquisa [10]–[12].

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira: o presente capítulo introduz o tema, exibindo a importância do trabalho, os métodos utilizados e a estrutura do trabalho; no capítulo II os aspectos gerais sobre instabilidade de tensão são abordados; o capítulo III , apresenta o método de classificação e os indicadores a serem utilizados; no capítulo IV, descreve-se a implementação dos índices dentro do *software* PSP-UFU; no capítulo V é abordada a metodologia do estudo de caso sobre estabilidade de tensão em dois cenários: sistema radial simplificado com 3 barras e o sistema *IEEE* 14 barras, também são realizadas as simulações dos casos, apresentação de resultados e análises; e, finalmente, a seção VI conclui o assunto abordado apresentando a performance dos índices, mostrando quais se mostraram mais eficazes para os casos apresentados.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GERAIS SOBRE ESTABILIDADE DE TENSÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Atualmente a preocupação com a estabilidade do sistema elétrico de potência fica evidenciada devido aos sistemas operarem cada vez mais próximos de seus limites operacionais, seja por questões econômicas, preocupações ambientais, inserção de fontes renováveis ou um rápido crescimento de carga.

A estabilidade do sistema de potência como classificado e explicado em [4] é dividida em estabilidade de ângulo de rotor e estabilidade de tensão, sendo muitas vezes difíceis de separá-las. Muitas vezes a estabilidade de tensão transitória pode estar relacionada com o transiente da estabilidade angular de rotor, formas mais demoradas de estabilidade de tensão podem estar interligadas com pequenas perturbações na estabilidade angular de rotor.

A estabilidade de tensão é também chamada de estabilidade de carga, pois esta é causa principal de perturbação daquela. A estabilidade de tensão é definida por [13] como “a habilidade do sistema manter tensões aceitáveis em regime permanente em todos os barramentos do sistema em condições normais de operação depois de ser submetido a distúrbios”.

A sociedade técnico-profissional internacional dedicada ao avanço da teoria e prática da engenharia nos campos da eletricidade, eletrônica e computação, *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* definiu a estabilidade de tensão como: “Estabilidade de tensão é a habilidade de um sistema em manter tensões, para que, quando a admitância da carga for aumentada, a potência da carga também aumente, para que potência e tensão possam ser controladas. [14]

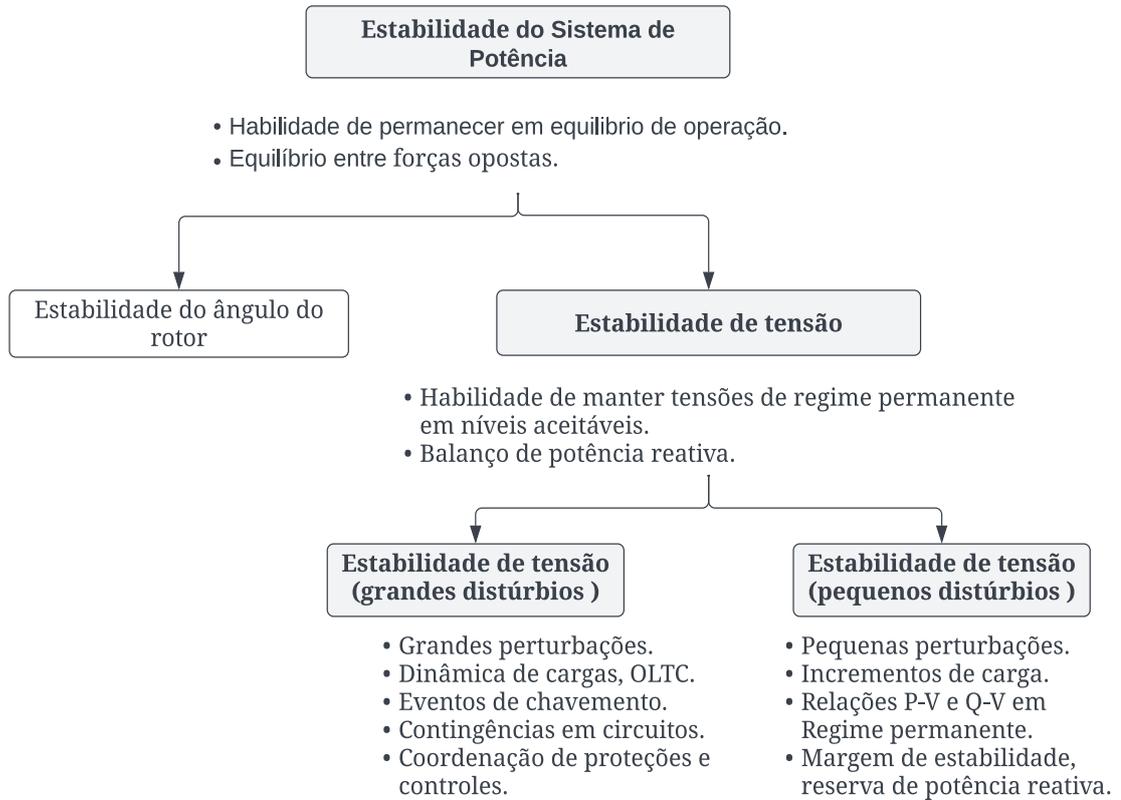
A força tarefa conjunta IEEE/CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) provê outra definição para estabilidade de tensão: “Estabilidade de tensão se refere a habilidade de um sistema de potência de manter tensões estáveis em todos os barramentos após o sistema ser submetido a uma perturbação a partir de dada condição inicial de operação”[15].

O termo estabilidade de tensão e colapso de tensão aparecem sempre relacionados, [16] estabelece que a “instabilidade de tensão decorre da tentativa da dinâmica de carga de restaurar o consumo de energia além da capacidade do sistema combinado de transmissão e geração.” O sistema entra em estado de instabilidade quando um distúrbio (aumento de carga, perda de linha, ou outras mudanças no sistema) causa uma queda na tensão, brusca ou gradativa, e os sistemas de controles automáticos não conseguem reestabelecer a tensão para níveis aceitáveis [17].

“A instabilidade de tensão é ocasionada devido à falta de suporte de potência reativa em um sistema altamente carregado ou quando a capacidade máxima de transferência de potência da rede é atingida devido a distúrbios”[18].

A estabilidade de tensão pode ser classificada ainda em duas subcategorias, estabilidade de pequenas e grandes perturbações, estas se referem a capacidade do sistema em manter o controle das tensões diante de distúrbios pequenos (mudanças incrementais de cargas) ou grandes (exemplos: faltas, perda de geração, contingências em circuitos) [13].

Figura 1: Classificação de estabilidade de tensão.



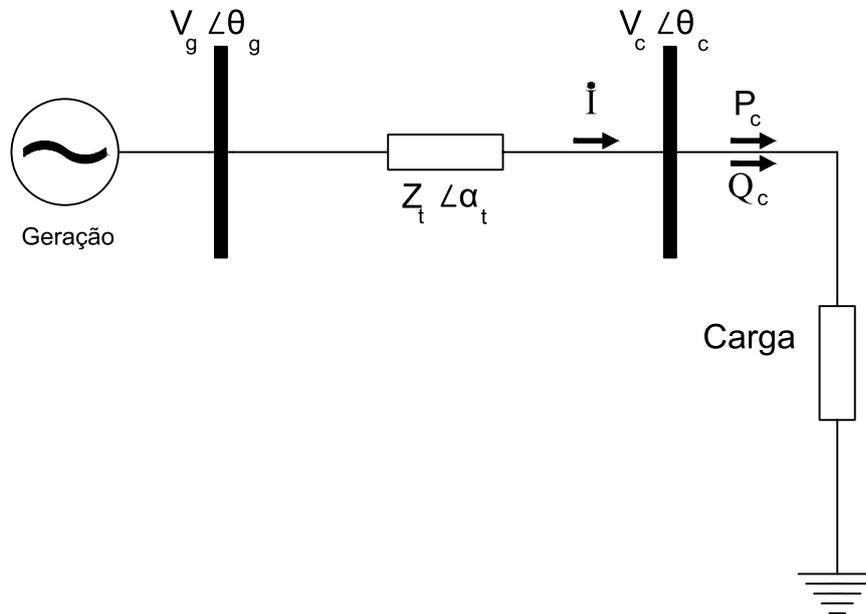
Adaptado de [13].

Este capítulo tem como objetivos definir o conceito de estabilidade e instabilidade de tensão, explicar o mecanismo de colapso de tensão e o limite máximo de transferência de potência através da modelagem de um sistema com três barras.

2.2 MECANISMO DO COLAPSO DE TENSÃO

A instabilidade de tensão, também chamada de colapso de tensão, é a ausência de estabilidade de tensão e resulta em queda (ou aumento) progressiva de tensão, desestabilizando controles responsáveis por manter a estabilidade global [4]. Esse tipo de instabilidade é causado pela falta de suporte de potência reativa a um dado barramento de carga, quando a rede responsável pelo transporte de potência alcança o limite máximo de transferência. Para explicar matematicamente o mecanismo do colapso de tensão, utilizou-se do circuito da Figura 2, seguindo os mesmos passos mostrados em [19] e em [20].

Figura 2: Sistema elétrico simples.



Autoria própria.

Onde:

V_g, V_c	Módulo da tensão nos barramentos de geração e carga, respectivamente;
θ_g, θ_c	Ângulos de fase das tensões das barras de geração e carga, respectivamente;
Z_t	Módulo da impedância da linha de transmissão;
α_t	Ângulo da impedância de linha de transmissão;
P_c	Potência ativa consumida pela de carga;
Q_c	Potência reativa consumida pela carga;
Z_c	Módulo da impedância de carga;
φ_c	Ângulo da impedância de carga;
i	Corrente complexa;

É estabelecido que a tensão \dot{V}_c , tensão no barramento de carga, não é controlada, o fator de potência da carga ($\cos \varphi$) é considerado constante e a carga é modelada como de impedância constante. A instabilidade de tensão é definida como limite máximo de transmissão de potência da linha, já que em cargas de impedância constante o colapso de tensão não ocorre efetivamente. Para realizar este estudo utiliza-se, inicialmente, das equações (2.1) a (2.4).

$$\dot{V}_c = i Z_c \angle \theta_c \quad (2.1)$$

$$i = \frac{V_g \angle \theta_g}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \varphi_c} \quad (2.2)$$

$$P_c = I^2 Z_c \cos \varphi_c = I V_c \cos \varphi_c \quad (2.3)$$

$$Q_c = I^2 Z_c \sin \varphi_c = I V_c \sin \varphi_c \quad (2.4)$$

Para determinar-se o limite máximo de potência transmitida, tanto ativa, quanto reativa, deve-se manipular as equações (2.3) e (2.5).

Tomando a equação (2.2), deve-se encontrar uma corrente crítica, I_{cr} , desse modo, considerando que segundo o teorema da máxima transferência de potência, Z_t deve ser igual a Z_c , pode-se determinar o módulo de I_{cr} como

$$I_{cr} = \frac{V_g}{\sqrt{(Z_t \cos \alpha_t + Z_t \cos \varphi_c)^2 + (Z_t \sin \alpha_t + Z_t \sin \varphi_c)^2}}$$

Pode-se então reescrever I_{cr} como:

$$I_{cr} = \frac{V_g}{Z_t \sqrt{2[1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)]}} \quad (2.6)$$

Assim, substituindo a Equação (2.6) na Equação (2.3) e (2.4), é possível determinar equações que expressem a potência ativa máxima, $P_{m\acute{a}x}$, Equação (2.7), e a potência reativa máxima, $Q_{m\acute{a}x}$, Equação (2.8), a serem entregues a carga. Estas duas potências máximas são atingidas simultaneamente, observando que a potência reativa pode ser tanto capacitiva como indutiva.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{V_g^2 \cos \varphi_c}{2Z_t[1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)]} \quad (2.7)$$

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{V_g^2 \sin \varphi_c}{2Z_t[1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)]} \quad (2.8)$$

Ainda pode-se encontrar um valor de tensão V_c associada a potência máxima transmitida, chamada de tensão crítica, $V_{c\ cr}$. Reescrevendo a Equação (2.3) em termos da corrente crítica (I_{cr}) e da potência ativa máxima ($P_{m\acute{a}x}$), temos a Equação (2.9), descrevendo a tensão máxima que corresponde ao limite máximo de transferência de potência à carga.

$$V_{c\ cr} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{I_{cr} \cos \varphi_c} = \frac{V_g}{2 \cos\left(\frac{\alpha_t - \varphi_c}{2}\right)} \quad (2.9)$$

Analisando as Equações de potência máxima e tensão crítica é perceptível que estas são dependentes do fator de potência ($\cos \varphi_c$), dessa forma ainda é possível encontrar qual seria a máxima das máximas potências permitidas. Para isso deve-se derivar a Equação (2.7), em relação ao ângulo do fator de potência e igualar a zero.

Derivando $P_{m\acute{a}x}$ em relação φ_c e igualando a zero:

$$\frac{\partial P_{m\acute{a}x}}{\partial \varphi_c} = \frac{-V_g^2 \text{sen } \varphi_c 2Z_t [1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)] - V_g^2 \cos \varphi_c 2Z_t [1 + \text{sen}(\alpha_t - \varphi_c)]}{\{2Z_t [1 + \cos(\alpha_t - \varphi_c)]\}^2}$$

Então obtm-se que, a potência máxima ocorre quando:

$$\text{sen } \varphi_c = -\text{sen } \alpha_t$$

$$\varphi_c = -\alpha_t$$

Resultando na Equação:

$$P_{m\acute{a}x_{m\acute{a}x}} = \frac{V_g^2 \cos \alpha_t}{2Z_t [1 + \cos 2\alpha_t]} = \frac{V_g^2}{4Z_t \cos \alpha_t} \quad (2.10)$$

Pode-se agora determinar a potência reativa máxima entre as máximas, assim como a tensão crítica em que isso ocorre, lembrando que a potência ativa e reativa máxima das máximas ocorrem simultaneamente, simplesmente substituindo φ_c por $-\alpha_t$, resultando nas Equações (2.11) e (2.12).

$$Q_{m\acute{a}x_{m\acute{a}x}} = \frac{-V_g^2 \text{sen } \alpha_t}{2Z_t [1 + \cos 2\alpha_t]} = \frac{-V_g^2 \text{sen } \alpha_t}{4Z_t \cos^2 \alpha_t} = \frac{-V_g^2 \sec \alpha_t \tan \alpha_t}{4Z_t} \quad (2.11)$$

$$V_{cr_{m\acute{a}x}} = \frac{V_g}{2 \cos \alpha_t} \quad (2.12)$$

As equações (2.1) e (2.2) podem ser expressas como:

$$V_c = IZ_c \quad (2.13)$$

$$I = \frac{V_g}{\sqrt{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)}} \quad (2.14)$$

Assim pode-se determinar uma relação entre P_c e Z_c , Q_c e Z_c e V_c e Z_c , pela substituição de (2.14) em (2.3) e (2.4) em (2.13), resultando nas Equações :

$$P_c = \frac{Z_c V_g^2 \cos \varphi_c}{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)} \quad (2.15)$$

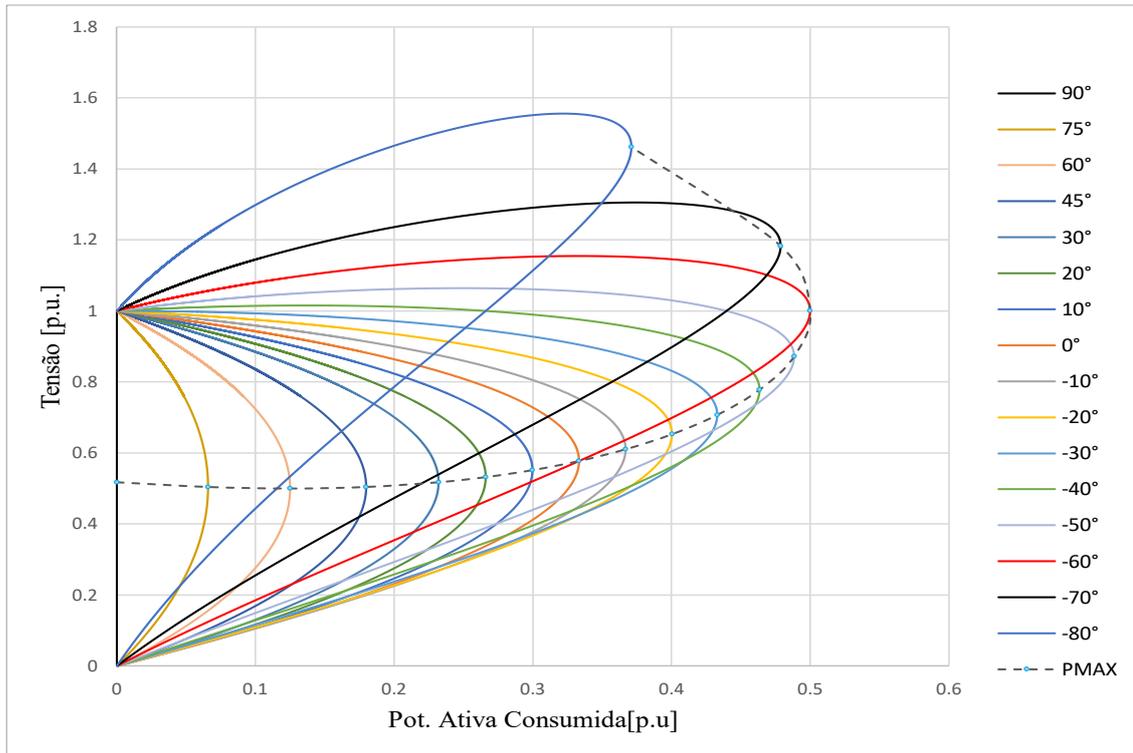
$$Q_c = \frac{Z_c V_g^2 \sin \varphi_c}{\sqrt{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)}} \quad (2.16)$$

$$V_c = \frac{Z_c V_g}{\sqrt{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \varphi_c)}} \quad (2.17)$$

Com as Equações (2.15) e (2.17), mantendo o fator de potência fixo, pode-se traçar, para este par, uma curva relacionada ao fator de potência, ao variar a impedância Z_c de um valor muito alto, considerado infinito (circuito aberto) a até zero, um valor muito baixo (curto-circuito), assim tem-se a curva de potência ativa x tensão, também conhecida como P-V.

A Figura 3, mostra várias curvas P-V formadas por diferentes valores de φ_c para $Z_t = 1$ e $\alpha_t = 60^\circ$, A linha tracejada, $P_{m\acute{a}x}$, representa o lugar geométrico dos pontos críticos para estabilidade de tensão. Percebe-se que a curva onde ocorre a máxima potência possível, é justamente a curva correspondente a $\varphi_c = -60^\circ$.

Figura 3: Curvas PV para fatores de potência variando de 90° a -80° com $Z_t = 1$ e $\alpha_t = 60$.



Autoria própria.

Dessa forma pode-se chegar as seguintes conclusões:

O ponto de máxima potência transmitida muda conforme se altera o fator potência.

O ponto de máxima potência ocorre quando o módulo da impedância de carga (Z_c) é igual ao módulo da impedância de Thèvenin (vista a partir dos terminais da carga, que no exemplo utilizado é a própria impedância de linha (Z_t), independente do fator de potência.

Existe um ponto de transferência máximo entre os máximos, que ocorre quando o ângulo de carga é igual ao negativo do ângulo de fase da impedância de Thèvenin, vista a partir dos terminais da carga, $\varphi_c = -\alpha_t$.

Caso $\varphi_c \leq -\alpha_t$, vê-se que o colapso de tensão ocorre para valores acima de 1 (p.u.) e ocorre em 1 (p.u.) quando $\varphi_c = -\alpha_t$

2.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ATRAVÉS DA CURVA P-V.

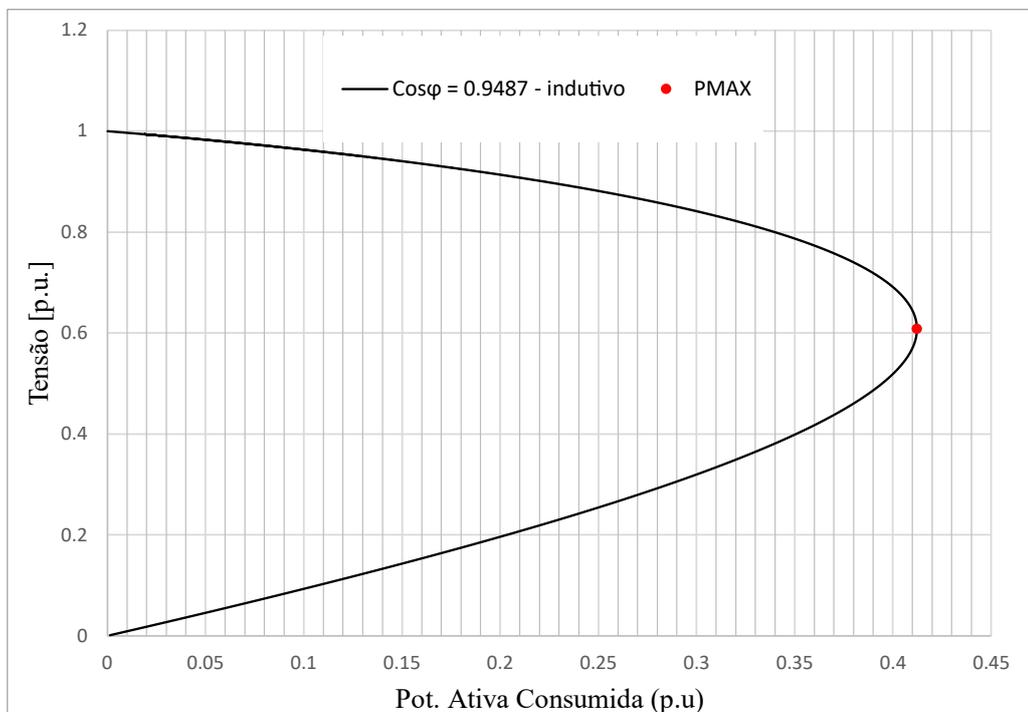
Considere o sistema exemplo da Figura 2, onde o valor de tensão no barramento de geração é definido como, $\dot{V}_g = 1 \angle 0^\circ$, a impedância de linha como, $Z_t = 0,85064 \angle 87.7767^\circ$, o fator de potência (fp) da carga como 0,9487- indutivo. O módulo da impedância de carga será variado de zero (curto-circuito) até infinito (circuito aberto).

Primeiramente podemos calcular o valor de φ_c como:

$$\varphi_c = \cos^{-1} 0,9487 = 18,43^\circ$$

Utilizando as equações (2.15) e (2.17) pode-se então definir a curva PV conforme indica a Figura 4. O ponto de máxima transferência de potência ativa é calculado através da Equação (2.10) e tem valor aproximado de 0,4122 (p.u.). Este equivale ao ponto onde ocorre o colapso, a partir do qual não existe possibilidade de recuperação da estabilidade de tensão. A tensão crítica, associada ao ponto de máximo é calculada através da Equação (2.12) e apresenta valor aproximado igual a 0,6079 (p.u.). A potência máxima reativa é atingida ao mesmo tempo que a potência máxima ativa e tem valor calculado, através da Equação (2.11), de aproximadamente 0,1374 (p.u.).

Figura 4: Curva PV. Exemplo Simples.



Autoria própria.

2.4 ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA

A estabilidade de tensão é um fenômeno dinâmico, pois envolve vários equipamentos, que podem se apoiar na atuação de sistemas de controle, tornando a análise do problema mais complexa, pois esta pode acontecer em várias janelas de tempo, contudo duas técnicas de estudo são realizadas, a análise estática e dinâmica.

A análise estática se baseia principalmente em análises de regime permanente, como o modelo de fluxo de potência ou o modelo dinâmico linearizado, descrito pela operação [21]. Esta propõe avaliar as margens de estabilidade de máximo carregamento, depois que o sistema entra em um novo estado de operação devido a um distúrbio ou uma mudança no sistema, sem realmente estudar o transitório [22]. A análise estática de estabilidade de tensão ainda pode ser estudada utilizando-se de vários métodos como aqueles baseados em sensibilidade, método de fluxo de potência continuado, método de decomposição de valor singular [18].

Na análise dinâmica todos os elementos são modelados por equações tanto algébricas como diferenciais. Dessa maneira é possível verificar como o sistema reage depois de uma mudança ou distúrbio, provocado por faltas no sistema, perda de geração, contingências, mudanças de carga repentinas ou incrementais, assim como o efeito da atuação ou não de sistemas de controle. A análise dinâmica de estabilidade de tensão ainda pode ser dividida em quatro métodos: método de análise de pequenos sinais, método de simulação no domínio do tempo, método de análise através da bifurcação, método da função de energia. O método de simulação no domínio do tempo, é muito bom pois serve para qualquer tipo de modelo dinâmico. Devido ao melhor detalhamento do modelo dinâmico pode-se estudar o transitório, como o sistema alcança o regime permanente, melhorando a confiabilidade da análise do sistema com relação a estabilidade [18] e [22]–[24].

CAPÍTULO III

FORMULAÇÃO DOS ÍNDICES

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Desde 1920, sistemas de potência têm sido monitorados com a ajuda de índices que verificam a estabilidade de tensão, buscando maiores níveis de segurança e confiabilidade do sistema. Os mais recentes métodos aplicados mundialmente são: *singular value decompositon, energy function, continues power flow, sensitivity analysis methods, bifurcations theory, minimum eigenvalue, integrated transmission line transfer index(ITLTI),etc.* Cada método tem sua particularidade, em que pode ser empregado para um certo tipo de sistema e para outro não. Eles são elaborados para analisar barramentos, linhas ou um sistema em geral, necessitando portanto de uma análise mais aprofundada e cuidadosa quando se propõe realizar uma comparação entre eles [1]–[5].

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE ÍNDICES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Para um melhor entendimento dos diversos índices de estabilidade de tensão os vários tipos de índices podem ser classificados quanto à formulação, quanto à análise e quanto à aplicação.

A classificação que envolve a formulação é mais comum e divide os índices entre os que utilizam a matriz jacobiana (MJ) como base e os que utilizam as variáveis do sistema (VS), ambos são derivados de um sistema com duas barras. Índices baseados em MJ, são utilizados para determinar o colapso de tensão, a máxima carga permitida, e a margem de estabilidade de

tensão, pois a MJ está próxima ao ponto de singularidade quando o colapso de tensão ocorre. Para o cálculo destes índices são necessários todos os dados do sistema de potência e a cada mudança neste o cálculo precisa ser refeito, tornando o cálculo mais complexo, dificultando a utilização desta categoria em aplicações em tempo real, aplicações *on-line* [1], [3] e [25].

Os índices baseados em VS são utilizados para reconhecer linhas, barramentos, áreas mais suscetíveis ao colapso de tensão e para determinar o limite máximo de carga de uma linha, estes requerem pouca força computacional pois utilizam as variáveis do sistema e os elementos da matriz de admitância, como tensão e diferença angulares. Segundo a literatura, estes índices, quando aplicados à análise estática, não conseguem medir de forma precisa a margem de estabilidade como os índices baseados em MJ fazem, contudo cita-se que são apropriados para aplicações *on-line* como o monitoramento elementos específicos do sistema de potência. [1],[3] e [25].

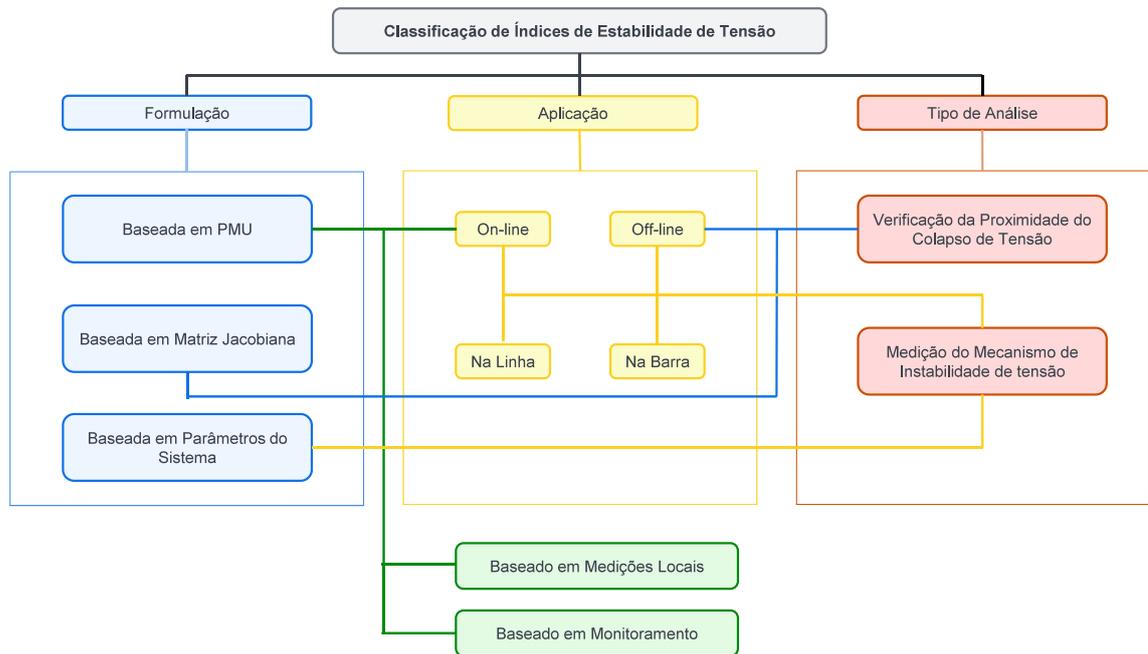
A tecnologia baseada em *PMU* (do inglês *Phasor Measurement Unit*) tem trazido grandes avanços ao permitir o monitoramento da dinâmica do sistema de potência de forma precisa, em tempo sincronizado e conseqüentemente de índices de estabilidade de tensão. Os índices baseados em *PMU* podem ser divididos ainda em duas classes, uma que se baseia em medições locais para realizar o cálculo da impedância de Thevenin e outra aplicada ao monitoramento de grandes áreas. Índices de medições locais podem identificar pontos mais suscetíveis a instabilidade de tensão e se preocupam somente com barramentos e linhas. Índices globais, refletem a estabilidade de grandes regiões e, portanto, não conseguem determinar o elemento do sistema mais propenso ao colapso de tensão [3].

Quanto a perspectiva de análise dos índices, estes são classificados com relação ao seu objetivo, a saber: medir a proximidade do colapso de tensão e prever áreas mais sensíveis ao colapso de tensão, procurando estabelecer a relação com fatores que contribuíram para o colapso), também conhecido como estudo do mecanismo do colapso de tensão [3][26].

Os índices também podem ser agrupados com relação à sua aplicação. Neste caso podem ser aplicados a uma linha ou barramento, podendo ainda ser *on-line* ou *off-line* [3].

A Figura 5 mostra a classificação dos índices de estabilidade de tensão.

Figura 5: Classificação de índices de estabilidade de tensão.



Fonte: Adaptado de [3].

3.3 ÍNDICES SENSITIVOS

Segundo [27] na análise da estabilidade de tensão, não é suficiente somente saber o ponto crítico, mas sim entender como este ponto é afetado por mudanças realizadas no sistema. O objetivo dos índices sensitivos é entender como o ponto de operação é afetado por mudanças na condição do sistema, ou seja, conhecer como os parâmetros e controles do sistema podem influenciar a estabilidade. A ideia é obter a margem do ponto de operação atual até o ponto onde sistema se torna instável, provendo informação antecipada sobre situações potencialmente críticas. Os índices sensitivos podem ser separados em índices baseados em um dado estado e índices baseados em grandes desvios. Os índices baseados em um dado estado podem ainda considerar em sua formulação, reserva de reativo, queda de tensão, perdas de potência ativa e reativa, valores incrementais, margem incremental de regime permanente, valor singular mínimo ou mínimo autovalor, estes índices utilizam a informação disponível no ponto de operação atual. Índices baseados em grandes desvios levam em conta as não linearidades causadas por grandes distúrbios ou aumento de carga. Algumas das principais classes são: fluxos de potência repetidos, métodos de continuação, métodos baseados em otimização,

métodos diretos ou métodos de ponto de colapso, distância mais próxima da fronteira de máxima transferência, métodos de funções de energia.

3.4 ÍNDICES INCREMENTAIS

Dentro da classificação de métodos baseados em análise de sensibilidade (*sensitivity analysis methods*) se encontram os índices incrementais, também chamados de indicadores incrementais e valores incrementais. Estes trazem informação do sistema na região próxima ao ponto de operação, em que uma solução de fluxo de potência é necessária antes dos índices serem calculados. O grupo dos incrementais ainda pode ser subdividido em duas classes principais, a dos indicadores que se baseiam na mudança de potência e a dos indicadores baseados em uma combinação entre autovalores associados com autovetores [28][29].

Os indicadores incrementais baseados na mudança de potência, expressam a mudança incremental das variáveis de acordo com a mudança de carga. O indicador provê a sensibilidade com relação a uma dada direção, isto é, ele indica a variação de acordo com a carga escolhida pelo usuário, seguindo um caminho definido, que no caso, pode ou não estar levando ao colapso de tensão.

Os indicadores incrementais podem ser calculados de diferentes maneiras, considerando diversos parâmetros do sistema, no parágrafo seguinte são apresentados alguns exemplos, os quais resultam da relação entre incrementos ou variações dos seguintes parâmetros: tensão, potência reativa e potência aparente.

O primeiro indicador, $VSI1_i$, é obtido através da razão entre o decremento de tensão ΔV_i , na i -ésima barra, pelo incremento de potência reativa consumida pela mesma barra ΔQ_{ci} [28] [29]. Assim para a i -ésima barra tem-se o indicador:

$$VSI1_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta Q_{ci}} \quad (3.1)$$

O segundo indicador, $VSI2_i$ é definido como o quociente entre o decremento de tensão ΔV_i , na i -ésima barra, pelo incremento de potência ativa consumida pela mesma barra ΔP_{ci} [28] [29]. Assim para a i -ésima barra tem-se o indicador:

$$VSI2_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta P_{ci}} \quad (3.2)$$

O terceiro indicador, $VSI3_i$, é expresso como o quociente entre o decremento da tensão ΔV_i , na i -ésima barra, pelo incremento de potência aparente na i -ésima barra ΔS_{ci} [28] [29]. Assim para a i -ésima barra tem-se o indicador:

$$VSI3_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta S_{ci}} \quad (3.3)$$

Estes indicadores, consideram que devido ao limite máximo de transferência de potência em uma linha de transmissão, a tensão no barramento deverá cair à medida que se incrementa a potência consumida, portanto próximo a instabilidade de tensão um mínimo aumento de carga levará a um grande afundamento de tensão. Originalmente os indicadores foram propostos para que enquanto apresenta-se valores positivos o sistema seria estável, a sensibilidade aumentaria conforme a carga aumentasse e tenderia ao infinito positivo quando sistema atingisse a carga máxima. Neste trabalho decidiu-se utilizar o índice tendendo a infinito negativo, portanto, conforma a carga aumentar o indicado assumirá valores negativos, tendendo a infinito negativo quando atingir a carga máxima [28] [29].

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTAÇÃO DOS ÍNDICADORES NO PSP-UFU

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Simuladores de sistemas de potência são muito utilizados em lugar de sistemas reais pois ao recorrerem a modelos físicos/matemáticos propiciam economia de tempo e dinheiro. Esta vantagem abre portas para um maior número de instituições (públicas ou privadas) estudarem o sistema de acordo com seus próprios interesses, contribuindo para a operação e planejamento do sistema elétrico.

Programas utilizados na simulação de sistemas de potência podem ser divididos em comerciais e não comerciais, *FOSS*, do inglês *Free and Open Source Software*. Os programas comerciais têm sido muito usados, em lugar de *FOSS*, por considerarem em seu conceito, interface gráfica amigável, *GUI (Graphical User Interface)* associada a ferramentas de projeto assistido por computador, *CAD (Computer-Aided Design)*; aplicações multiplataforma, *CP (Cross Platform)*; utilização de arquitetura de software baseado em modelo padrão de projeto, *SDP (Standard Design Pattern)*; autonomia de programas comerciais, *APC*, ou do inglês *ACP (Autonomy of Commercial Programs)*. A *GUI* é uma ferramenta que facilita a utilização de programas de computadores, pois transforma a linguagem de programação em simples operações, como um click de um botão. Uma boa *GUI* é caracterizada pela utilização de elementos com os quais o usuário se identifica, facilitando assim a utilização da ferramenta [30]. O *CAD* é utilizado para a realização de desenhos gráficos em computadores, munido dessa ferramenta o usuário pode desenhar e posicionar os elementos da forma que preferir, o que resulta em facilidade de entendimento [31]. O uso de *CP* dá liberdade de escolha ao usuário com relação ao sistema operacional para a utilização do software, inclusive aqueles gratuitos.

A utilização do *SDP* possibilita um melhor entendimento da implementação, facilidade na manutenção e flexibilidade de projeto, ajudando a evitar a obsolescência do software [32]. O fato de o programa possuir *APC* traduz-se em liberdade de modificação total do programa, sem a necessidade de outras permissões, adição de novas tecnologias, algoritmos de solução e modelos implementados[12].

Destaca-se entre os programas comerciais: MATLAB e PowerWorld Simulator. O MATLAB possui linguagem de alto nível e uma série de pacotes que facilitam o trabalho do desenvolvedor, muito utilizado na indústria e academia. O PowerWorld Simulator é muito utilizado na área educacional, pois além de oferecer uma licença gratuita para propósitos educacionais, que permite a simulação de sistemas com até 13 barras, possui uma *GUI* avançada e recursos *CAD* [12].

Apesar de existirem muitos programas comerciais bem estabelecidos, estes apresentam dificuldades quanto a alteração do código fonte, fazendo com que o usuário fique totalmente dependente do proprietário realizar mudanças, o que é uma desvantagem para as áreas de ensino e pesquisa. Visando suprir essa deficiência, vários programas *FOSS* como, MATA CDC, MatDyn, MATPOWER, PSAT, VST, OpenDSS, OpenDSS-G, Pandapower e GridCal surgiram nos últimos anos [12].

4.2 O SOFTWARE PSP-UFU

A falta de recursos como, *GUI*, *CAD*, *CP*, *SDP* e *ACP* têm prejudicado a adoção de *FOSS* pela indústria. Assim para suprir essa falta em 2019 foi criado o programa PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia), que utiliza a linguagem C++ e atualmente realiza os seguintes estudos: fluxo de potência, curto-circuito, harmônicos, estabilidade transitória e dinâmica, sendo que os índices de estabilidade de tensão serão desenvolvidos no contexto desse último [11] e [12].

O programa PSP-UFU vem com uma *GUI* amigável, recursos *CAD* avançado, multiplataforma e multi-idiomas, possibilita a criação de estratégias de controle, utilizando diagrama de blocos, sem a necessidade da edição no código fonte. O programa oferece fácil visualizações de resultados, com textos vinculados à tela principal, mapa de calor de tensão editores de tabelas e gráficos. A todas essas qualidades pode-se ainda adicionar o fato de que por ser um *FOSS* não existe um limite para o tamanho do sistema a ser simulado, seu código fonte é plenamente acessível, o que se traduz na possibilidade de modificação e inclusão de

qualquer algoritmo, podendo ser atualizado pela comunidade de desenvolvedores, evitando a obsolescência. Desse modo o PSP-UFU pode ser facilmente ser utilizado para fins educacionais, de pesquisa e em aplicações na indústria, principalmente em países em desenvolvimento, cujos recursos financeiros são limitados [11][12]. A Tabela 1 mostra a comparação entre vários *FOSS*.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo implementar uma nova ferramenta intitulada VSI (índices de estabilidade de tensão, do inglês “Voltage Stability Indices”) no programa PSP-UFU.

Tabela 1: Comparação de recursos de simuladores de sistema de potência de código aberto.

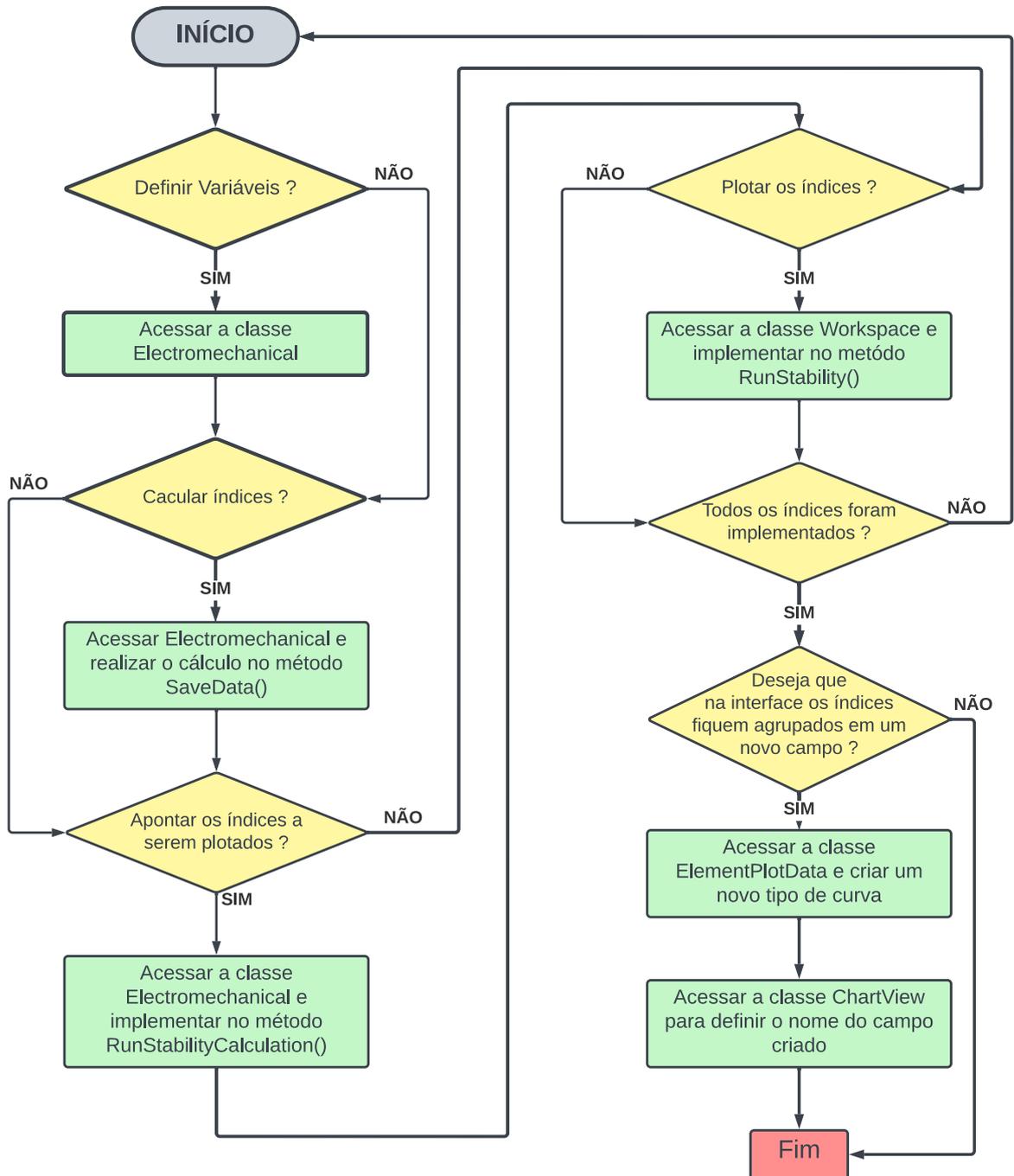
Programa	Linguagem	GUI	CAD	CP	SDP	ACP
MATACDC	MATLAB			✓		
MatDyn	MATLAB			✓		
MATPOWER	MATLAB			✓		
PSAT	MATLAB/Octave			✓		
VST	MATLAB	✓	✓	✓		
OpenDSS	Delphi	✓				✓
OpenDSS-G	Linguagem G	✓	✓			✓
Pandapower	Phyton					✓
GridCal	Phyton	✓	✓	✓		✓
PSP-UFU	C++	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: [12]

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS INDICADORES NO PSP-UFU

O IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês *Integrated Development Environment*) utilizado para desenvolver a nova ferramenta, *VSI*, que utiliza indicadores incrementais, no estudo de estabilidade de tensão foi o Microsoft Visual Studio 2019, o qual foi utilizado em conjunto com o *framework* *WxWidgets*, necessário para gerar a *GUI* do programa. A implementação dos indicadores no PSP-UFU é simples e rápida, pois o programa já realiza os cálculos dos parâmetros elétricos a serem utilizados (tensão e potência consumida em cada barramento,) deixando para o desenvolvedor a tarefa de alterar somente duas classes já presentes no programa. A classe principal é a *Electromechanical*, local onde se deve definir as variáveis, calcular os índices e apontá-los para plotagem; a segunda classe, chamada *Workspace*, é acessada para definir as configurações de plotagem dos índices. Dentro da classe *Electromechanical*, no método *SaveData()*, são realizados os cálculos dos índices e após a obtenção dos valores corretos destes deve-se prosseguir para a plotagem dos resultados. Ainda na classe *Electromechanical*, agora no método *RunStabilityCalculation()* são definidos quais índices devem ser plotados. Finalmente, deve-se prosseguir para a classe *Workspace* e no método *RunStability()* implementar o código necessário para plotar os índices em todas as barras, independentemente do tamanho do sistema criado. Na interface os índices devem ser plotados em algum campo, com o intuito de se obter uma melhor organização decidiu-se criar um campo chamado *VSI*. Para criar um novo campo acessa-se a classe *ElementPlotData()* para criar um novo tipo de curva e em sequência segue-se para a classe *ChartView()* para escolher um nome apropriado para o campo. A Figura 6 mostra o fluxograma dos índices implementados.

Figura 6: Fluxograma para implementação de índices.



Autoria própria.

CAPÍTULO V

SIMULAÇÕES E ANÁLISES

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para analisar a eficácia dos indicadores em prever a instabilidade de tensão do sistema, foram simulados o sistema radial simplificado de 3 barras, e o sistema *IEEE* 14 barras, em ambos os casos são realizadas as seguintes considerações:

- a) Para cada tipo de sistema foram analisadas, cargas estáticas, impedância constante, potência constante e mista.
- b) Um barramento foi escolhido para ser realizado o incremento de carga até que ocorra o colapso.
- c) Para o sistema *IEEE* 14 barras analisou-se o colapso de tensão com e sem a atuação de reguladores de tensão (*AVR*).
- d) A Carga 0, mostradas nas figuras, 7, 18, 26, 34,47 e 57, está inicialmente conectada ao barramento. As demais cargas são inseridas intervalos de 1s.
- e) Todas as cargas incrementadas possuem fator de potência fixo, observando a necessidade de se evitar possíveis instabilidades por variação de ângulo (instabilidade angular) [33].
- f) Devido a característica incremental dos indicadores, estes retornam valores diferente de zero somente após o segundo incremento (carga 1).
- g) Potência base igual a 100[MVA].
- h) O valor escolhido para o parâmetro de simulação, tempo de passo, foi de 0,01[s] para o caso simplificado de 3 barras e de 0,001[s] para o caso *IEEE* 14 barras. Escolheu-se estes valores pois trouxeram um resultado satisfatório aliado a um baixo tempo de simulação.

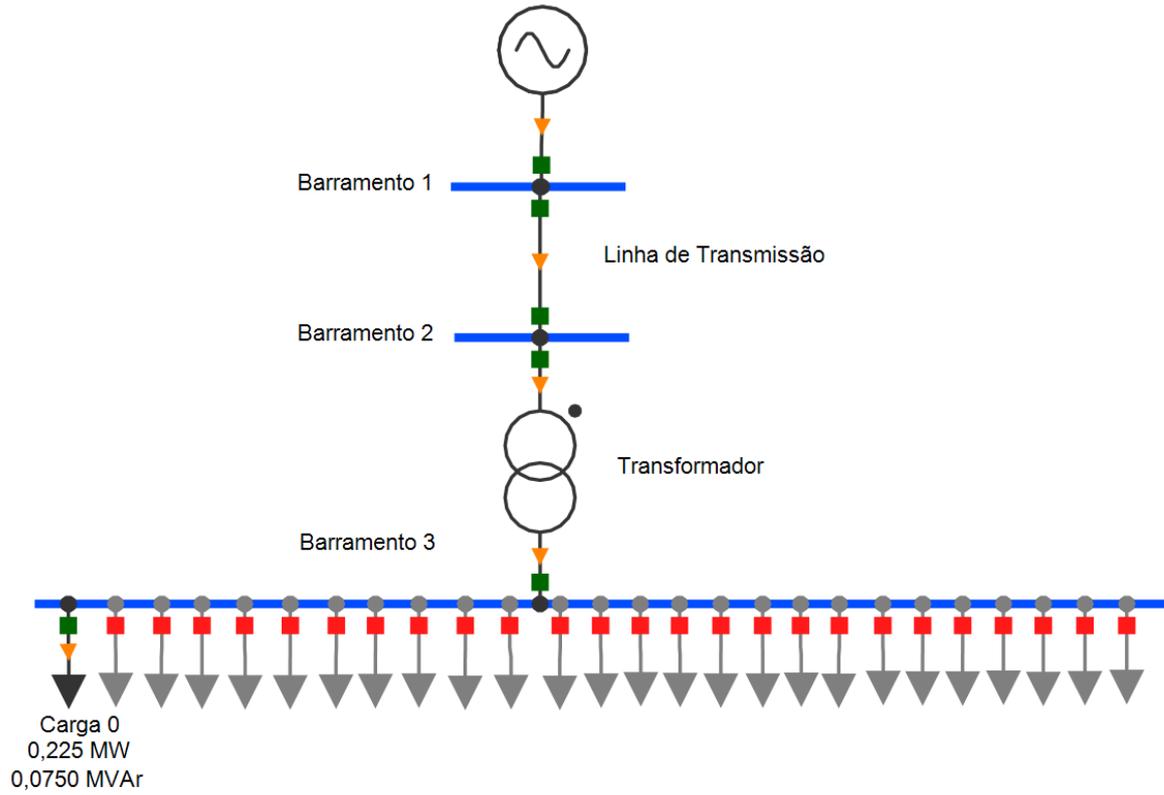
- i) O programa utiliza o método de integração trapezoidal implícito para a solucionar as equações algébrico-diferencial

Os indicadores foram implementados de modo a tender a infinito negativo, sentido contrário ao proposto por [28][29], pois os indicadores naturalmente já apresentam valores negativos, calculam relação entre o decremento de tensão pelo incremento de potência. Desse modo preferiu-se deixar os indicadores decrescendo, pois, a tensão no barramento também decresce.

5.2 CASO 1: SISTEMA RADIAL SIMPLIFICADO DE 3 BARRAS

Com o intuito de definir o barramento 1, da Figura 7, como infinito, modelou-se o gerador conforme os parâmetros indicados na Tabela 2, em que os parâmetros de estabilidade não mencionados foram inseridos como zero. Os valores de potência ativa e reativa são calculados automaticamente pelo software de acordo com o resultado do fluxo de carga. Os parâmetros da linha e do transformador foram obtidos da referência [28] e são mostrados na Tabela 3 e Tabela 4 respectivamente. A Tabela 5 traz os dados dos barramentos inseridos no software.

Figura 7: Sistema simplificado 3 barras - cargas de impedância constante.



Autoria própria.

Tabela 2: Parâmetros do gerador.

Potência Nominal [MVA]	Inércia [H]	Reatância de eixo direto [X'd]
999	99	0,001

Tabela 3: Parâmetros da linha de transmissão.

Resistência [p.u.]	Reatância Indutiva [p.u.]
0,031	0,8

Tabela 4: Parâmetros do transformador.

Potência Nominal [MVA]	Resistência [p.u.]	Reatância Indutiva [p.u.]	Conexão	Tensão Base [kV]	TAP	Defasagem [graus]
100	0,001	0,05	Estrela-aterrada Estrela-aterrada	15	1	0

Tabela 5: Parâmetros do barramento.

Nome	Tensão Nominal [kV]	Tensão Controlada [p.u.]	Barra de Referência
Barramento 1	15	1	sim
Barramento 2	15	-	-
Barramento 3	22	-	-

Com o sistema montado foram realizadas, conforme mencionado anteriormente, três tipos de simulação, considerando três tipos de cargas.

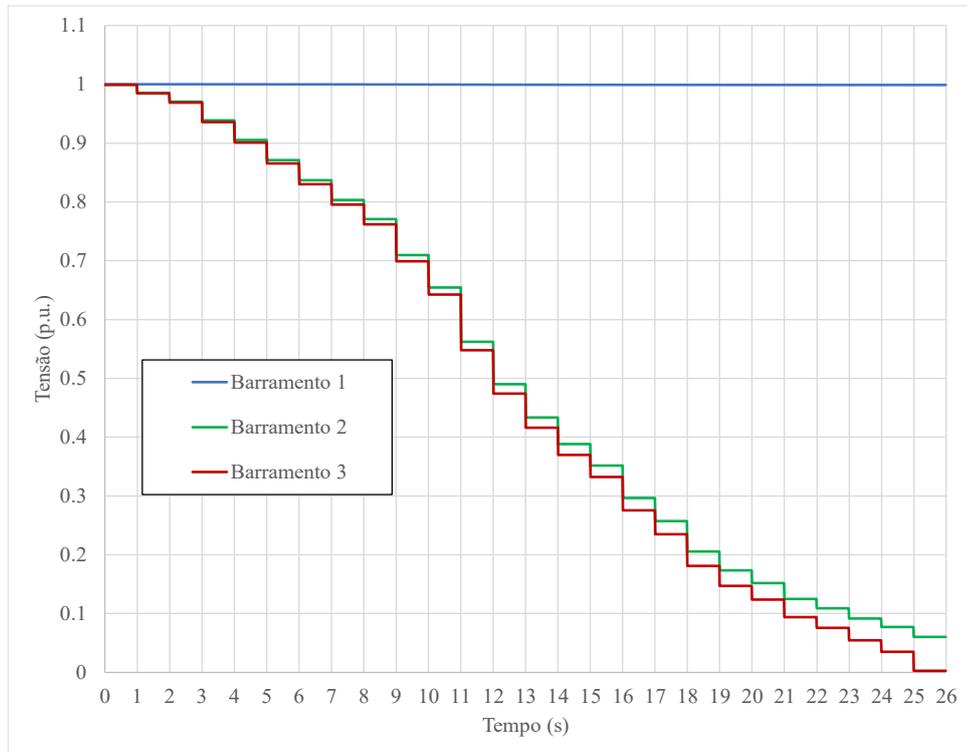
5.2.1 Simulação com cargas de impedância constante.

A Figura 7 mostra o sistema simplificado de 3 barras, com cargas de impedância constante, com fator de potência igual a 0,948. Neste caso à medida que se adiciona carga ao barramento e a tensão cai, as potências das cargas são reajustadas de modo que o sistema não entra em colapso, pois sempre encontra um novo ponto de equilíbrio. Dessa maneira é possível considerar que o sistema inicia com uma pequena carga (circuito aberto) e após consecutivos incrementos de carga atinge a condição de curto-circuito (a tensão no barramento fica próxima de zero), possibilitando a construção da curva P-V.

Na Figura 8 tem-se o comportamento das tensões nos barramentos, percebe-se que a tensão do barramento infinito permanece igual a 1 (p.u.). A tensão nos barramentos 2 e 3 decaem a cada incremento, mas não entram em colapso de acordo com a definição, pois a cada

incremento de carga, a tensão é reestabelecida em um novo ponto de operação, desse modo a simulação não é interrompida por falta de convergência.

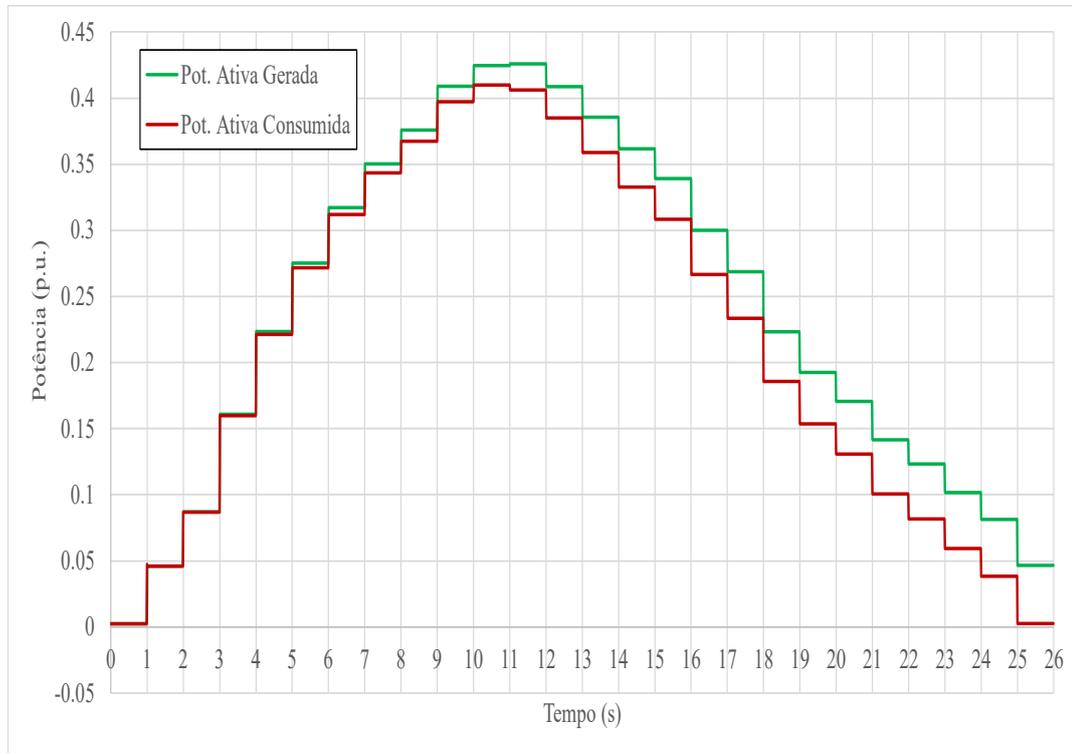
Figura 8: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Tensões nos barramentos.



Autoria própria.

A Figura 9 mostra que a potência ativa fornecida pelo gerador é quase que totalmente consumida pela carga, a diferença entre as potências está sendo dissipada pela resistência entre a geração e a barra de carga. A máxima potência ativa entregue ao barramento de carga foi de aproximadamente 0,4121 (p.u.).

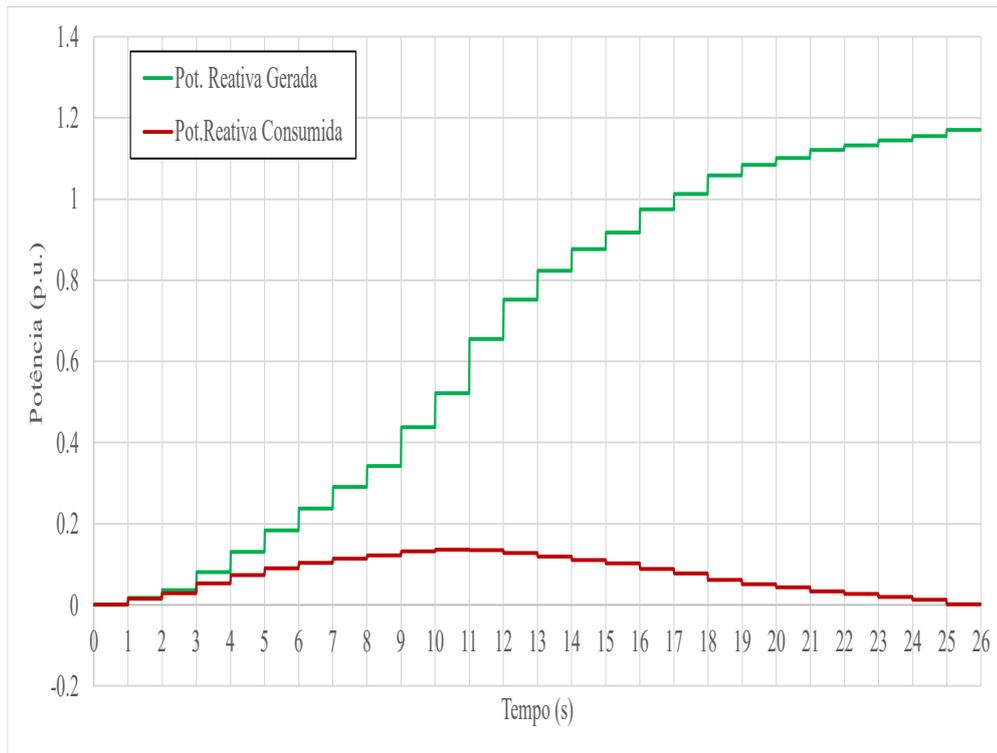
Figura 9: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Comparação entre a potência ativa fornecida gerador e a potência ativa consumida na barra de carga.



Autoria própria.

A Figura 10 indica que o reativo gerado cresce muito mais que o consumido na barra de carga, revelando que a impedância reativa a montante da carga está por absorver a maior parcela de potência reativa, causando uma deficiência de reativo no barramento de carga e consequente queda de tensão. Devido impedância de linha ser muito maior que a do transformador, pode-se dizer que o colapso de tensão ocorre devido a linha ter alcançado o ponto de máxima transferência de potência. A máxima potência reativa entregue ao barramento de carga é de aproximadamente 0,1374 (p.u.).

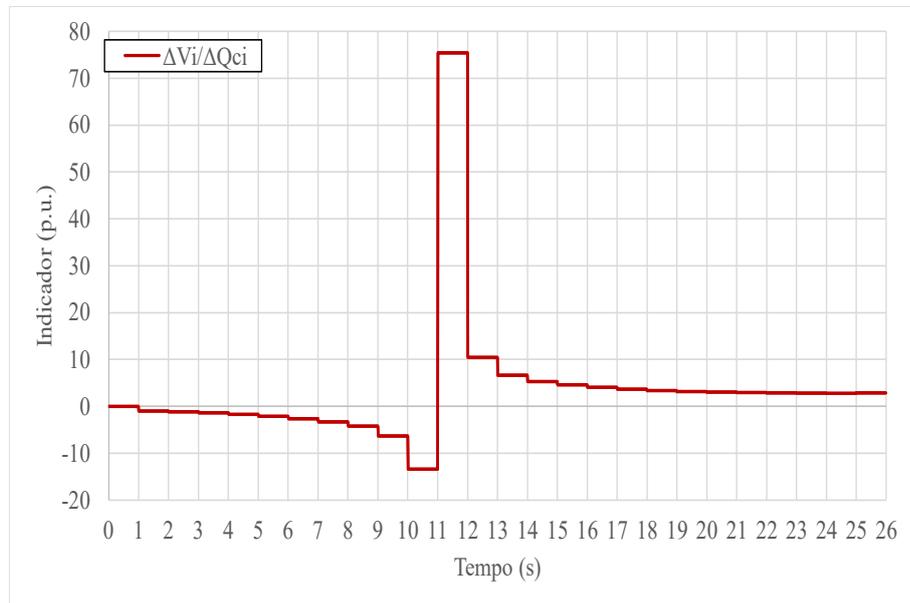
Figura 10: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Comparação entre a potência reativa fornecida gerador e a potência reativa consumida na barra de carga.



Autoria própria.

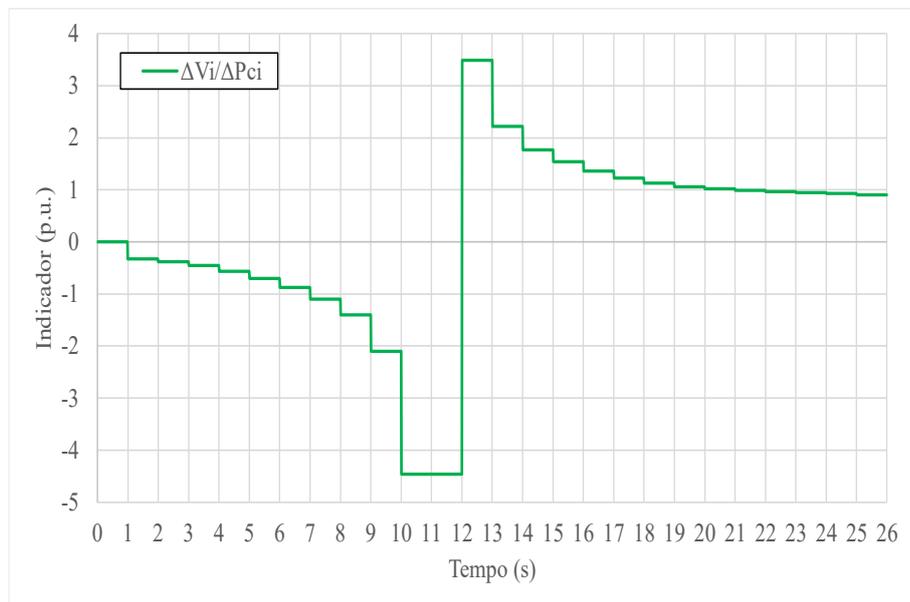
As Figuras de 11 a 13 trazem os indicadores, os quais mostram que à medida que a carga é acrescentada os indicadores caem rapidamente. O ponto de máxima transferência de potência é alcançado no décimo incremento e muda muito pouco entre o décimo e décimo primeiro, devido à proximidade ao ponto de máximo, dessa maneira na Figura 11 vê-se que o indicador 1 percebe a pequena variação de potência reativa no décimo primeiro acréscimo, já os indicadores 2 e 3, mostrados em na Figuras 12 e 13, percebem a variação de potência a partir do décimo segundo incremento. Quando os indicadores notam que o sistema passa pelo ponto de máxima transferência de potência, estes invertem de sinal, assumindo valores positivos, isso ocorre porque os valores finais de potência passam a ser menores do que os valores iniciais, invertendo o sinal da relação incremental do indicador.

Figura 11: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



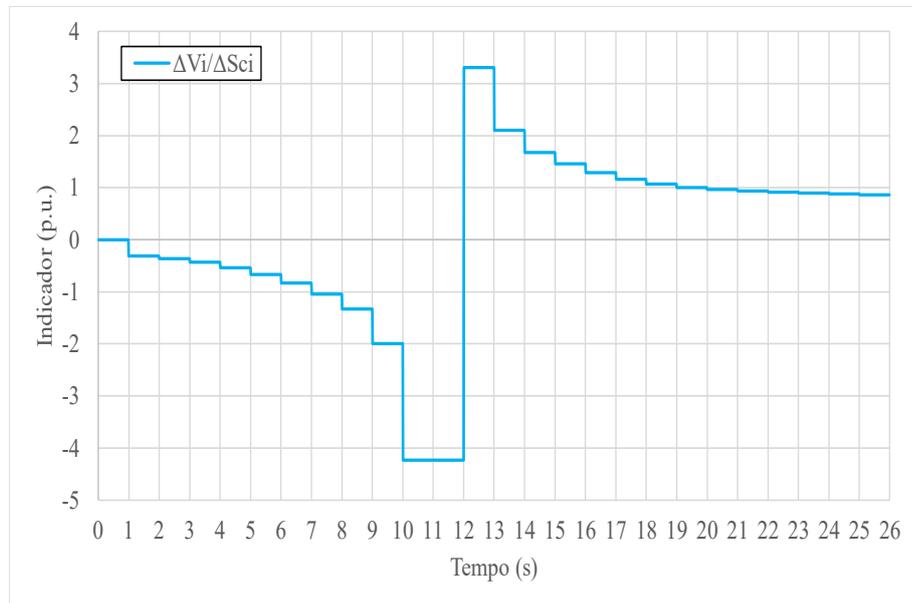
Autoria própria.

Figura 12: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



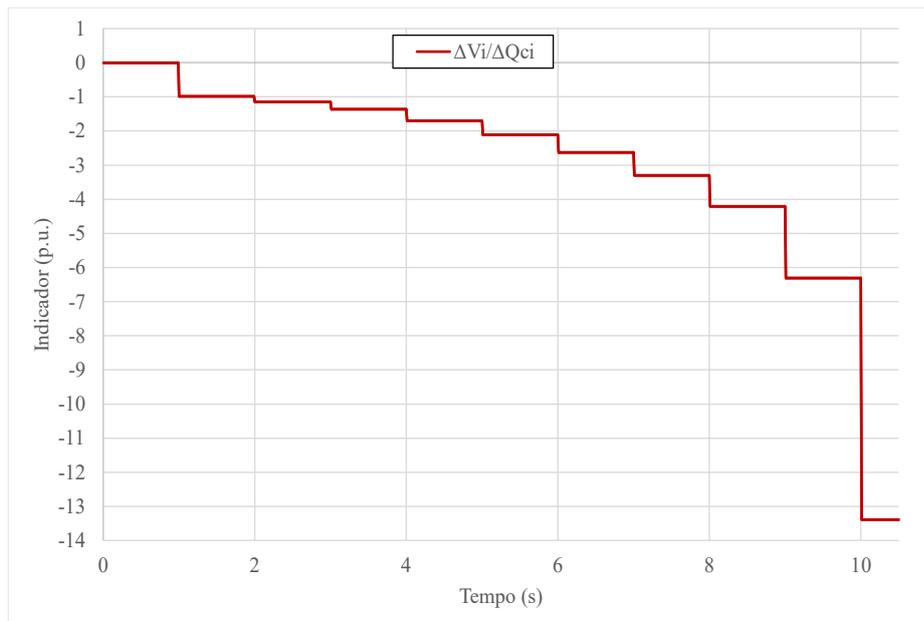
Autoria própria.

Figura 13: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



Na Figura 14 tem-se o indicador número 1 plotado somente até 10 segundos para facilitar a visualização de seu comportamento.

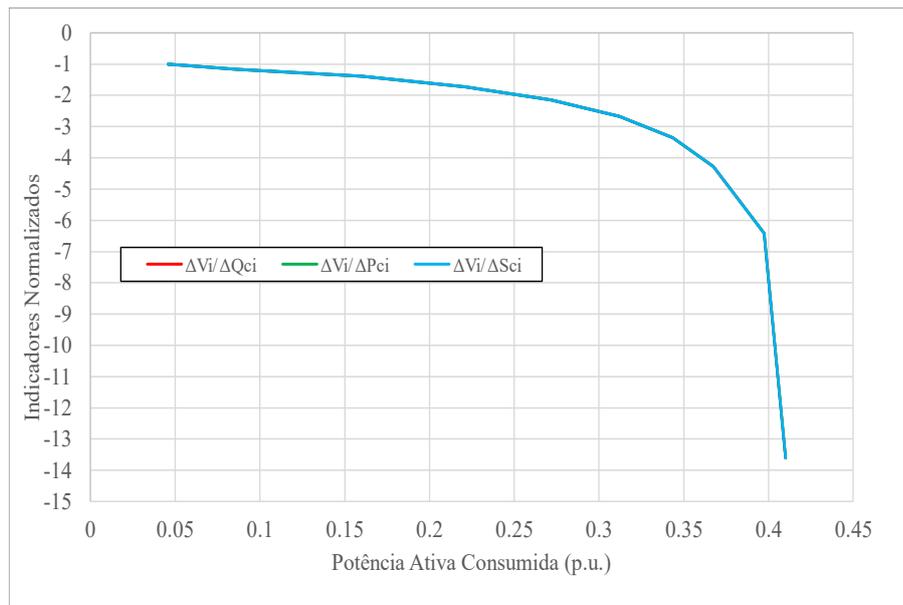
Figura 14: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Indicador 1.



Autoria própria.

A Figura 15 exibe os três indicadores normalizados versus a potência ativa consumida, estes indicadores foram plotados somente até o ponto de máxima transferência de potência. É possível notar que os indicadores caem drasticamente, tendendo ao infinito, quando o limite máximo de carga é atingido, e prova a relação entre os indicadores aplicados ao caso em questão e a instabilidade de tensão, podendo ser usados, portanto, para antever o colapso de tensão. A normalização foi obtida através da divisão dos valores incrementais de cada indicador pelo seu primeiro valor, a fim de que no primeiro incremento todos fossem iguais a -1, viabilizando a comparação. O fato do comportamento dos três serem iguais ocorre devido a $VSI1_i$ ser igual a $VSI3_i \cos \varphi$ e $VSI2_i$ ser igual a $VSI3_i \sin \varphi$, como o fator de potência é mantido constante, os termos seno e cosseno desaparecem mediante a divisão, intrínseca a normalização[28].

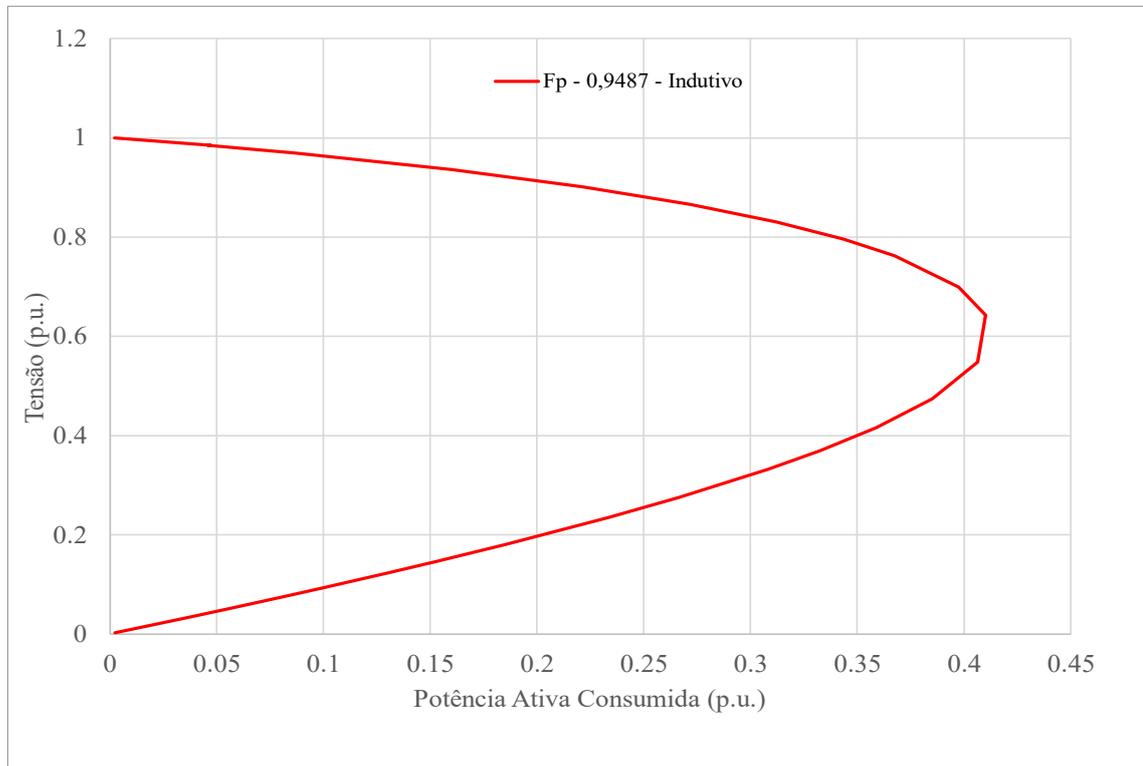
Figura 15: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Comparação entre índices normalizados.



Autoria própria.

Na Figura 16 plotou-se a curva P-V, percebe-se que o ponto de máximo ocorre com aproximadamente 0,6 (p.u.) de tensão e 0,41 (p.u.) de potência ativa.

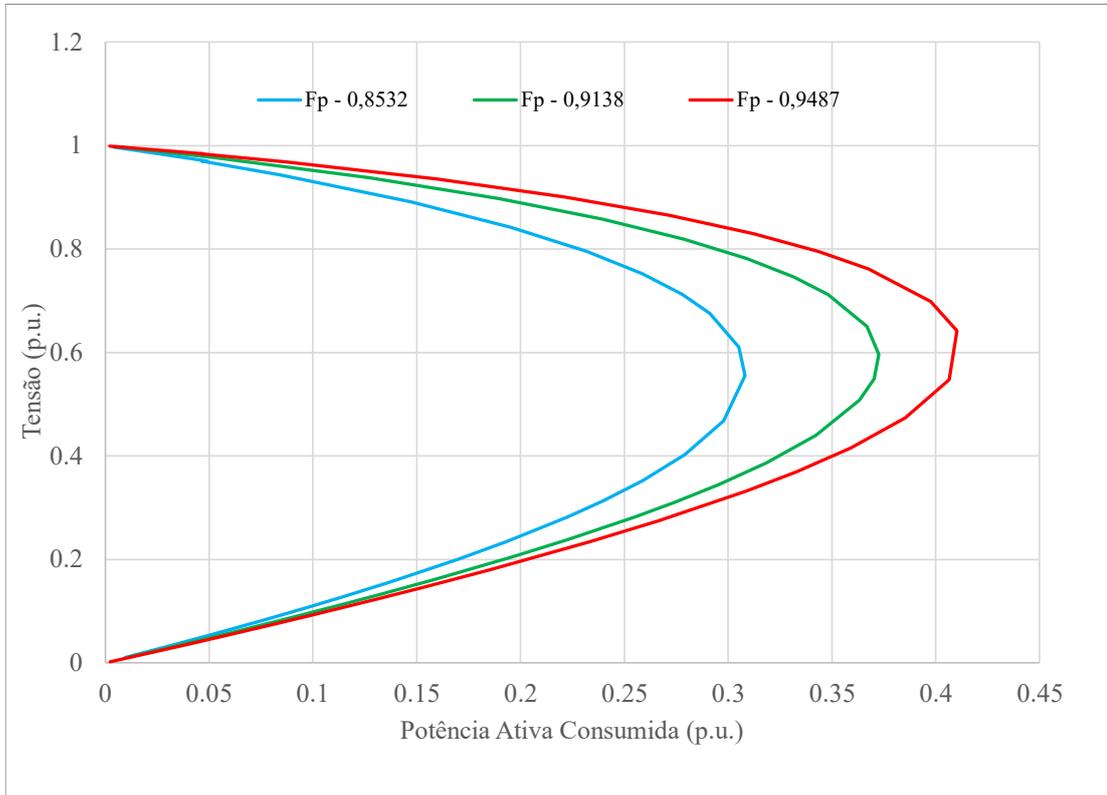
Figura 16: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Curva PV para o fator de potência 0,9487 indutivo.



Autoria própria.

A Figura 17 mostra três curvas P-V para diferentes fatores de potência, onde vê-se que quanto mais indutiva for a carga, mais propensa esta será ao colapso de tensão.

Figura 17: Sistema simplificado 3 barras (impedância constante): Curvas PV para diferentes valores de fatores de potência indutivos: 0,9487 - 0,9138 - 0,8532.



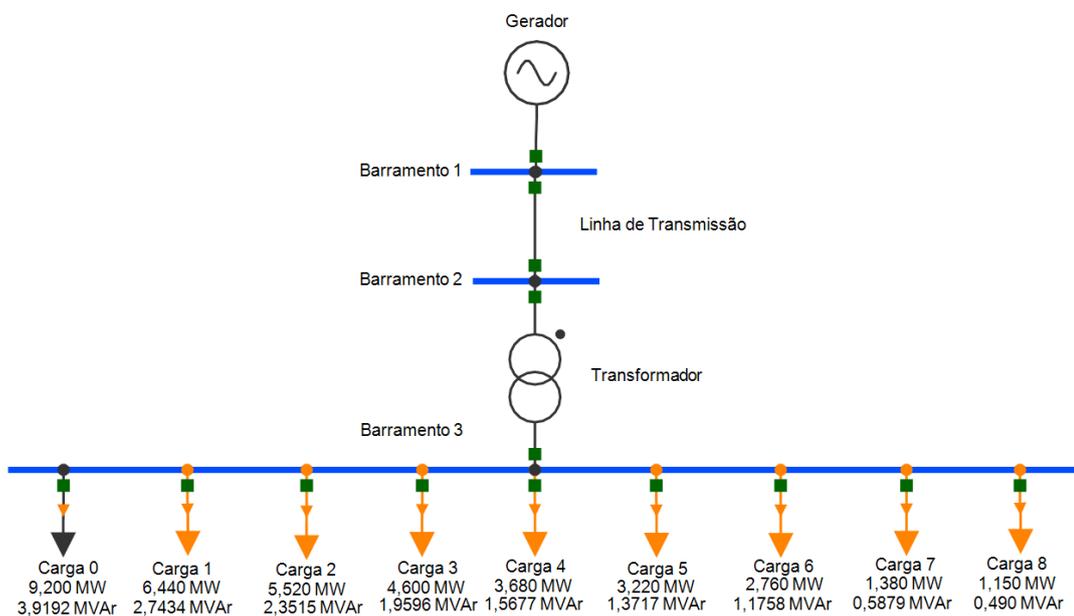
Autoria própria.

5.2.2 Simulação com cargas de potência constante.

Utilizando o sistema da .

Figura 18, sistema simplificado de 3 barras com cargas de potência constante, realizou-se a análise do colapso de tensão através da simulação dinâmica.

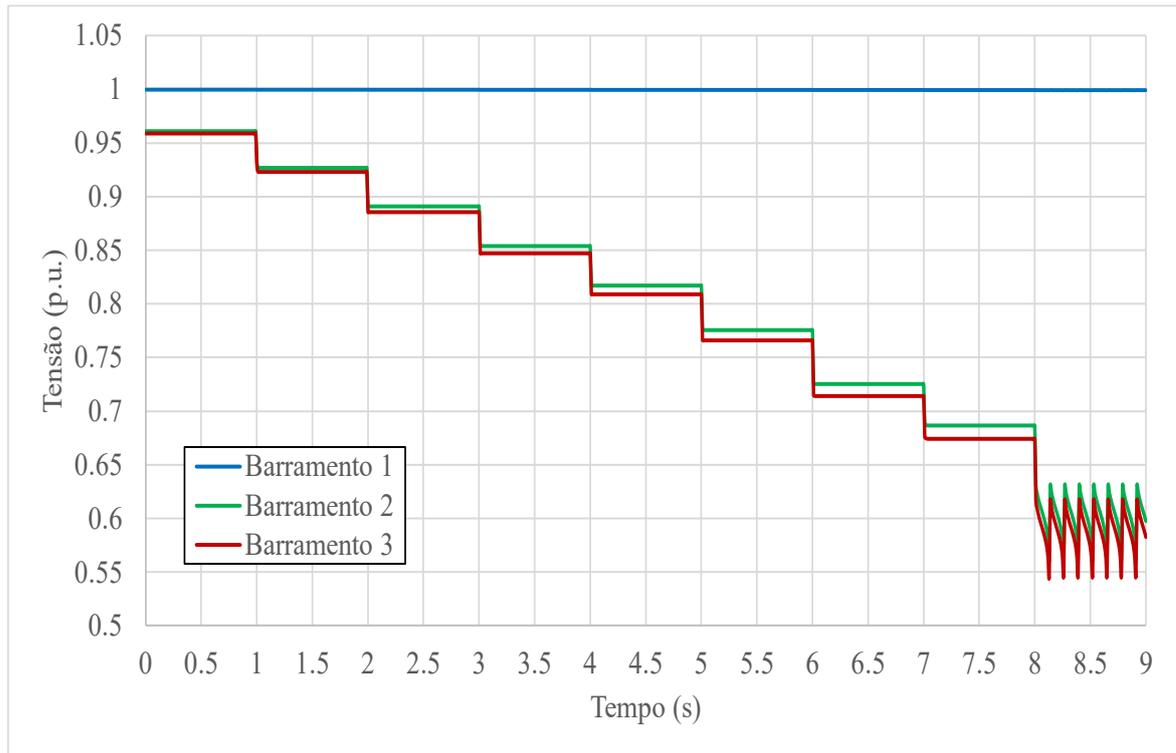
Figura 18: Sistema simplificado 3 barras - cargas de potência constante.



Autoria própria.

Figuras 19, 20 e 21 apresentam os gráficos extraídos do programa. A análise da Figura 19 mostra que ao se incrementar carga ao barramento 3, a tensão cai até atingir o colapso (o que acontece ao se inserir a última carga aos 8 segundos, após isso deve-se desconsiderar qualquer valor apresentado, pois o programa passa a exibir erros numéricos e logo deixa de convergir. É justamente a falta de convergência que identifica o colapso de tensão).

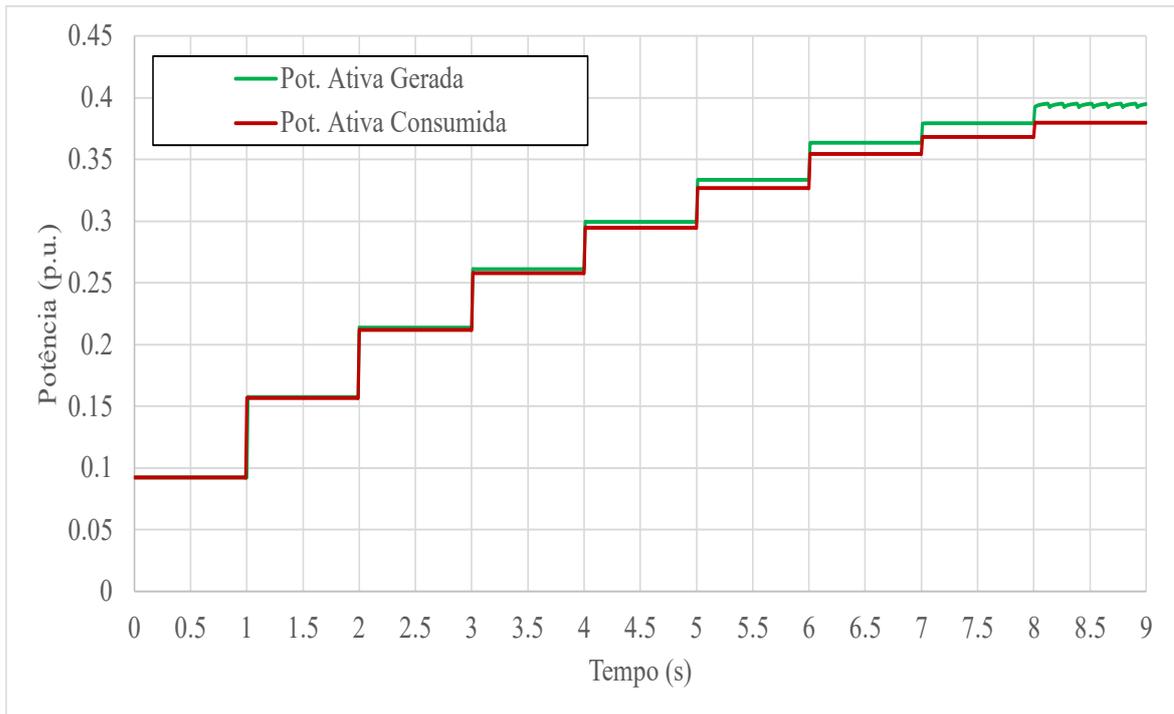
Figura 19: Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Tensões nos barramentos.



Autoria própria.

Na Figura 20 tem-se a potência ativa gerada e a potência consumida no barramento 3, a potência ativa gerada é no início, visualmente, bem próxima da potência ativa consumida, implicando que praticamente toda potência ativa requerida está sendo atendida, somente após alguns segundos uma diferença entre as duas potências começa a ser percebida

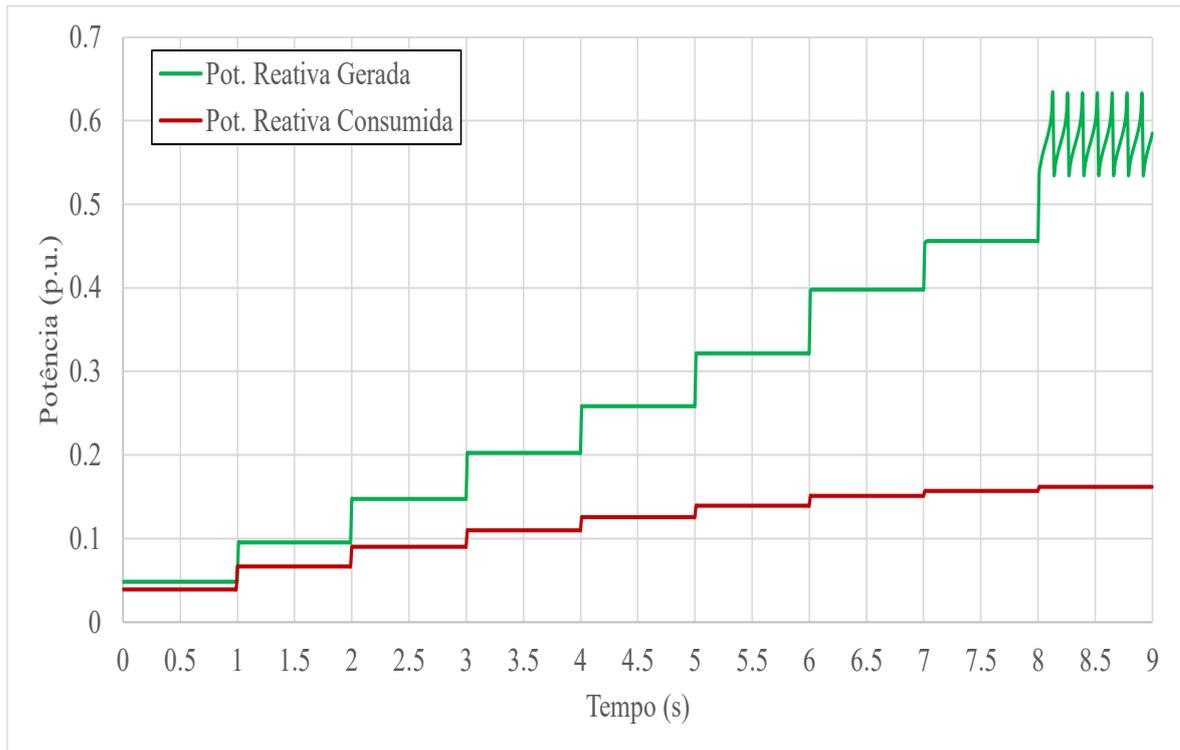
Figura 20: Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Comparação entre potência ativa fornecida pelo gerador e potência ativa consumida na barra de carga.



Autoria própria.

A Figura 21 mostra em que a queda de tensão é devido à falta de reativo na barra de carga. A potência reativa é dissipada quase que totalmente na linha de transmissão, já que reatância indutiva do transformador tem baixo valor.

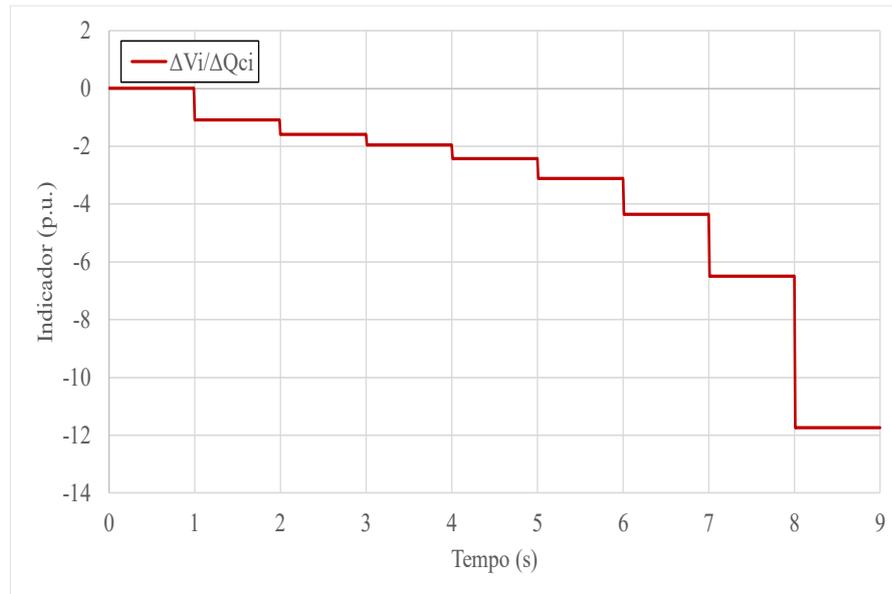
Figura 21: Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Comparação entre potência ativa fornecida pelo gerador e potência ativa consumida na barra de carga.



Autoria própria.

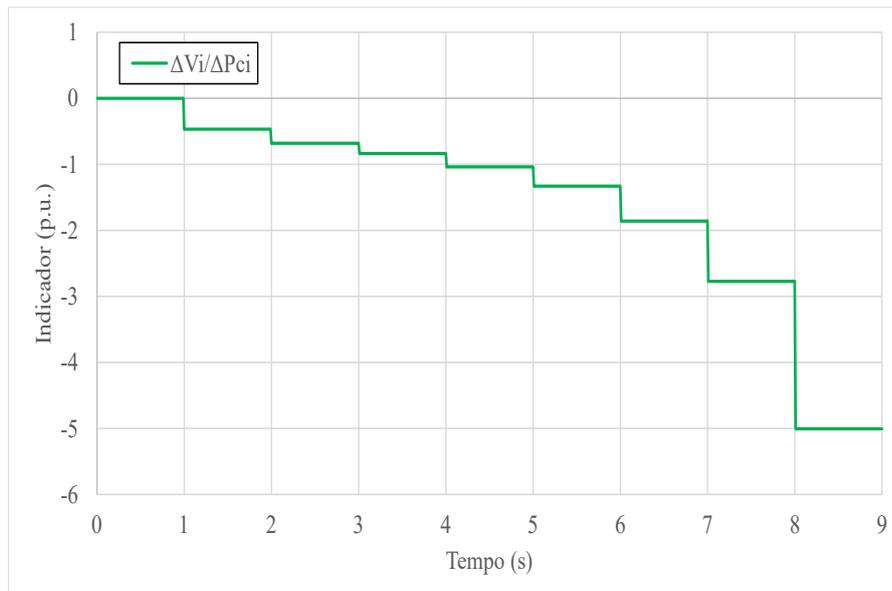
Através das Figuras 22, 23 e 24 vê-se que os indicadores passam a diminuir de valor, permitindo estabelecer uma relação entre o comportamento destes com o colapso de tensão.

Figura 22: Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



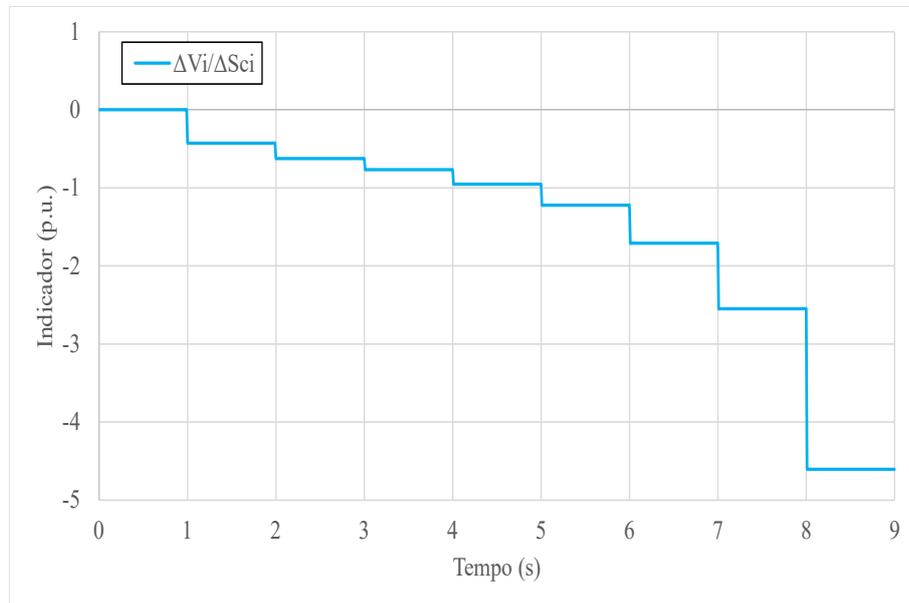
Autoria própria.

Figura 23: Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



Autoria própria.

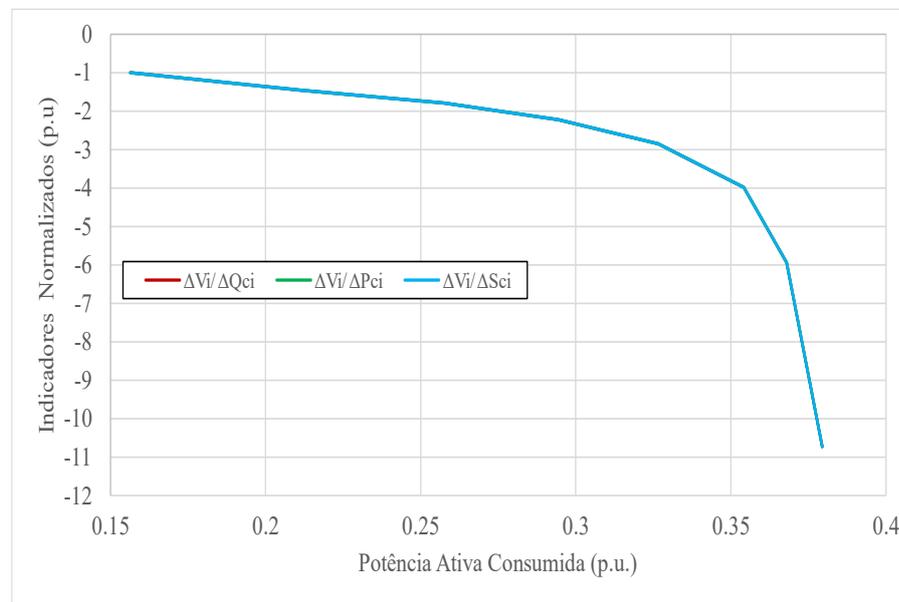
Figura 24: Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



Autoria própria

Na Figura 25 têm-se os três indicadores normalizados versus a potência ativa consumida onde é possível notar que, os indicadores caem drasticamente, tendendo ao infinito, quando o limite máximo de carga é atingido, e prova a relação entre os indicadores aplicados ao caso em questão e a instabilidade de tensão, podendo ser usados, portanto, para antever o colapso de tensão. A normalização foi obtida através da divisão dos valores incrementais de cada indicador pelo seu primeiro valor, a fim de que no primeiro incremento todos fossem iguais a -1, viabilizando a comparação. Os indicadores são iguais pelo mesmo motivo já abordado no subcaso anterior.

Figura 25: Sistema simplificado 3 barras (potência constante): Comparação entre indicadores normalizados.



Autoria Própria.

A Tabela 6 mostra os valores aproximados de potência consumida na barra em p.u., tensão e indicador normalizado.

Tabela 6: Sistema simplificado 3 barras (potência constante). Dados de cargas, tensão e indicador normalizado na barra 3.

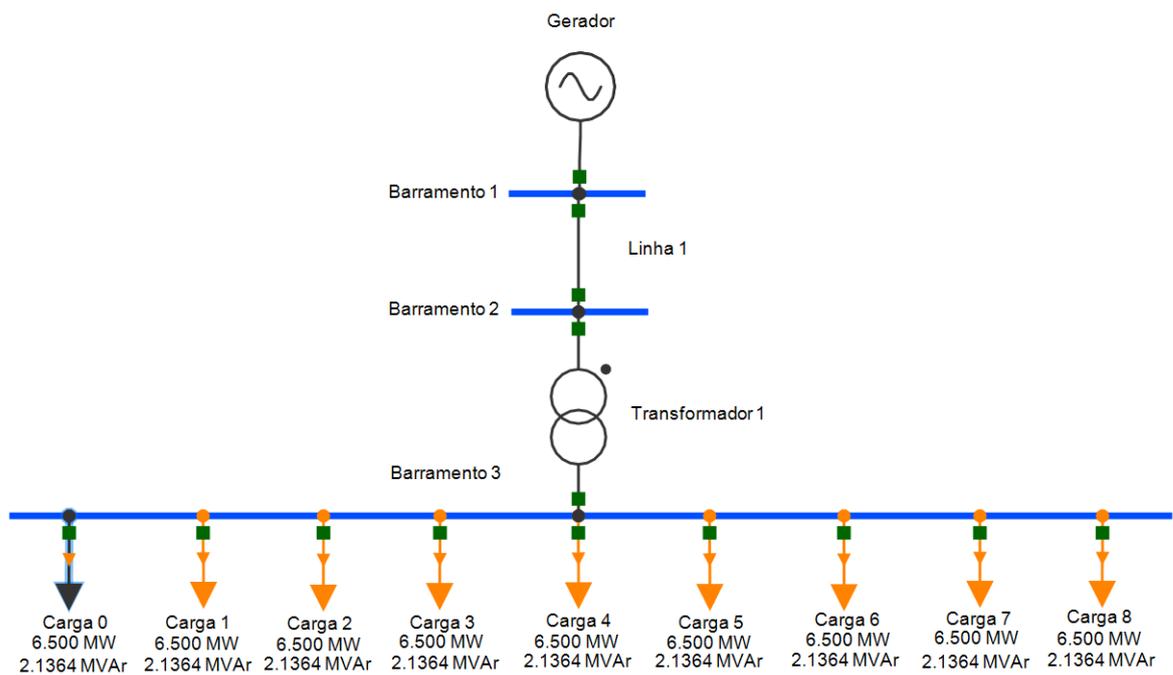
Tempo [s]	Potência Consumida			Barra 3	
	Nº	Pot. Ativa [p.u.]	Pot. Reativa [p.u.]	Tensão [p.u.]	Indicador Normalizado [p.u.]
0	0	0,0920	0,039	0,96	0,00
1	1	0,1564	0,0666	0,93	-1,00
2	2	0,2116	0,0901	0,89	-1,46
3	3	0,2576	0,1097	0,85	-1,79
4	4	0,2944	0,1254	0,81	-2,22
5	5	0,3266	0,1391	0,77	-2,85
6	6	0,3542	0,1509	0,71	-3,98
7	7	0,3680	0,1568	0,67	-5,94
8	8	0,3795	0,1617	0,60	-10,73

Analisando os dados da tabela pode-se notar que no segundo incremento de carga a tensão cai 7% (em relação valor inicial, carga zero) enquanto o indicador decai 46% (em relação a primeiro incremento, carga 1), as seguintes adições de carga levam o indicador a decair ainda mais, chamando atenção para o sexto e sétimo incremento que reduzem o coeficiente em 298% e 494%, enquanto a tensão cai 26% e 30%, respectivamente. Aos 8 segundos, após uma carga bem pequena ser incrementada, a tensão do barramento fica instável, não sendo necessário incrementar mais carga para alcançar o colapso de tensão (ponto no qual o programa deixa de convergir) portanto este último incremento representa a carga máxima admissível, onde os indicadores apresentam seu menor valor.

5.2.3 Simulação com cargas mistas.

A Figura 26 mostra o sistema simplificado 3 barras, com cargas de composição mista, onde 40% da carga é de impedância constante e 60% de potência constante, tanto para potência ativa com para a reativa.

Figura 26: Sistema simplificado 3 barras - composição (40% impedância constante e 60% potência constante).

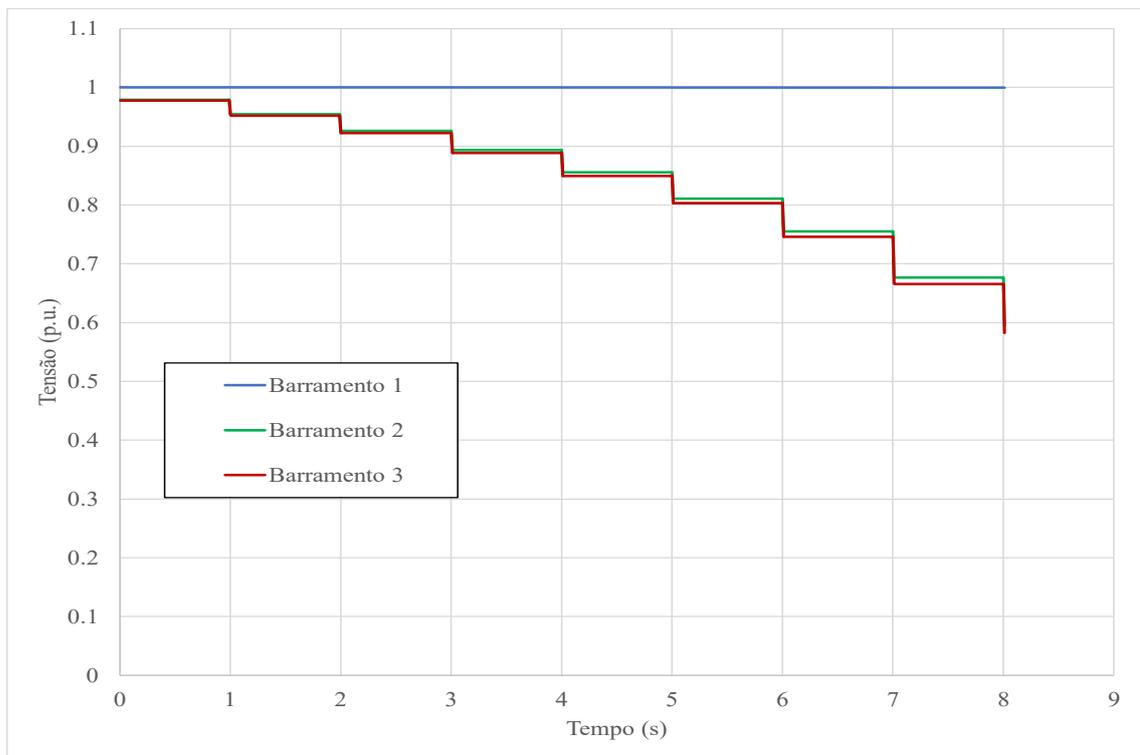


Autoria Própria.

Na

Figura 27 tem-se o comportamento das tensões nos barramentos, o colapso de tensão é atingido no tempo igual a 8(s). Este ocorre devido a parcela da carga modelada como de potência constante, a parcela de impedância constante é responsável por atenuar a queda de tensão no barramento.

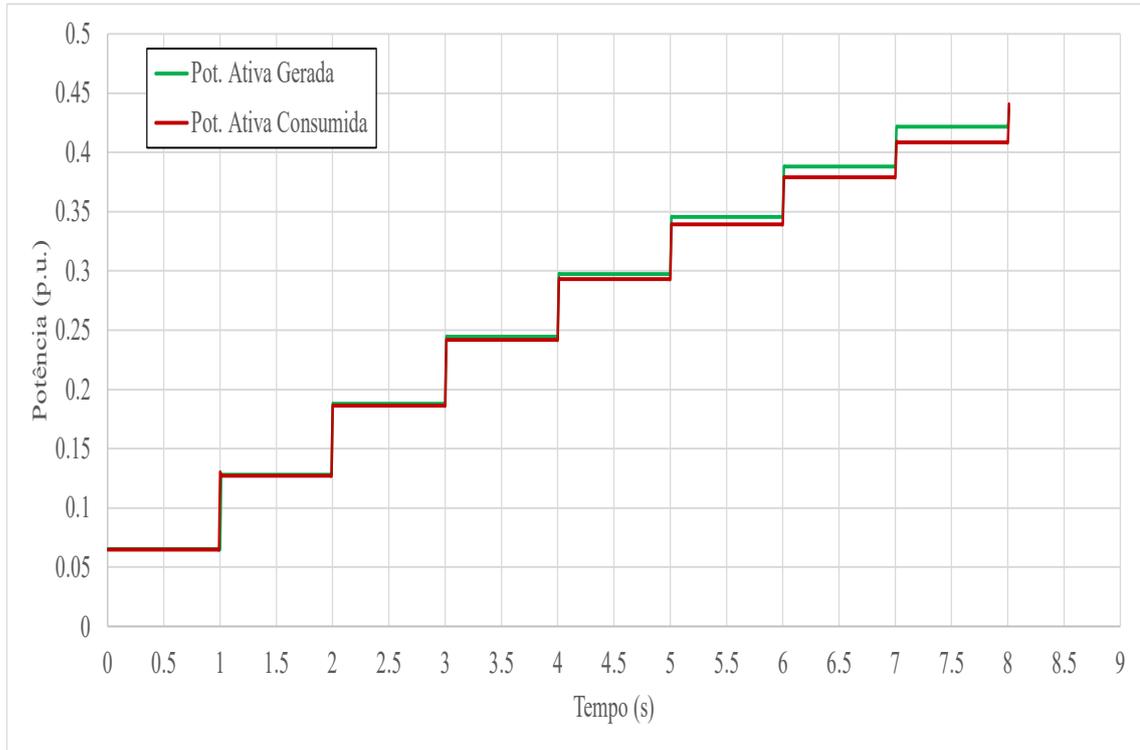
Figura 27: Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Tensões nos barramentos.



Autoria própria.

Na Figura 28 têm-se a potência ativa gerada e a consumida, percebe-se que esta possui um comportamento parecido com o do subcaso anterior, condizendo com o esperado.

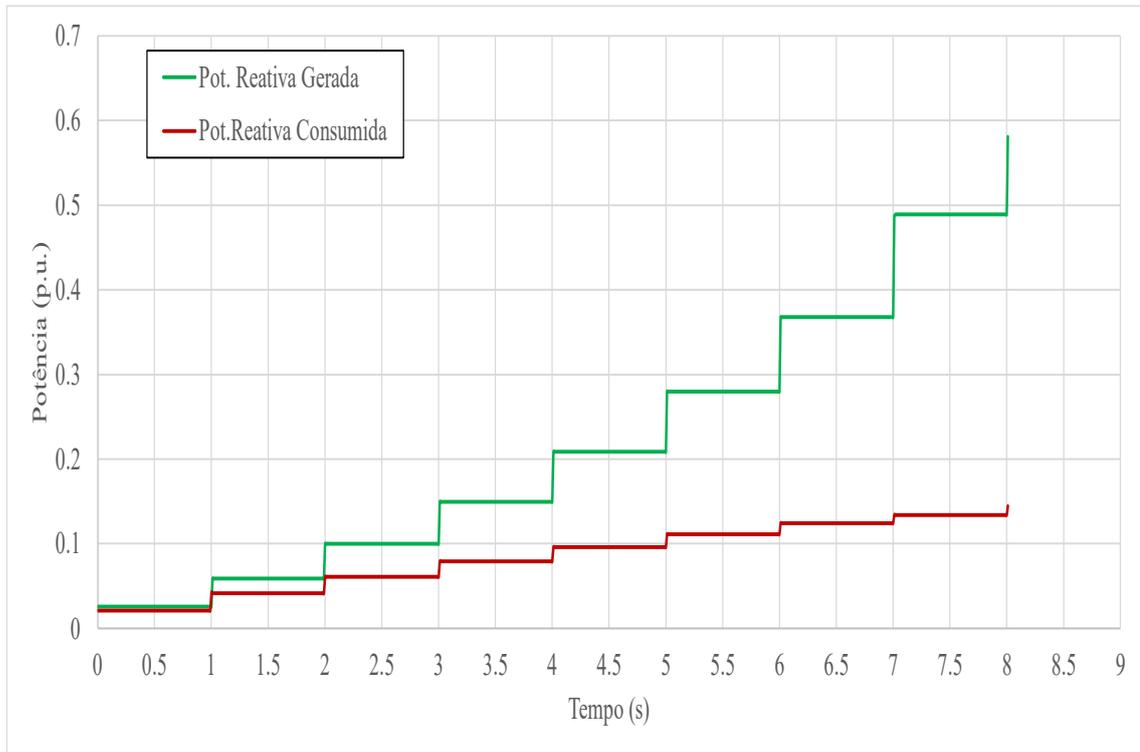
Figura 28: Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Comparação entre a potência ativa fornecida gerador e a potência ativa consumida na barra de carga.



Autoria própria.

A Figura 29 indica, assim como nos casos passados, que a queda de tensão tem como causa principal a falta de reativo na barra de carga

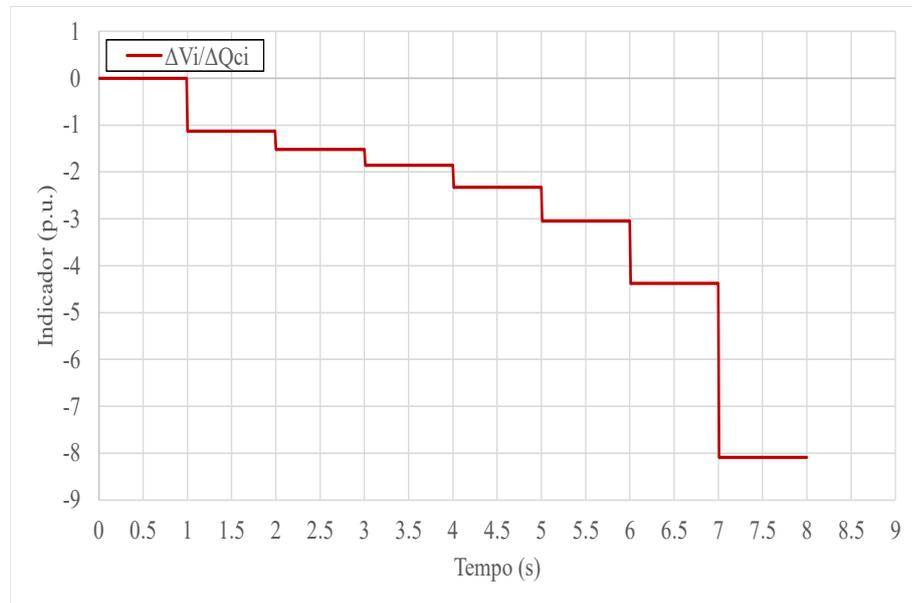
Figura 29: Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Comparação entre a potência reativa fornecida gerador e a potência reativa consumida na barra de carga.



Autoria própria.

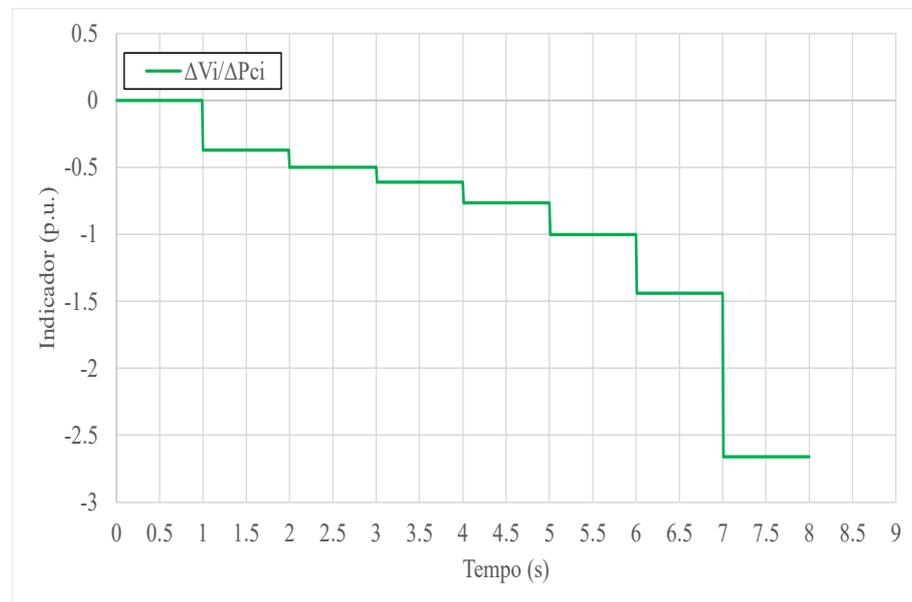
As Figuras 30 a 32 trazem os indicadores, os quais se comportam de maneira adequada, decrescendo conforme a tensão se deteriora no barramento de carga. Aos 8 segundos, o colapso de tensão ocorre de forma abrupta, o programa deixa de convergir e não possibilita que o indicador gere valores incrementais.

Figura 30: Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



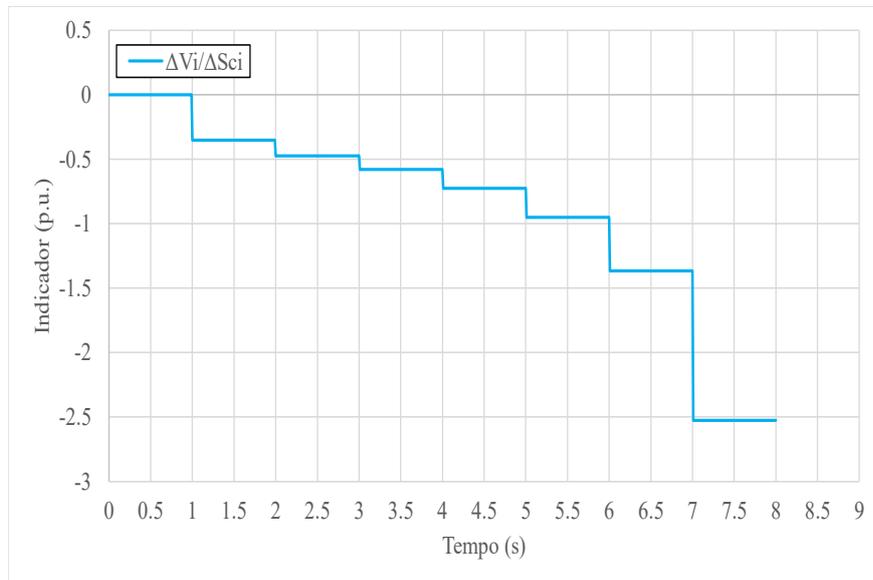
Autoria própria.

Figura 31: Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



Autoria própria.

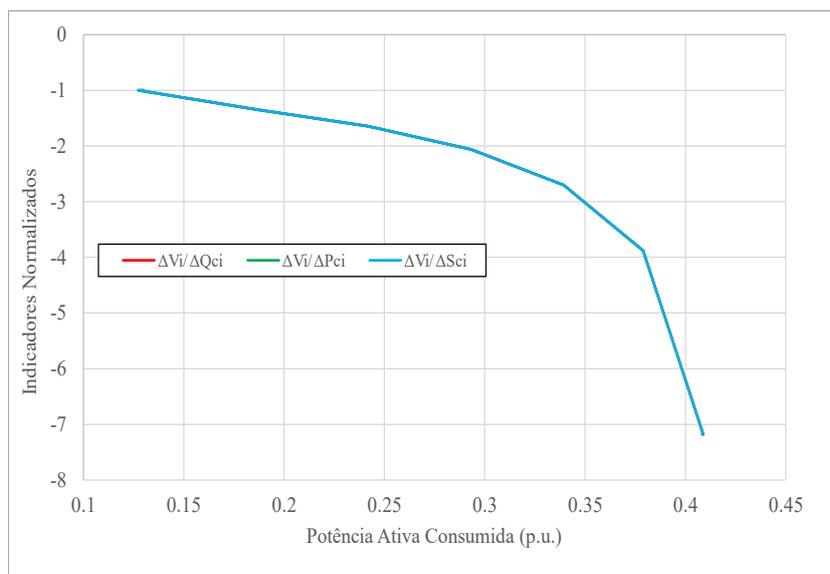
Figura 32: Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga.



Autoria própria.

Na Figura 33 é exibido o comportamento dos indicadores normalizados, estes diminuem de valor e próximo ao colapso, que ocorre aos 8 segundos, tendem ao infinito negativo próximo ao colapso.

Figura 33: Sistema simplificado 3 barras (composição mista): Comparação entre indicadores normalizados.



Autoria própria.

A Tabela 7 mostra os valores aproximados de potência consumida, tensão e do indicador normalizado. Analisando a taxa de mudança do indicador normalizado, é possível ver que este decai cada vez mais, chamando atenção para o 5º, 6º e 7º que decaem 170%, 288% e 618% consecutivamente, enquanto a tensão cai 18%, 23% e 32% respectivamente, revelando assim a proximidade do colapso de tensão. O último incremento não gerou dados devido ao colapso ter ocorrido de forma abrupta.

Tabela 7: Sistema 3 barras (composição mista). Dados de cargas, tensão e indicador normalizado na barra 3.

Tempo [s]	Potência Consumida			Barra 3	
	Nº	Pot. Ativa [p.u.]	Pot. Reativa [p.u.]	Tensão [p.u.]	Indicador Normalizado [p.u.]
0	0	0,0650	0,021	0,98	0,00
1	1	0,1300	0,0427	0,95	-1,00
2	2	0,1864	0,0613	0,92	-1,35
3	3	0,2419	0,0795	0,89	-1,65
4	4	0,2931	0,0963	0,85	-2,06
5	5	0,3393	0,1115	0,80	-2,70
6	6	0,3790	0,1246	0,75	-3,88
7	7	0,4088	0,1344	0,67	-7,18

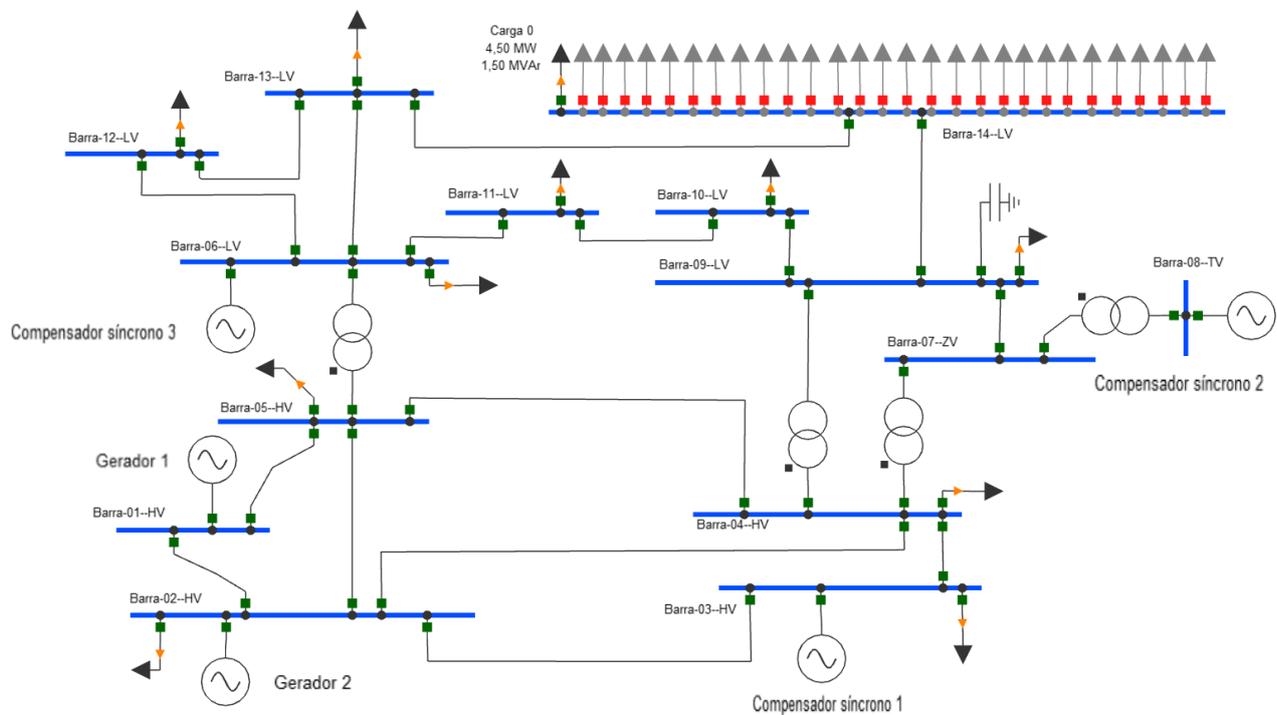
5.3 CASO 2: SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS.

Para a simulação do caso 2, foi utilizado o sistema modelo *IEEE* 14 barras, disponibilizado para download em [34]. Desse modo escolheu-se o barramento 14 para realizar o incremento de três tipos de cargas: impedância constante, potência constante e de composição mista. Com cada tipo de carga realizou-se dois tipos de simulação, a primeira com reguladores automáticos de tensão, também chamados de *AVRs* (do inglês *Automatic Voltage Regulators*), habilitados, e a segunda com estes desabilitados.

5.3.1 Simulação com cargas de impedância constante.

Neste subcaso foi utilizado o sistema exemplo *IEEE* 14 barras, mostrado na Figura 34. Todas as cargas foram modeladas como impedância constante. O fator de potência escolhido foi de 0,9487.

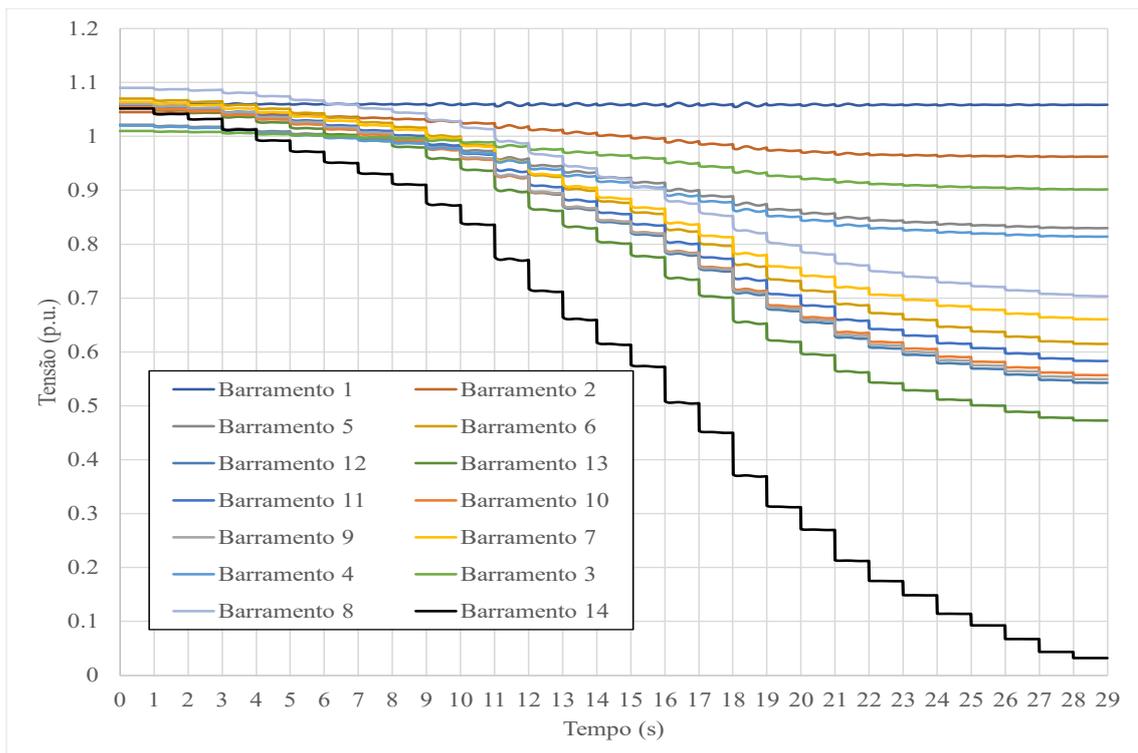
Figura 34: Incremento de carga (impedância constante) no sistema *IEEE* 14 barras.



Autoria própria.

A Figura 35 mostra a tensão nos barramentos, com a atuação dos *AVRs* (tanto de geradores como de compensadores síncronos). Devido ao fato de a carga ser modelada como de impedância constante o sistema nunca entra em colapso de acordo com a definição, mas sempre encontra um novo ponto de operação.

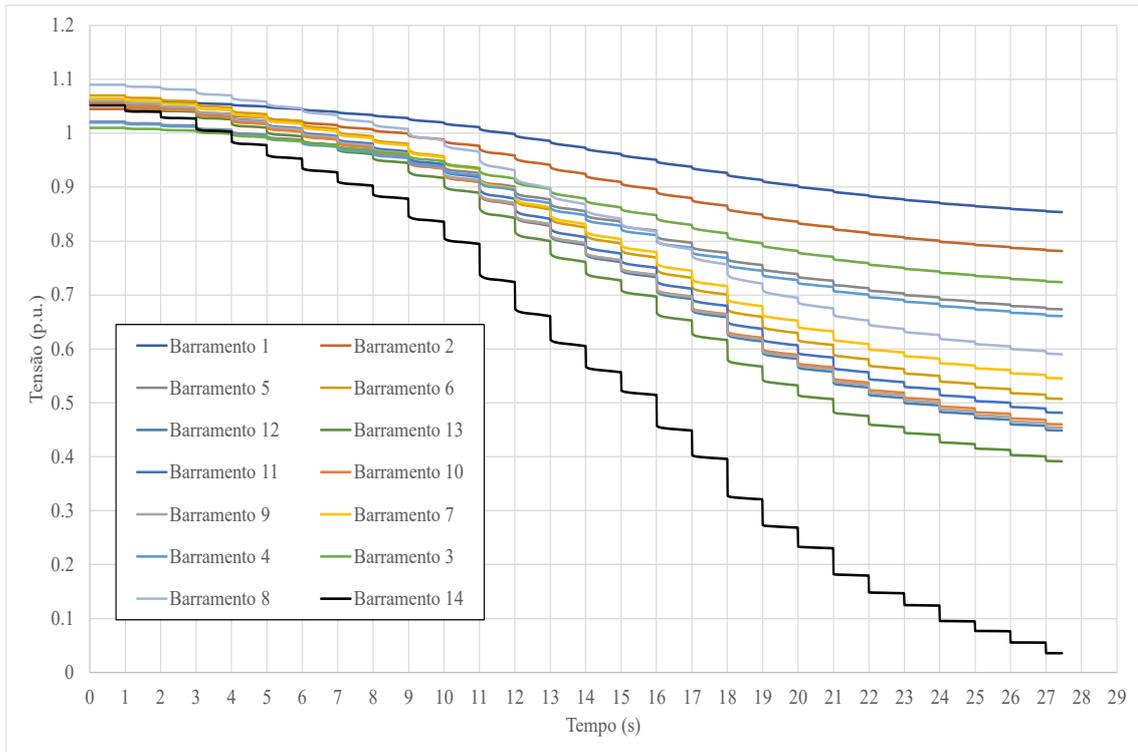
Figura 35: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Tensões nos barramentos com *AVRs*.



Autoria Própria.

Na Figura 36 é mostrado a tensão, sem a atuação dos *AVRs*. Percebe-se que os *AVRs* trabalham no sentido de atenuar a queda de tensão.

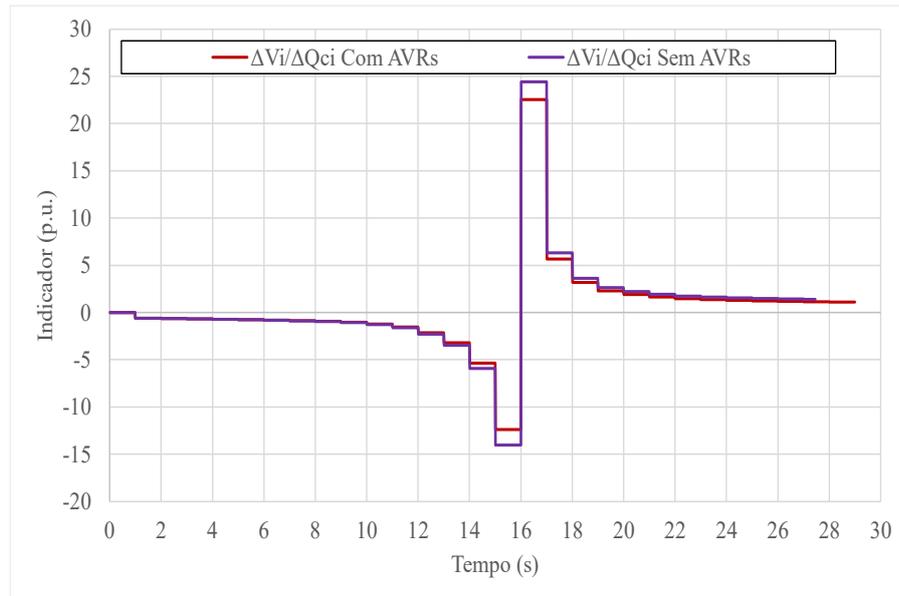
Figura 36: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Tensões nos barramentos sem *AVRs*.



Autoria Própria.

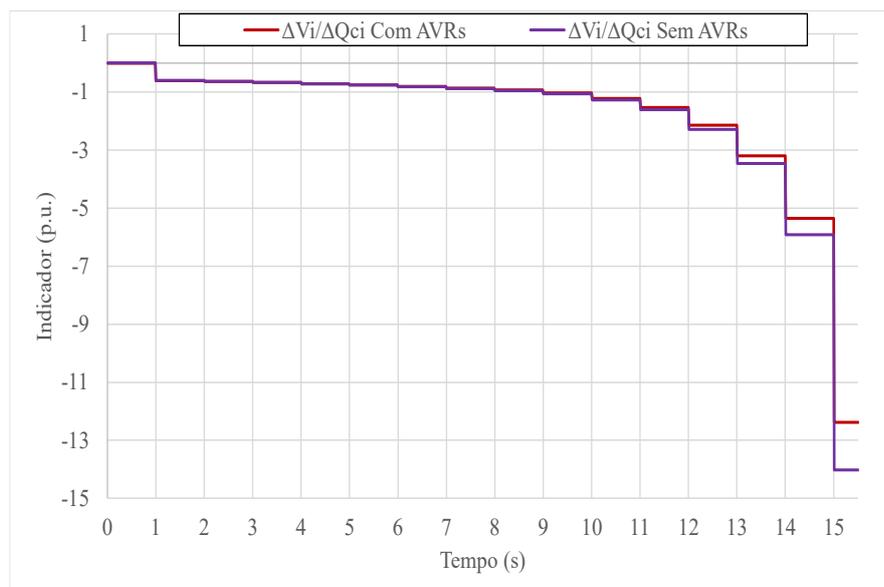
As Figuras 37 e 38 apontam que o indicador 1 (com e sem *AVRs*) diminui de valor a cada incremento de carga, apresentando comportamento correto.

Figura 37: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



Autoria Própria.

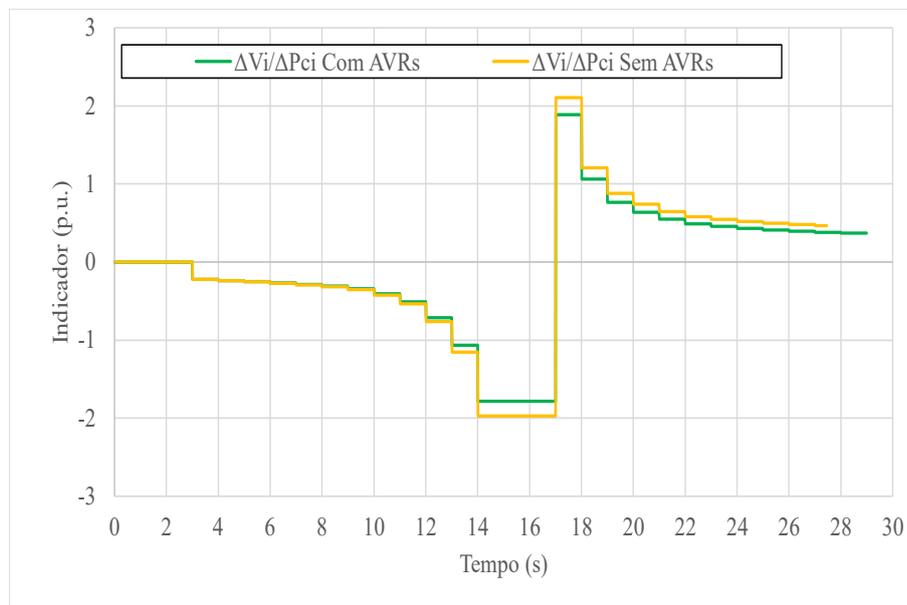
Figura 38: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Indicador 1 ampliado, para melhor visualização.



Autoria Própria.

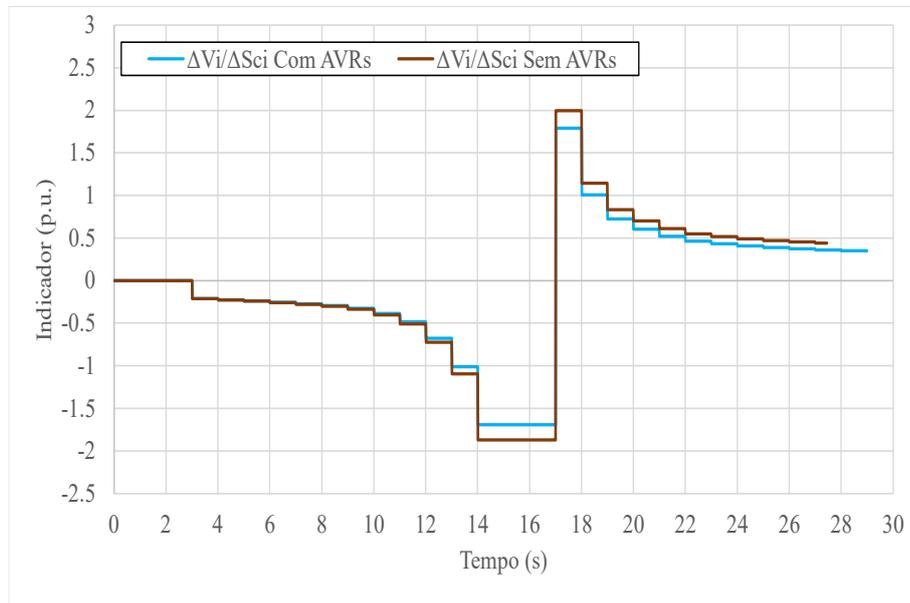
As figuras 39 e 40 mostram que os indicadores 2 e 3 começam a exibir valores sensitivos decrescentes somente após o terceiro incremento de carga, isto porque a variação de potência consumida ativa e aparente, nos dois primeiros incrementos, não foi suficiente para sensibilizar os indicadores. Após o ponto de máxima transferência de potência ser atingido, a potência ativa e reativa entregue ao barramento de carga passa a diminuir, pode-se então dizer que este ponto é onde ocorre o colapso de tensão. Depois do colapso de tensão os indicadores sofrem uma inversão, pelo mesmo motivo citado no caso 1 (impedância constante).

Figura 39: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Indicador 2, $VS12_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



Autoria Própria.

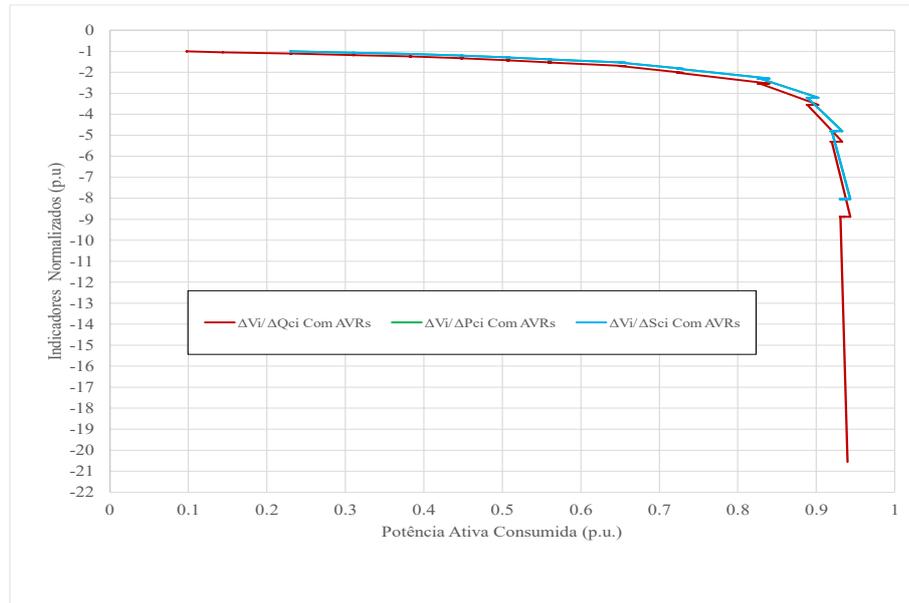
Figura 40: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



Autoria Própria.

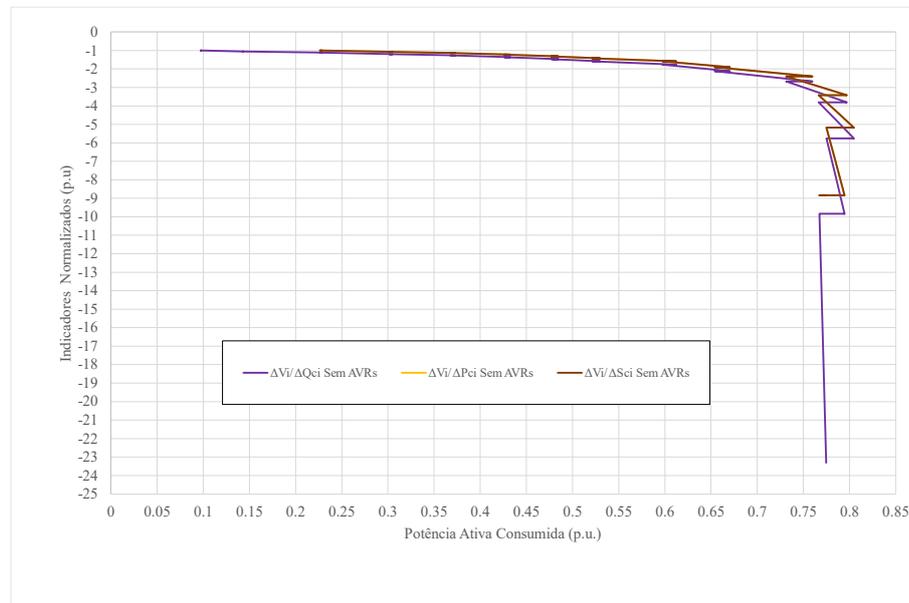
Na Figura 41 é apresentado os indicadores normalizados com a atuação de *AVRs* e em na Figura 42 vê-se os mesmos indicadores sem a atuação de *AVRs*. Estes indicadores foram plotados somente até o instante onde o colapso é atingido (ponto de máxima transferência de potência). Estas figuras mostram que a utilização de *AVRs* no sistema em específico atrasou o colapso de tensão permitindo mais carga no barramento.

Figura 41: Sistema 14 barras (impedância constante): Comparação entre índices normalizados com *AVRs*.



Autoria Própria.

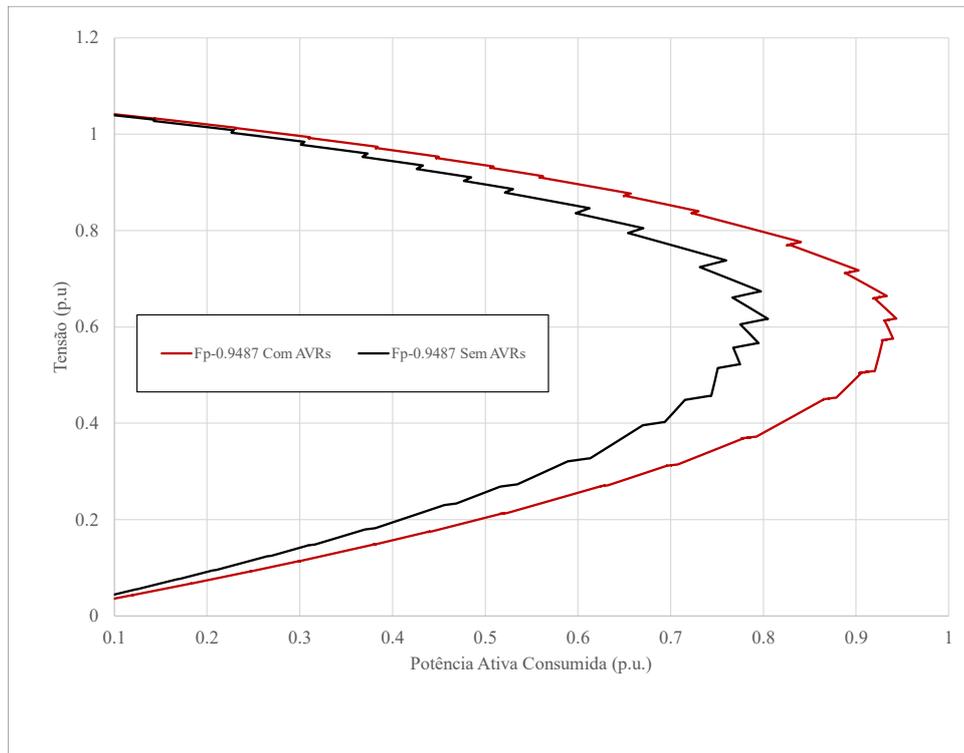
Figura 42: Sistema 14 barras (impedância constante): Comparação entre índices normalizados sem *AVRs*.



Autoria Própria.

A Figura 43 traz a comparação da curva P-V na presença e ausência de *AVRs* e confirma o fato de que a atuação de *AVRs* postergou o colapso de tensão. As curvas P-V estão um pouco distorcidas pelo fato de que a tensão após o incremento, modifica o valor de potência e procura outro ponto de equilíbrio. Na situação sem *AVRs* a tensão cai mais depressa por não ter suporte de reativo, a potência da carga também sofre uma alteração mais brusca.

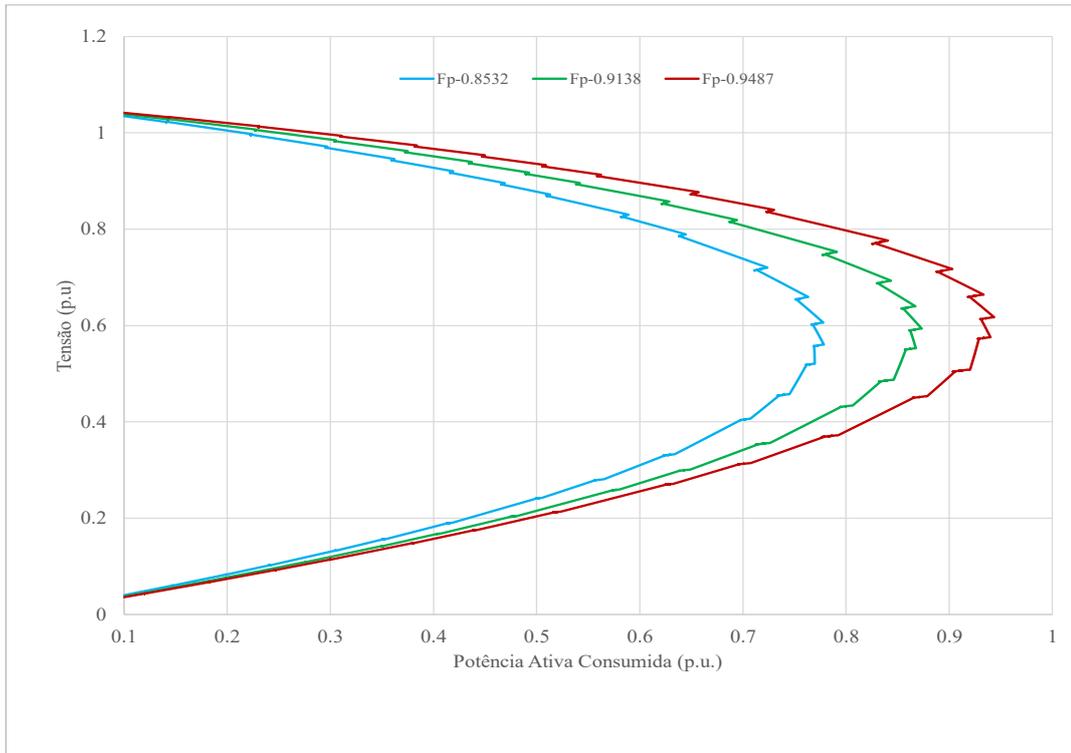
Figura 43: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Curva P-V para o fator de potência 0,9487 com e sem *AVRs*.



Autoria própria.

O modo como o fator de potência influencia o colapso de tensão pode ser visto na Figura 44, pode-se chegar à conclusão de que quanto mais indutivo for o barramento mais suscetível este é ao colapso de tensão.

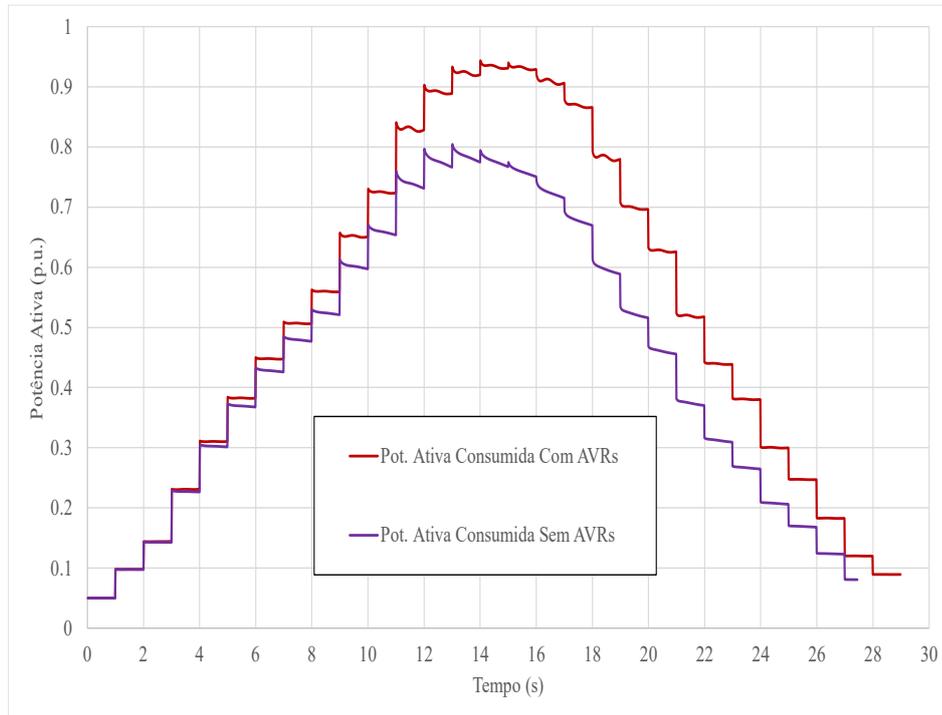
Figura 44: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante) - Curvas P-V para diferentes valores de fatores de potência indutivos: 0,9487 - 0,9138 - 0,8532. Com AVRs



Autoria própria.

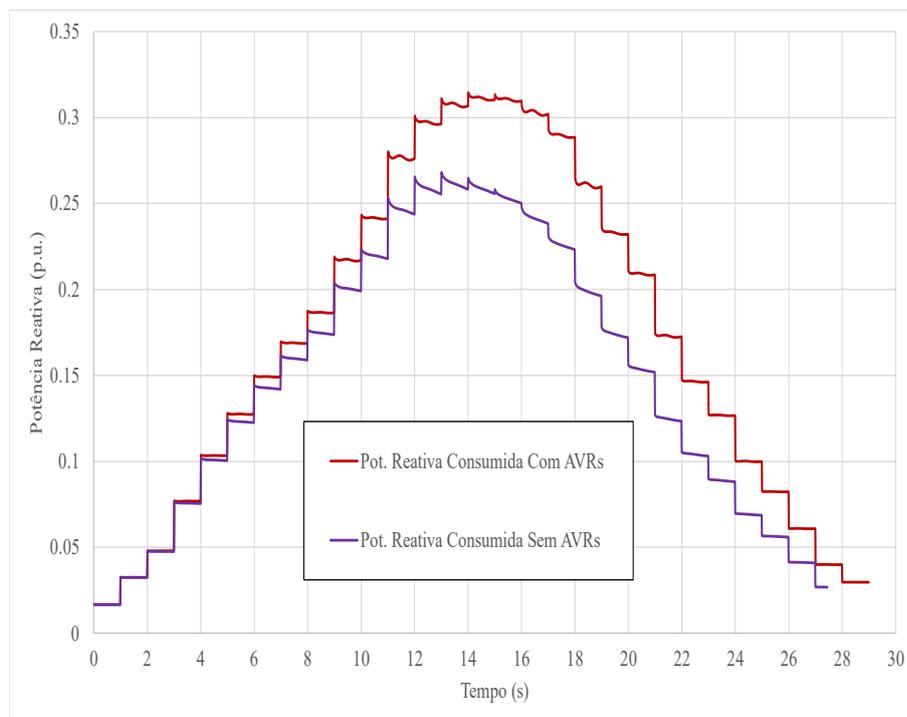
Através da Figura 45, pode-se observar a potência ativa consumida no barramento de carga com e sem *AVRs*; A Figura 46 apresenta a potência reativa consumida no barramento de carga com e sem *AVRs*. Através destas figuras verifica-se que o colapso de tensão se inicia com 0,92 (p.u.) de potência ativa e 0,30 (p.u.) de potência reativa (para o caso com *AVRs* ativos) e com 0,74 (p.u.) de potência ativa e 0,25 (p.u.) de potência reativa (para o caso com *AVRs* desativados). Com isso pode-se observar que a utilização de *AVRs* permitiu maior acréscimo de carga no barramento.

Figura 45: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Potência ativa consumida com e sem *AVRs*.



Autoria Própria.

Figura 46: Sistema *IEEE* 14 barras (impedância constante): Potência reativa consumida com e sem *AVRs*.

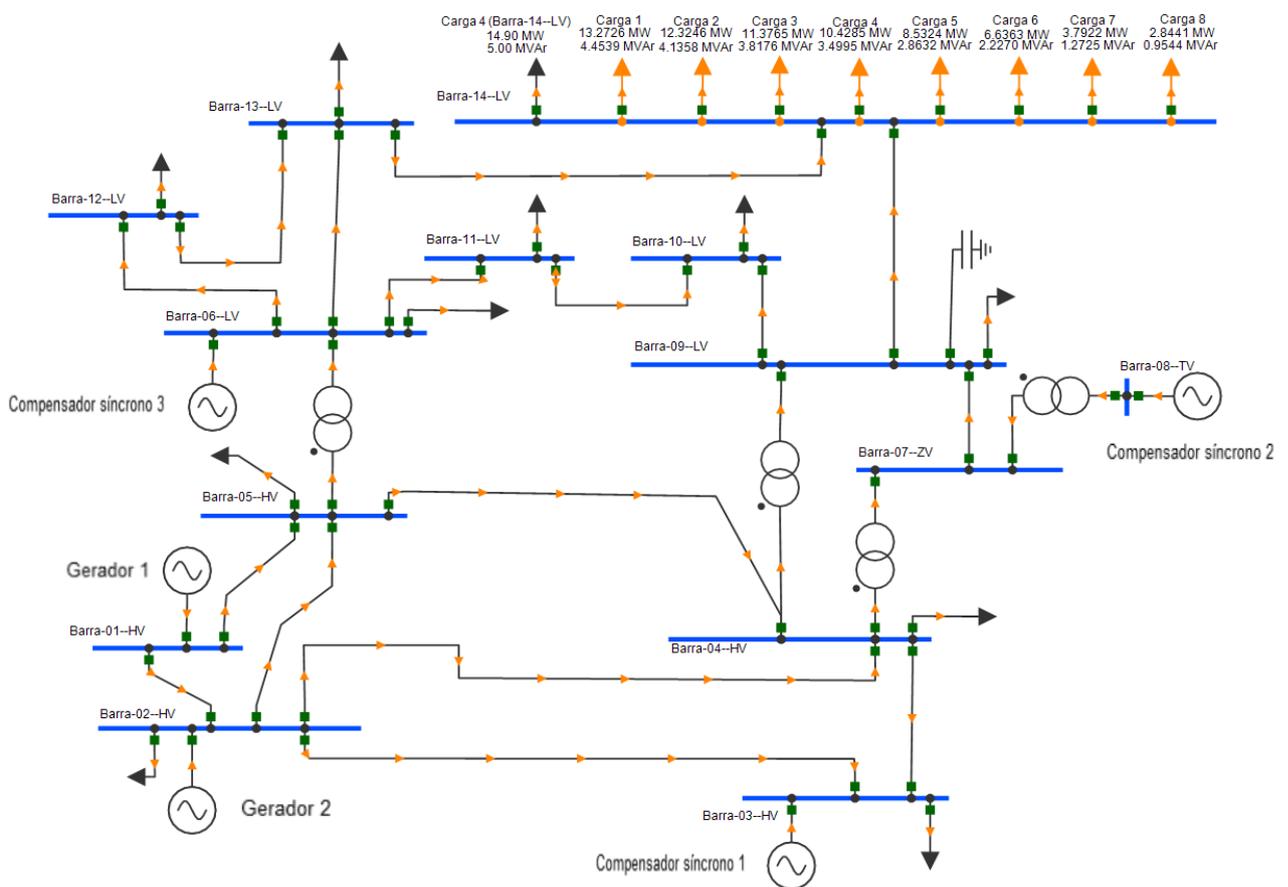


Autoria Própria.

5.3.2 Simulação com cargas de potência constante.

Utilizando o sistema exemplo *IEEE 14 barras*, mostrado na Figura 47. Todas as cargas foram modeladas como potência constante, este tipo de modelagem corresponde ao caso mais crítico para a estabilidade de sistemas, o sistema entra em colapso de tensão assim que uma das linhas alcança o limite máximo de transferência de potência.

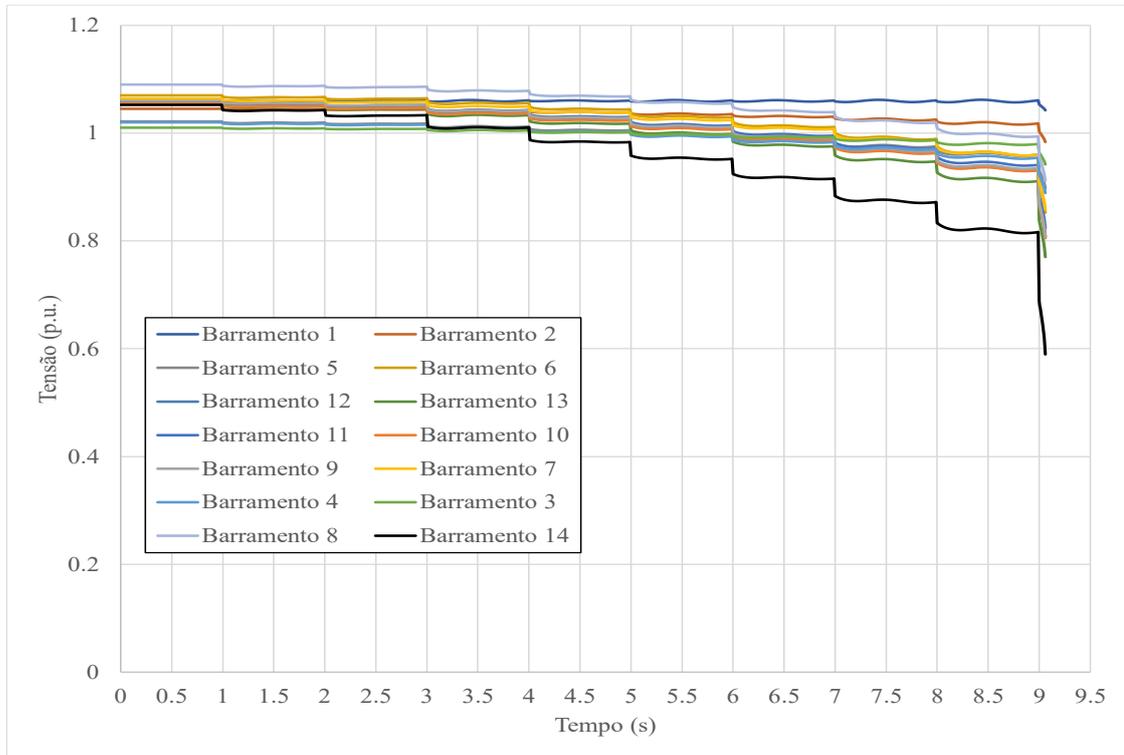
Figura 47: Incremento de carga (potência constante) no sistema *IEEE 14 barras*.



Autoria própria.

A Figura 48 mostra que a tensão no barramento 14, com a atuação dos *AVRs*, entra em colapso após a inserção da nona carga.

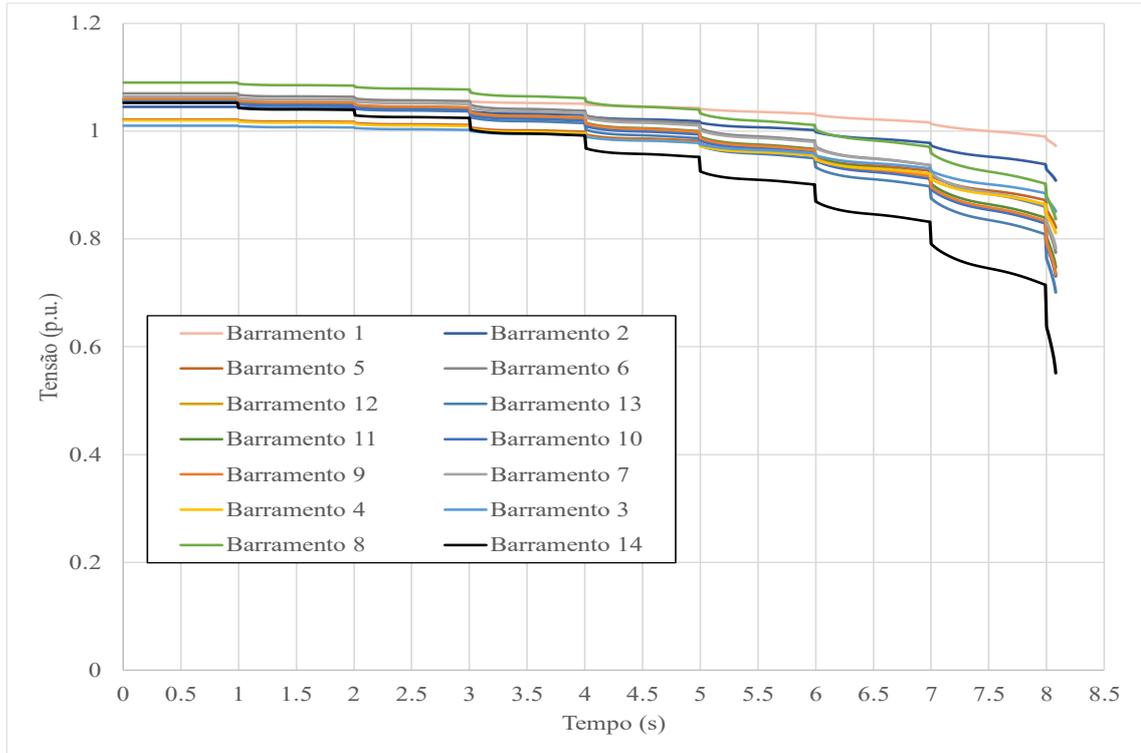
Figura 48: Sistema *IEEE* 14 barras (potência constante): Tensões nos barramentos com *AVRs*.



Autoria Própria.

Na Figura 49 é mostrado que o colapso, sem a atuação dos *AVRs*, ocorre na inserção da oitava carga, de onde se constata que a utilização de *AVRs* atrasa o colapso de tensão.

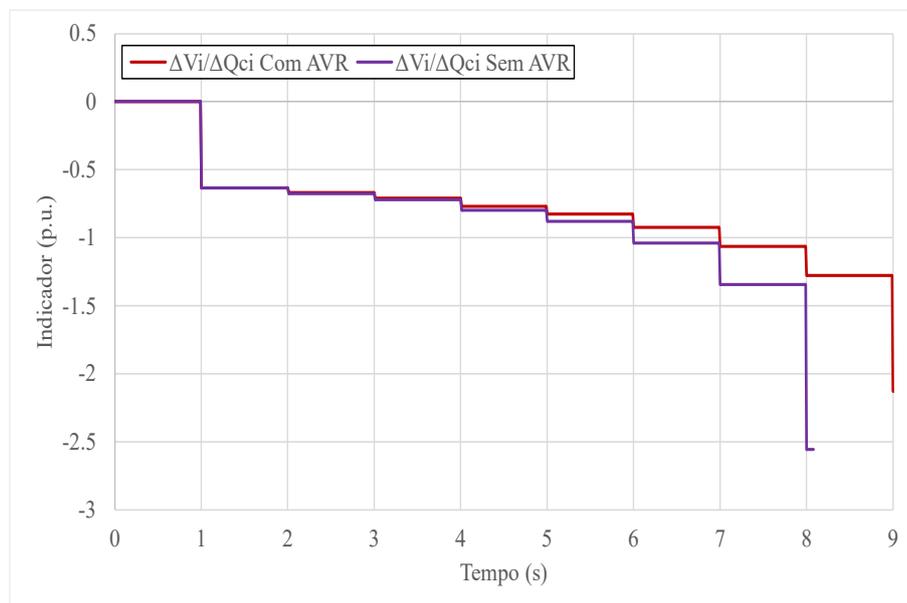
Figura 49: Sistema *IEEE* 14 barras (potência constante): Tensões nos barramentos sem *AVRs*.



Autoria Própria.

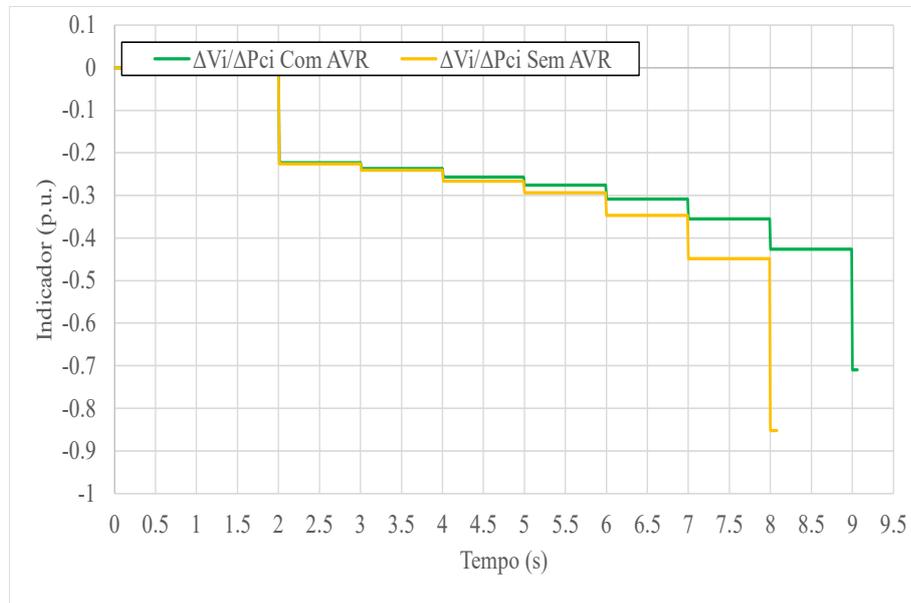
A Figura 50 aponta que o indicador 1 (com e sem *AVRs*) diminui de valor a cada incremento de carga, apresentando comportamento correto, indicando, assim como no caso anterior, uma redução na entrega de reativo para o barramento de carga. As Figuras 51 e 52 mostram os indicadores 2 e 3, assim como o indicador 1, decrescem de acordo com o incremento de carga, a diferença é que estes somente apresentam valores a partir do segundo incremento de carga (aos 2 segundos), pois a potência da carga incrementada no instante igual a 1(s) não foi suficientemente alta para sensibilizar estes indicadores.

Figura 50: Sistema *IEEE* 14 barras (potência constante): Indicador 1, $VSII_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



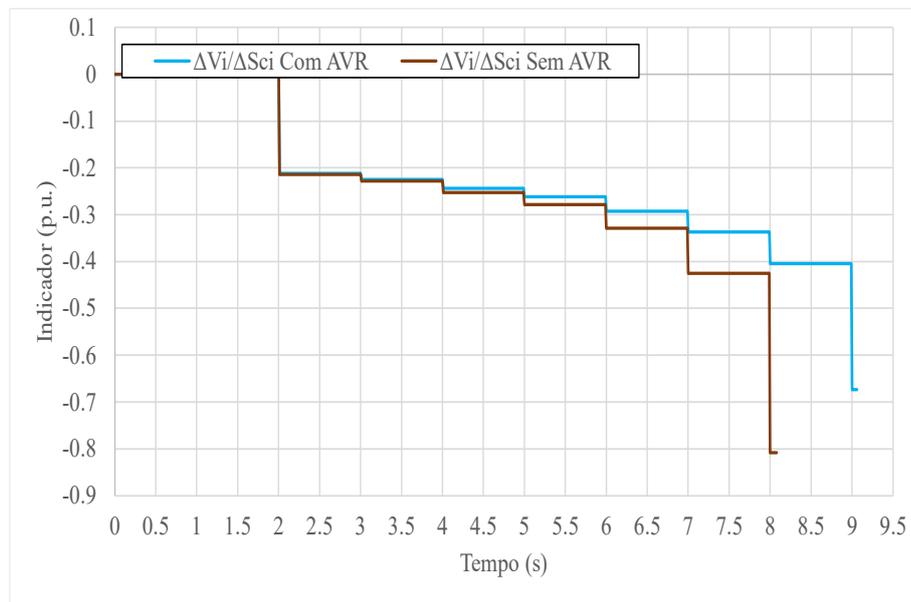
Autoria Própria.

Figura 51: Sistema *IEEE* 14 barras (potência constante): Indicador 2, $VS12_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



Autoria Própria.

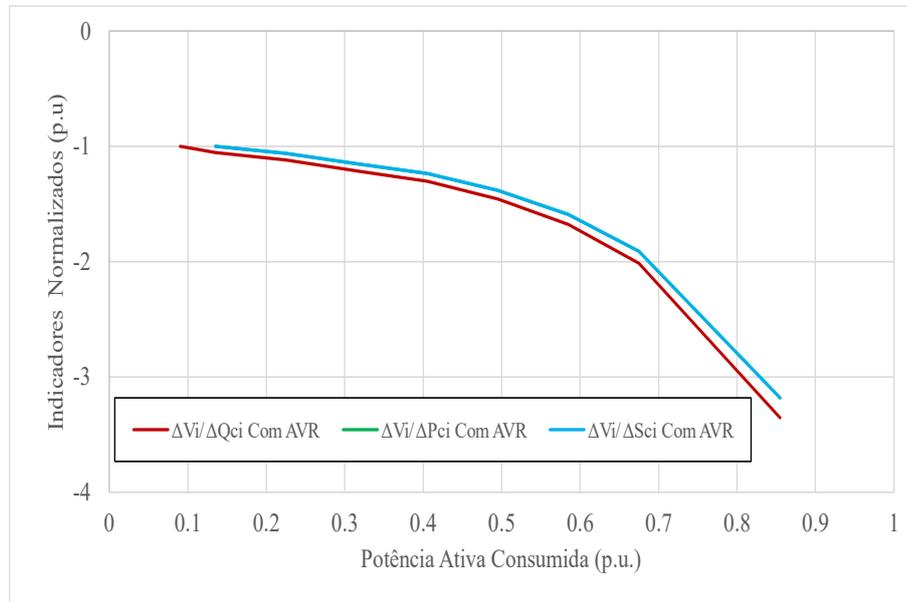
Figura 52: Sistema *IEEE* 14 barras (potência constante): Indicador 3, $VS13_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



Autoria Própria.

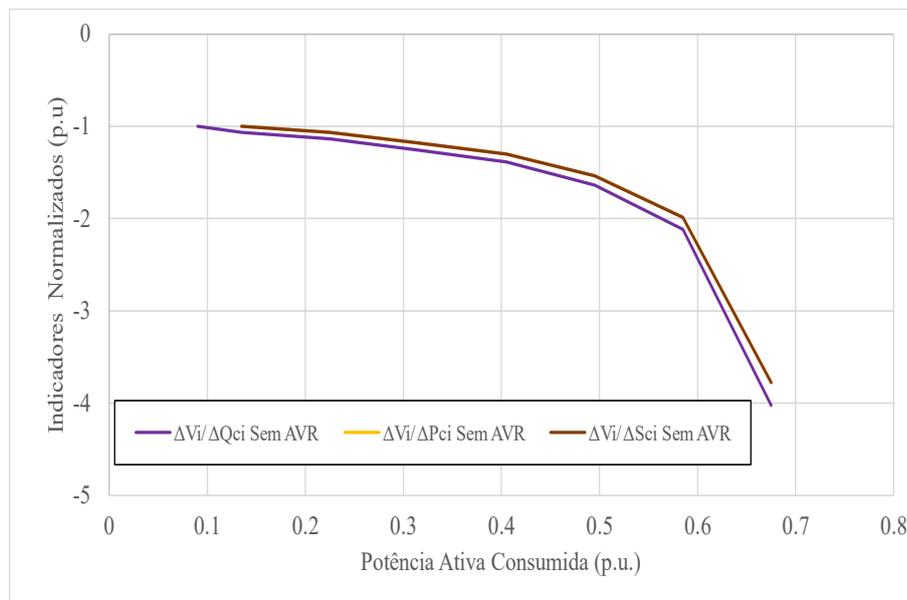
Na Figura 53 e 54 têm-se os indicadores normalizados com e sem *AVRs*. Estes apresentaram comportamento adequado.

Figura 53: Sistema *IEEE* 14 barras (potência constante): Indicadores normalizados com *AVRs*.



Autoria Própria.

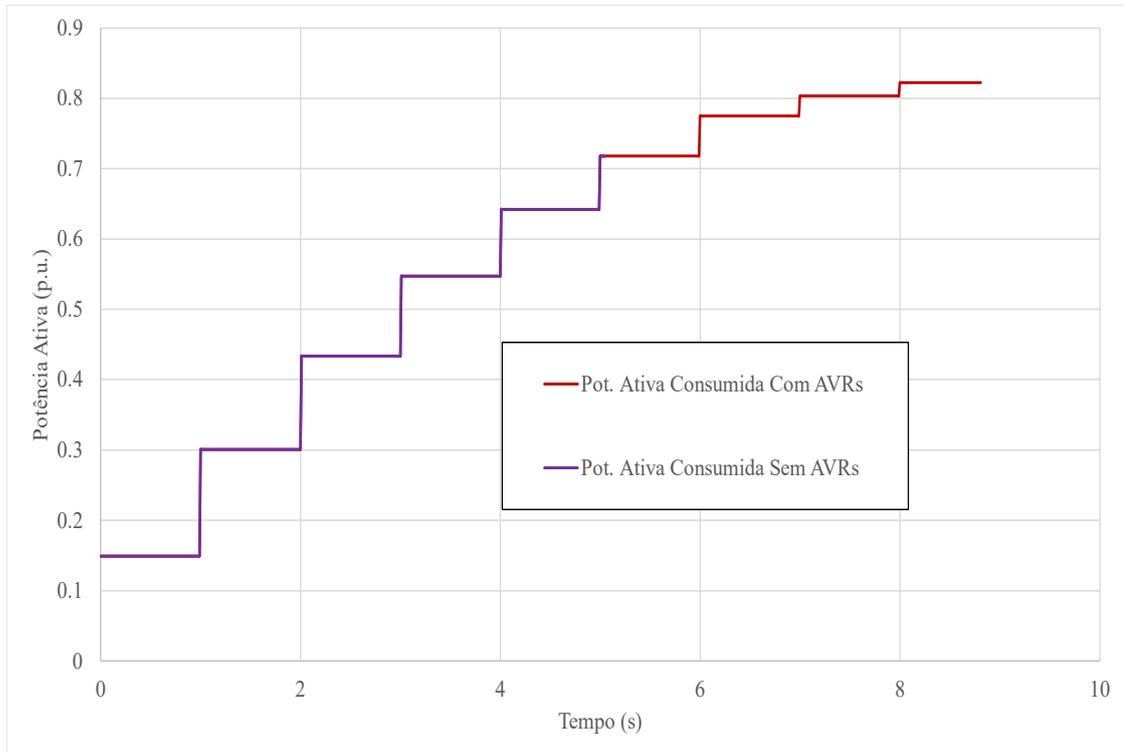
Figura 54: Sistema *IEEE* 14 barras (potência constante): Indicadores normalizados sem *AVRs*.



Autoria Própria.

A Figura 55 mostra a potência ativa consumida pelo barramento nas situações com e sem *AVRs*. Na situação com *AVR's* o colapso acontece quando a potência ativa é aproximadamente 0,85 (p.u

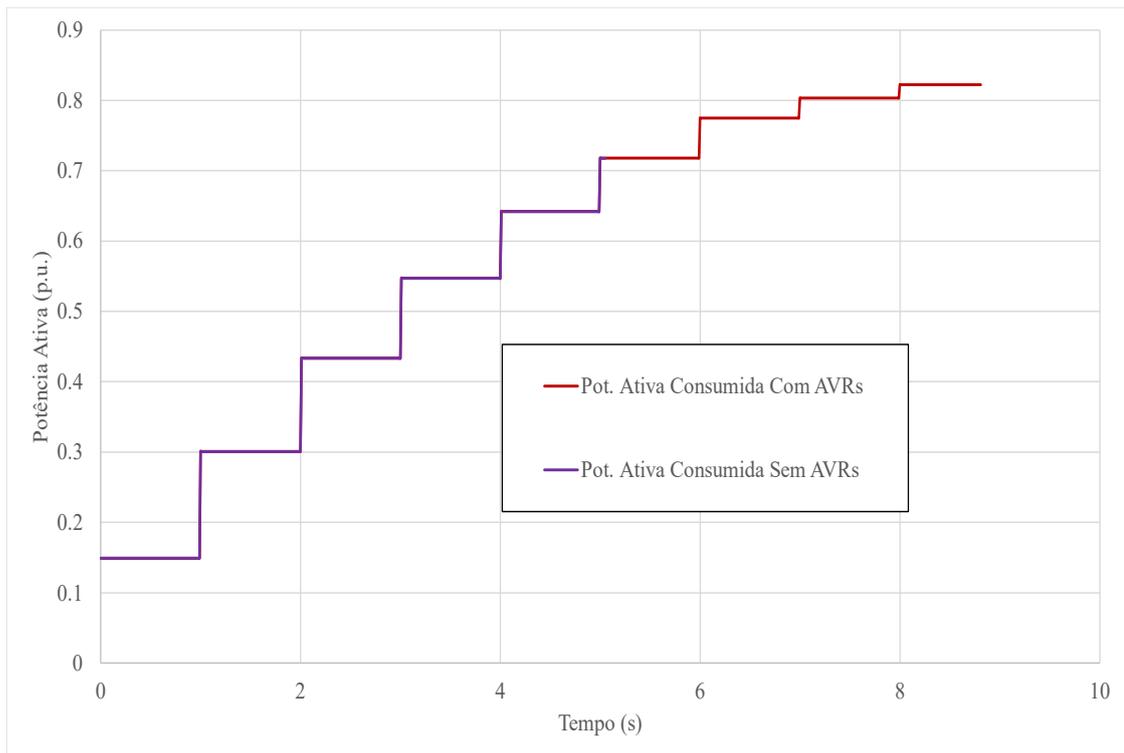
Figura 55: Sistema 14 barras (potência constante): Potência ativa consumida com e sem *AVRs*.



Autoria Própria.

A Figura 56 mostra a potência reativa consumida no barramento para as duas situações, com e sem *AVRs*. Na situação com *AVR's* o colapso acontece quando a potência reativa é aproximadamente a 0,28 (p.u.). Na situação sem *AVRs* o colapso ocorre com aproximadamente 0,22 (p.u.) de potência reativa.

Figura 56: Sistema 14 barras (potência constante): Potência reativa consumida com e sem *AVRs*.



Autoria Própria.

A análise da Tabela 8 apresenta valores aproximados e revela como o incremento de carga afeta a tensão e como o indicador normalizado decai com a adição de carga. Na situação com *AVRs*, vê-se que quando a carga 2 é adicionada a tensão cai, aproximadamente, 2%, o primeiro indicador cai 5%. No terceiro incremento a tensão cai cerca de 4%, o indicador 1 cai 12% enquanto os indicadores 2 e 3 caem 6%. chama-se atenção para o sétimo, oitavo e nono (último) incrementos onde a tensão decresce 16%, 21% e 35%, o indicador 1 cai 68%, 101%, 235% e os indicadores 2 e 3 diminuem 59%, 91% e 218%, respectivamente. Já na situação sem a atuação de *AVRs*, no incremento da segunda carga, a tensão cai 2% enquanto o indicador 1 cai 7%. No terceiro incremento a tensão cai a 5% enquanto os indicadores 1, 2 e 3 caem 14%, 7% e 7%, respectivamente. Nos últimos três incrementos a tensão cai 17%, 25%, 40%, o indicador 1 diminui 64%, 112% e 303% enquanto os indicadores 2 e 3 decrescem 54%, 99% e 278%.

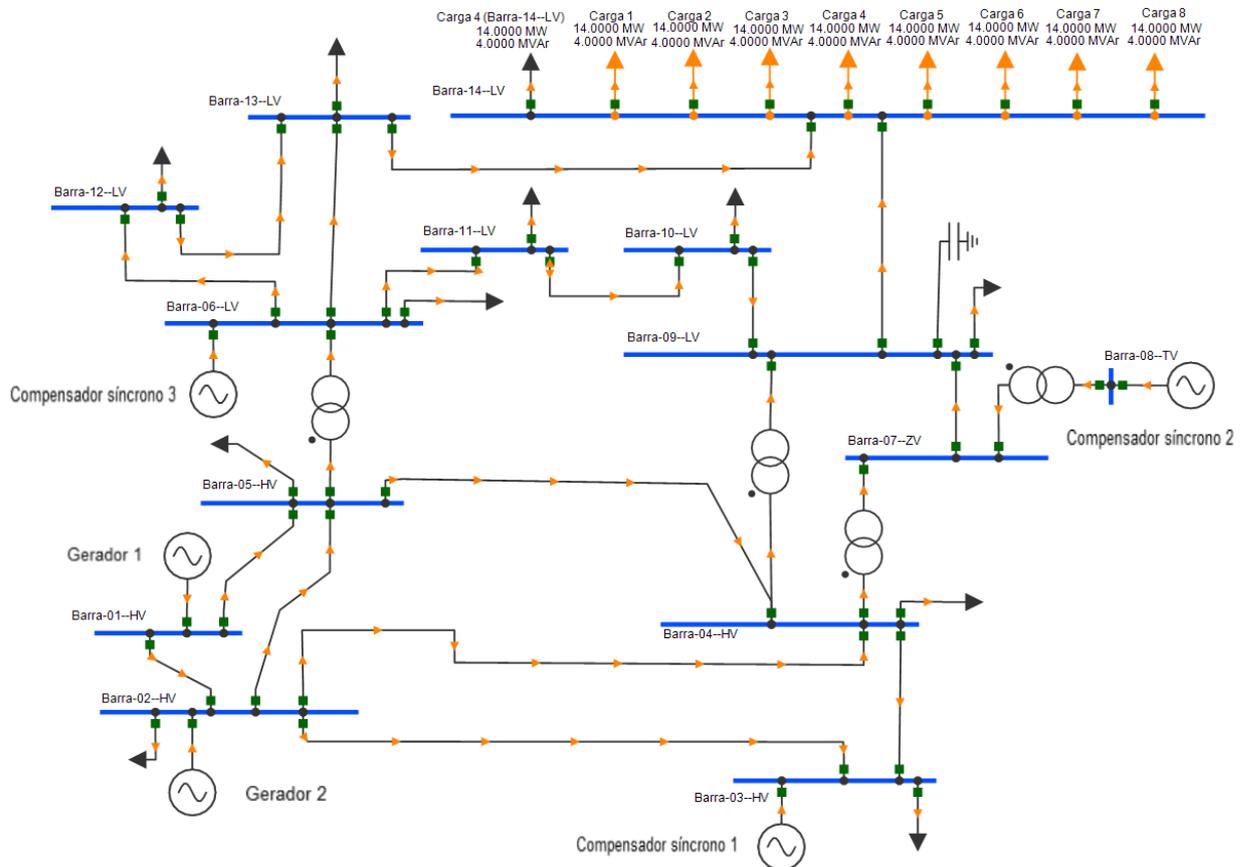
Tabela 8: Sistema IEEE 14 barras (potência constante). Dados de potência consumida, tensão e indicador normalizado na barra 14 (com e sem *AVRs*).

Tempo [s]	Potência Consumida		Barra 14 Com <i>AVRs</i>			Barra 14 Sem <i>AVRs</i>		
	Pot. Ativa [p.u.]	Pot. Reativa [p.u.]	Tensão [p.u.]	Indicadores Normalizados		Tensão [p.u.]	Indicadores Normalizados	
				1	2 e 3		1	2 e 3
0	0,0450	0,0150	1,05	0,00	0,00	1,05	0,00	0,00
1	0,0900	0,0300	1,04	-1,00	0,00	1,04	-1,00	0,00
2	0,1350	0,0450	1,03	-1,05	-1,00	1,03	-1,07	-1,00
3	0,2250	0,0750	1,01	-1,12	-1,06	1,00	-1,14	-1,07
4	0,3150	0,1050	0,99	-1,21	-1,15	0,97	-1,26	-1,18
5	0,4050	0,1350	0,96	-1,30	-1,24	0,92	-1,39	-1,30
6	0,4950	0,1650	0,92	-1,46	-1,38	0,87	-1,64	-1,54
7	0,5850	0,1950	0,88	-1,68	-1,59	0,79	-2,12	-1,99
8	0,6750	0,2250	0,83	-2,01	-1,91	0,63	-4,03	-3,78
9	0,8550	0,2850	0,68	-3,35	-3,18	-	-	-

5.3.3 Simulação com cargas de composição mista (40% impedância constante e 60% potência constante).

Neste subcaso novamente foi utilizado o sistema exemplo *IEEE* 14 barras, mostrado na Figura 57. O valor de potência escolhido para cada carga foi de 14,0 MW e 4,0 MVar, porém foi determinado, através da composição ZIP, que 40% seriam de impedância constante e 60% de potência constante, tanto para a potência ativa com para a reativa. Os valores de carga mostrados na Figura 57, tela inicial, são os valores calculados ao final do fluxo potência e neste caso indicam apenas os valores inseridos pelo usuário, não tendo relação com a potência consumida pelo barramento, já que esta última é dinâmica. É importante destacar que, devido a existência de carga de potência constante o colapso de tensão é alcançado. As cargas de impedância constante amortecem o sistema do ponto de vista da estabilidade de tensão, porém dificulta o controle, já que geradores e compensadores síncronos, tentam controlar a tensão. A tensão por sua vez altera o valor de potência das cargas de impedância constante. Isto pode levar o sistema a instabilidade.

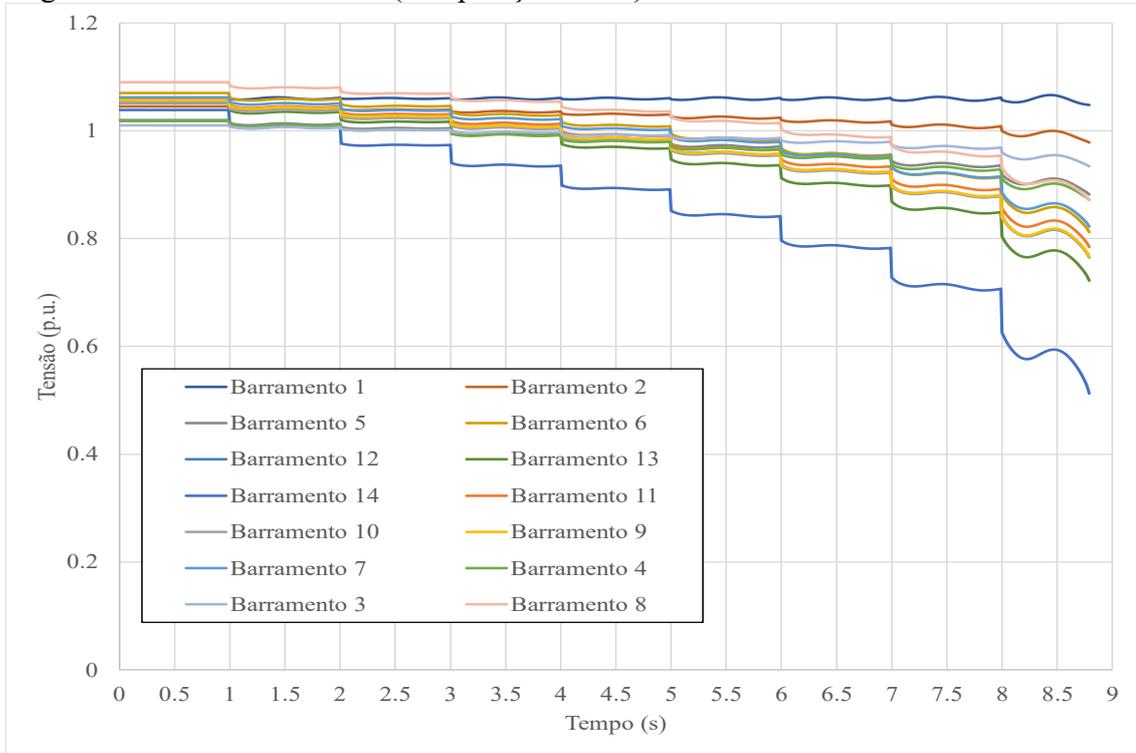
Figura 57: Incremento de carga (composição mista) no sistema IEEE 14 barras.



Autoria própria.

A Figura 58 mostra que a tensão no barramento 14, com a atuação dos *AVRs*, entra em colapso em aproximadamente 8,8 segundos, ou seja, 0,8 segundos após a inserção da última carga.

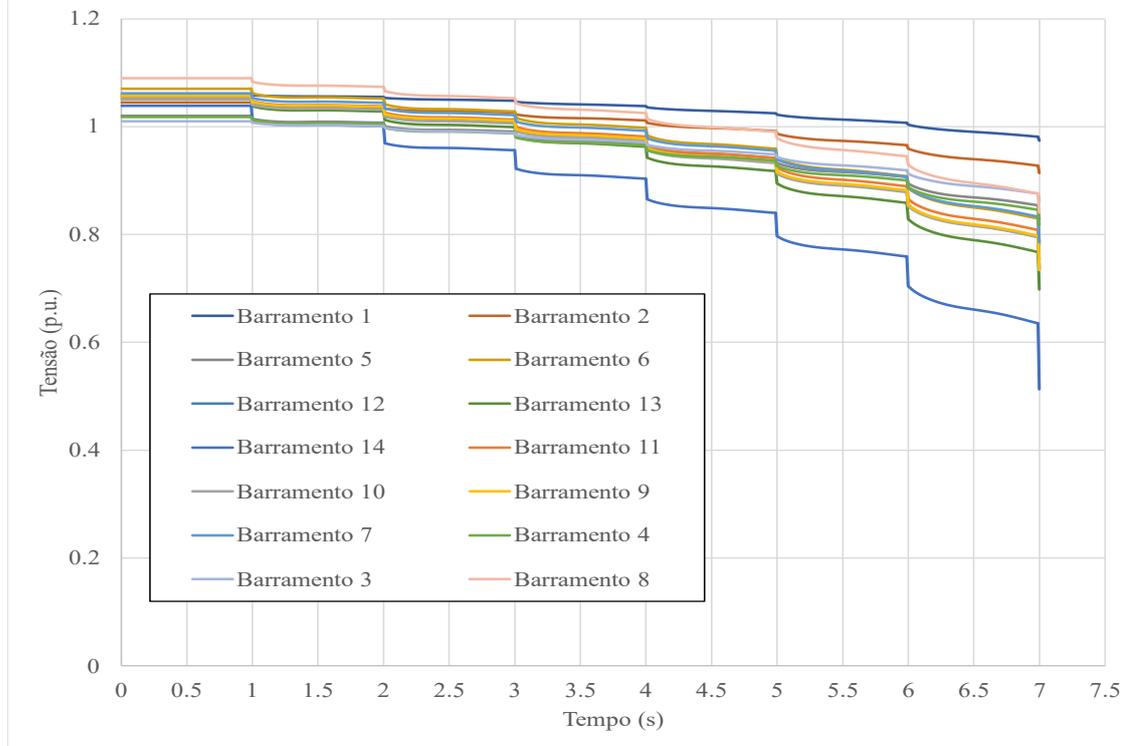
Figura 58: Sistema 14 barras (composição mista): Tensões nos barramentos com *AVRs*.



Autoria própria.

A Figura 59 mostra que o colapso, sem a atuação dos *AVRs*, ocorre na inserção da sétima carga;

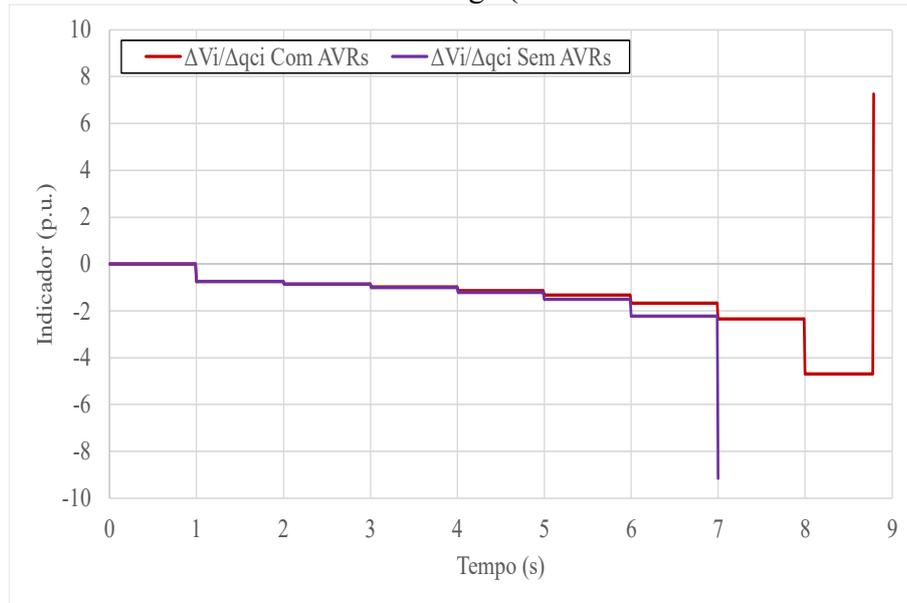
Figura 59: Sistema 14 barras (composição mista): Tensões nos barramentos sem *AVRs*.



Autoria própria.

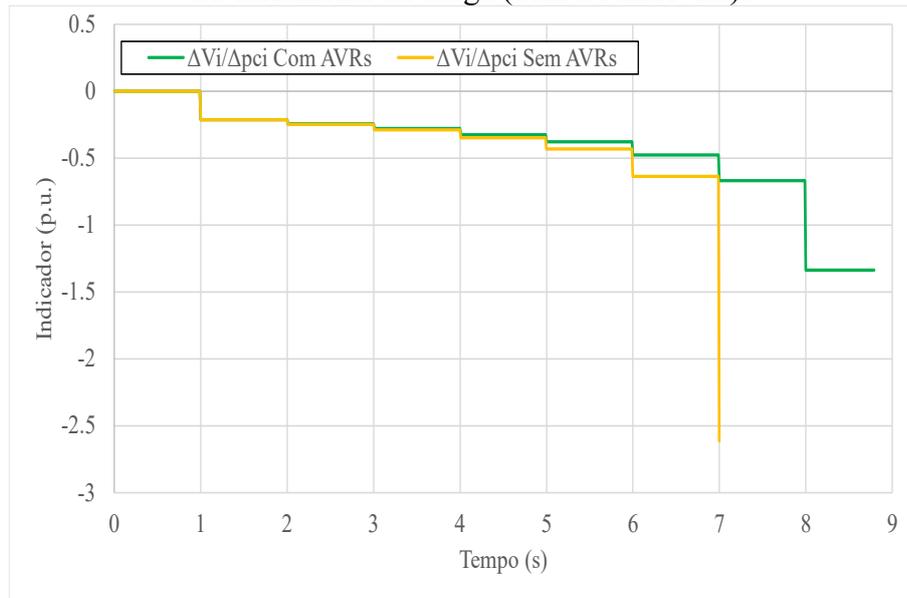
As Figuras 60, 61 e 62 apontam que os indicadores (com e sem *AVRs*) diminuem de valor a cada incremento de carga, indicando, assim como no caso anterior, uma redução na entrega de reativo para o barramento de carga.

Figura 60: Sistema 14 barras (composição mista): Indicador 1, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



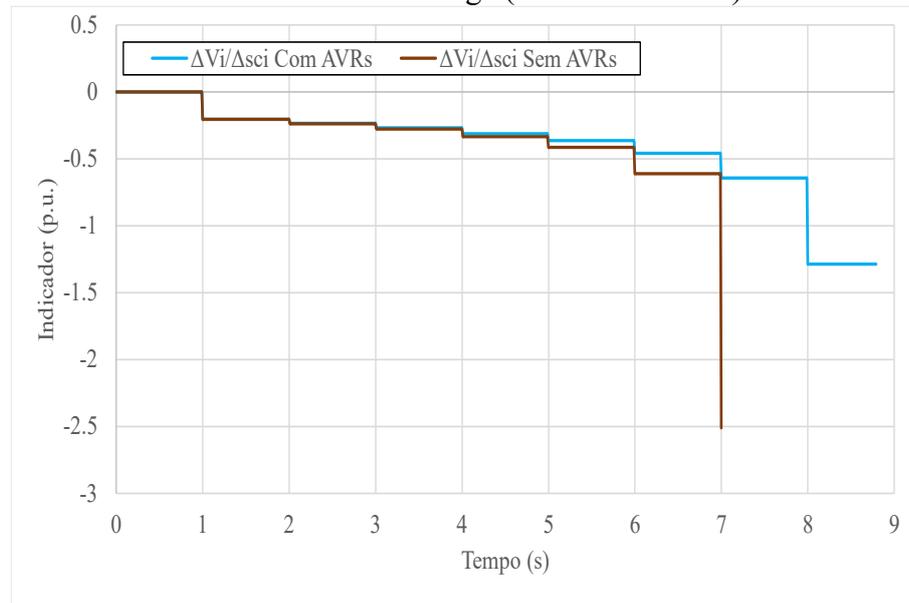
Autoria própria.

Figura 61: Sistema 14 barras (composição mista): Indicador 2, $VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



Autoria própria.

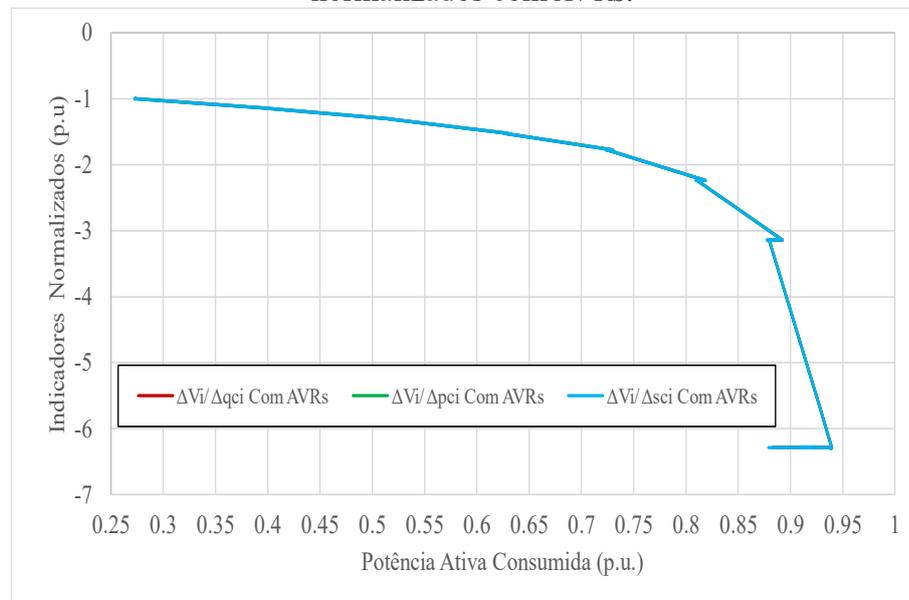
Figura 62: Sistema 14 barras (composição mista): Indicador 3, $VSI3_i = \Delta V_i / \Delta S_{ci}$, aplicado ao barramento de carga (com e sem *AVRs*).



Autoria própria.

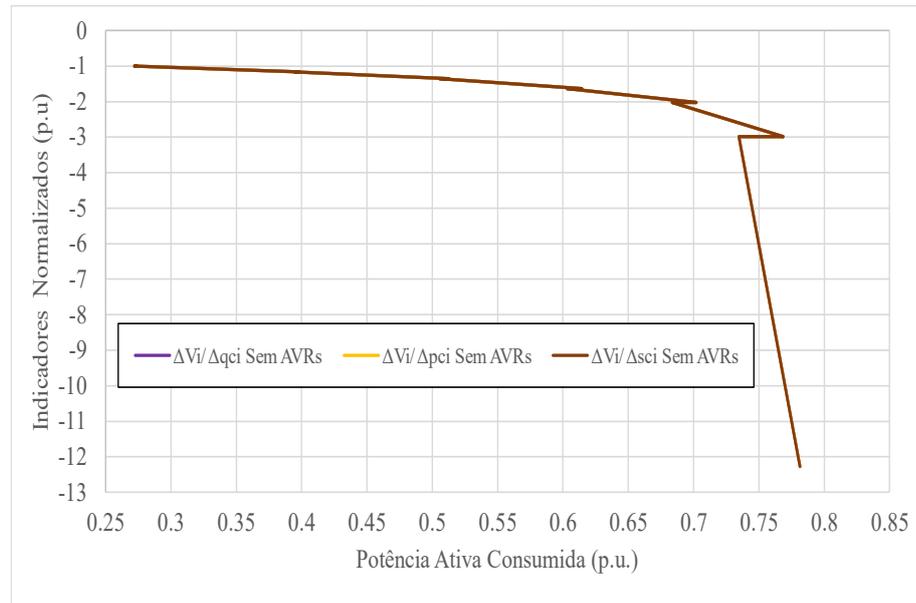
As Figuras 63 e 64 mostram os indicadores normalizados com relação a potência ativa consumida na barra 14, com e sem *AVRs* respectivamente.

Figura 63: Sistema 14 barras (composição mista): Comparação entre indicadores normalizados com *AVRs*.



Autoria própria.

Figura 64: Sistema 14 barras (composição mista): Comparação entre indicadores normalizados sem *AVRs*.



A Tabela 9 traz os dados (valores aproximados) de potência consumida, tensão e indicador normalizado na barra 14.

Na situação com os *AVRs*, vê-se que quando a carga 2 é adicionada a tensão cai, 6% e o indicador 15%, chama-se atenção que no sexto e no sétimo incremento o indicador é decrementado em 124% e 214% respectivamente, enquanto a tensão caiu aproximadamente 23% e 30%. No último incremento o indicador varia 529% e a tensão varia 40%.

Na situação sistema sem atuação de *AVRs*, no incremento da segunda carga, a tensão cai 7% enquanto o indicador cai 16%. Nos conseguintes incrementos o indicador normalizado continua a diminuir, chamando-se atenção para o quinto incremento de carga, que causa uma diminuição de 102% e para o sexto que causa uma queda de 199% no indicador, a tensão cai 23% e 33%, em relação ao quinto e sexto incremento respectivamente. No incremento que leva ao colapso, o indicador diminui 1127%, a tensão cai 51%.

Tabela 9: Sistema IEEE 14 barras (composição mista). Dados de potência consumida, tensão e indicador normalizado na barra 14 (considerando a atuação de *AVRs*).

Tempo [s]	Potência Consumida		Barra 14 Com <i>AVRs</i>		Barra 14 Sem <i>AVRs</i>	
	Pot. Ativa [p.u]	Pot. Reativa [p.u.]	Tensão [p.u.]	Indicadores Normalizados	Tensão [p.u.]	Indicadores Normalizados
0	0,14	0,04	1,04	0	1,04	0
1	0,1338	0,0382	1,01	-1	1,01	-1
2	0,1268	0,0362	0,98	-1,15	0,97	-1,16
3	0,119	0,034	0,94	-1,31	0,92	-1,35
4	0,1101	0,0315	0,9	-1,53	0,87	-1,63
5	0,0997	0,0285	0,85	-1,78	0,8	-2,02
6	0,0883	0,0252	0,8	-2,24	0,7	-2,99
7	0,0731	0,0209	0,73	-3,14	0,51	-12,27
8	0,0455	0,013	0,62	-6,29	-	-

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a implementação de indicadores de estabilidade de tensão no programa PSP-UFU, que dentre outras funções, possui a capacidade de simular um sistema de potência de maneira dinâmica. Desse modo foi possível implementar 3 tipos de indicadores incrementais, sensitivos, com o objetivo de prever o colapso de tensão em um barramento de um sistema com incremento de carga. Nesse contexto, foram realizados dois estudos de caso, sendo o primeiro um sistema radial contendo 3 barras e o segundo o sistema *IEEE* 14 barras. Foram feitos testes considerando diferente tipos de cargas, potência constante, impedância constante e composição mista (40% impedância constante e 60% potência constante). No segundo caso ainda foi estudado o comportamento dos indicadores com e sem a atuação de *AVRs*. Através do caso 1 verificou-se que a falta de reativo no barramento de carga é a causa principal para a queda e conseqüente colapso de tensão. No caso 2 pode-se perceber que a utilização de *AVRs* posterga o colapso de tensão.

Quanto ao tipo de carga escolhida, constatou-se que as cargas modeladas como impedância constante não provocam o colapso de tensão, mas permitem que curva P-V seja traçada e que o ponto de máxima transferência de potência seja identificado. As cargas do tipo potência constante são as mais prejudiciais do ponto de vista de estabilidade de tensão e levam o sistema mais rapidamente ao colapso. As cargas de composição mista, podem ser consideradas como moderadas, do ponto de vista do colapso de tensão, pois a parcela de impedância constante é responsável por gerar um amortecimento.

Com relação aos indicadores, pode-se concluir que todos mostraram-se promissores, tanto para caso 1 – sistema radial simplificado 3 barras – quanto para o caso 2 – sistema *IEEE* 14 barras – pois seus valores sensitivos diminuíram à medida que o sistema tendia a instabilidade. Contudo, evidencia-se, que o primeiro indicador, $VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$, apresentou maior sensibilidade, detectando pequenos incrementos de carga e o terceiro indicador, $VSI3_i =$

$\Delta V_i / \Delta S_{ci}$, apresenta a vantagem de contemplar duas situações extremas, incrementos de carga cujas potências sejam puramente ativa ou puramente reativa, contrastando com fato de que os indicadores 1 ($VSI1_i = \Delta V_i / \Delta Q_{ci}$) e 2 ($VSI2_i = \Delta V_i / \Delta P_{ci}$) tem sua aplicação limitada a somente uma das situações.

Dessa forma, destaca-se que o objetivo de desenvolver uma ferramenta para análise da estabilidade de tensão por meio de índices de sensibilidade dinâmico foi cumprido. Essa nova ferramenta foi implementada na plataforma de estudos de sistemas elétricos de potência PSP-UFU, que, além de ser gratuita e de código aberto, pode ser utilizada por engenheiros e técnicos da operação e planejamento do sistema elétrico de potência, assim como por docentes e pesquisadores do setor elétrico.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se:

- a) Que seja realizada a análise de estabilidade de tensão com cargas dinâmicas (motores de indução).
- b) A implementação de transformador com tap comutável sob carga no PSP-UFU e seu efeito durante o estudo de estabilidade de tensão.
- c) Análise de estabilidade de tensão por meio de um Fluxo de Carga Continuado a ser implementado no PSP-UFU.
- d) Modelar dispositivos de compensação estática e fontes interfaceadas com conversores no PSP-UFU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Nageswa Rao, P. Vijaya, and M. Kowsalya, “Voltage stability indices for stability assessment: a review,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 42, no. 7, pp. 829–845, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1525585>
- [2] A. Oukennou and A. Sandali, “Assessment and analysis of Voltage Stability Indices in electrical network using PSAT Software,” in *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Dec. 2016, pp. 705–710. doi: <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7836970>
- [3] H. Zaheb *et al.*, “A Contemporary Novel Classification of Voltage Stability Indices,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 5, p. 1639, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/app10051639>.
- [4] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*. McGraw-Hill Book Co., 1994.
- [5] M. S. S. Danish, T. Senjyu, S. M. S. Danish, N. R. Sabory, N. K, and P. Mandal, “A Recap of Voltage Stability Indices in the Past Three Decades,” *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1544, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12081544>.
- [6] S. Tripathi, M. S. Rawat, and V. G. D. Rayudu, “Dynamic voltage instability identification of power system using thévenin equivalent method,” *2020 IEEE Students’ Conf. Eng. Syst. SCES 2020*, pp. 0–5, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/SCES50439.2020.9236698>
- [7] G. K. Morison, B. Gao, and P. Kundur, “Voltage stability analysis using static and dynamic approaches,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 1159–1171, 1993, doi: <https://doi.org/10.1109/59.260881>.
- [8] A. Doroudi, A. M. Nasrabadi, and R. Razani, “Two novel static and dynamic voltage stability based indexes for power system contingency ranking,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 8, pp. 1831–1837, 2018, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0991>
- [9] C. Reis and F. P. M. Barbosa, “A comparison of voltage stability indices,” *IEEE Mediterr. Electrotechnical Conf.*, 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814394>
- [10] T. Oliveira, “Desenvolvimento de uma plataforma computacional gráfica e de código aberto para estudos de sistemas de potência,” Universidade Federal de Uberlândia, 2016. doi: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2016.22>.

- [11] T. L. Oliveira, G. C. Guimarães, L. R. C. Silva, and J. O. Rezende, “Power system education and research applications using free and open-source, graphical and multiplatform PSP-UFU software,” *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/0020720919879058>
- [12] T. L. Oliveira, G. C. Guimarães, and L. R. C. Silva, “PSP-UFU: An open-source, graphical, and multiplatform software for power system studies,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 1–18, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12185>
- [13] K. Prabha, “Power System Stability and Control.” p. 1176, 1994.
- [14] M. Begovic *et al.*, “Summary of ‘System protection and voltage stability,’” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 2, pp. 631–638, Apr. 1995, doi: <https://doi.org/10.1109/61.400868>
- [15] P. Kundur *et al.*, “Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825981>
- [16] T. Van Cutsem and C. Vournas, “Voltage stability of electric power systems,” *Volt. Stab. Electr. Power Syst.*, pp. 1–378, 2008, doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75536-6>
- [17] U. M. R. Pothula, “Static and dynamic voltage stability analysis,” Nanyang Technological University, 2007. doi: <https://doi.org/10.32657/10356/3501>
- [18] Q. Liu, “Voltage Stability Assessment and Enhancement in Power Systems Voltage Stability Assessment and,” Durham University, 2018. [Online]. Available: <http://etheses.dur.ac.uk/13148/>
- [19] J. D. Filho, “Influências de modelagens de cargas em estudos de colapso de tensão de sistemas elétricos. Universidade Federal de Uberlândia João Dib Filho 1997,” p. 1997, 1997.
- [20] F. R. A. C. Baracho, “Estabilidade de Tensão Em Sistemas Elétricos de Potência.PDF,” Universidade Federal de Minas Gerais, 1992.
- [21] F. Karbalaei, H. Soleymani, and S. Afsharnia, “A comparison of voltage collapse proximity indicators,” *2010 9th Int. Power Energy Conf. IPEC 2010*, pp. 429–432, 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/IPEC2010.5697034>
- [22] N. Nikpour, “Dynamic and static voltage stability of distribution systems in the presence of distributed generation,” University of British Columbia, 2016. doi: 10.14288/1.0314160.

- [23] M. T. Tran, “Definition and Implementation of Voltage Stability Indices in PSS ® NETOMAC Master of Science Thesis in Electric Power Engineering Definition and Implementation of Voltage Stability Indices in PSS ® NETOMAC Conducted at Siemens AG,” Chalmers University of technology, 2009. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/174031>
- [24] K. Gogoi and S. Chatterjee, “Dynamic simulation of eastern regional grid of India using power system simulator for engineering PSS®E,” *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, 2020, doi: <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2019-0209>
- [25] S. I A, S. A O, A. A A, O. A A, and K. J, “Review of Voltage Stability Indices,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. Pap.*, p. 10, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/730/1/012024>
- [26] B. Gao, G. K. Morison, and P. Kundur, “Voltage Stability Evaluation using Modal Analysis,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 7, no. 11, pp. 1529–1542, 1992, doi: <https://doi.org/10.1109/MPER.1992.161430>
- [27] V. Ajarapu, *Computational Techniques for voltage stability assessment and control*. Ames: Springer Science+Business Media, LLC, 2006. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-32935-2>
- [28] H. S. Barbuy, “Serviço Ancilar de Potência Reativa de Geradores Síncronos: Aspectos Técnicos e Regulatórios,” Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [29] N. D. Hatziargyriou and T. Van Cutsem, “Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena,” *CIGRE Task Force*, no. December, pp. 2–38, 1994.
- [30] A. S. Braga, “Design de Interface As origens do design e sua influência na produção da hipermídia,” p. 135, 2004, [Online]. Available: <http://www.pucsp.br/~braga/dissertacao.pdf>
- [31] E. Mark, M. Gross, and G. Goldschmidt, “A Perspective on Computer Aided Design after Four Decades,” *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided Archit. Des. Eur.*, pp. 169–176, 2008, doi: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2008.169>
- [32] F. M. Alghamdi and M. R. J. Qureshi, “Impact of Design Patterns on Software Maintainability,” *Int. J. Intell. Syst. Appl.*, vol. 6, no. 10, pp. 41–46, 2014, doi: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2014.10.06>.
- [33] C. W. Taylor, *Stability Condition in a Power Transmission System Calculated*. McGraw-Hill, 1994.
- [34] <https://thales1330.github.io/PSP/pt/> (acessado em 02 de Fevereiro de 2022).

ANEXO 1

Este anexo contém os dados dos componentes utilizados no sistema exemplo IEEE 14 barras, inclusive de reguladores de tensão e velocidade.

Tabela A.1: Dados de geradores, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Gerador 1	Gerador 2
Potência nominal (MVA)	615,0	60,0
Dados de Estabilidade		
Inércia(H) (p.u.)	5,148	6,54
Fator de amortecimento	0,0	0,0
Resistência de armadura (Ra) (p.u.)	0,0	0,0031
Reatância de Potier(Xp) (p.u.)	0,2396	0,0
Fator de saturação	0,0	0,0
Frequência de circuito aberto (Hz)	60,0	60,0
Síncrono		
Reatância de eixo direito (Xd) (p.u.)	0,8979	1,05
Reatância de eixo em quadratura (Xq) (p.u.)	0,646	0,98
Transitório		
Reatância de eixo direito (X'd) (p.u.)	0,2995	0,185
Reatância de eixo em quadratura (X'q) (p.u.)	0,646	0,36
Constante de tempo de eixo direto (T'd0) (s)	7,4	6,1
Constante de tempo de eixo em quadratura (T'q0) (s)	0,0	0,3
Subtransitório		
Reatância de eixo direito (X''d) (p.u.)	0,23	0,13
Reatância de eixo em quadratura (X''q) (p.u.)	0,4	0,13
Constante de tempo de eixo direto (T''d0) (s)	0,03	0,04
Constante de tempo de eixo em quadratura (T''q0) (s)	0,033	0,099

Tabela A.2: Dados de compensadores síncronos, sistema exemplo *IEEE* 14 barras

	Compensador síncrono 1	Compensador síncrono 2	Compensador síncrono 3
Potência nominal (MVA)	60,0	25,0	25,0
Dados de Estabilidade			
Inércia(H) (p.u.)	6,54	5,06	5,06
Fator de amortecimento	0,0	0,0	0,0
Resistência de armadura (Ra) (p.u.)	0,0	0,0041	0,0041
Reatância de Potier(Xp) (p.u.)	0,0	0,134	0,134
Fator de saturação	0,0	0,0	0,0
Frequência de circuito aberto (Hz)	60,0	60	60
Síncrono			
Reatância de eixo direto (Xd) (p.u.)	1,05	1,25	1,25
Reatância de eixo em quadratura (Xq) (p.u.)	0,98	1,22	0,715
Transitório			
Reatância de eixo direto (X'd) (p.u.)	0,185	0,232	0,232
Reatância de eixo em quadratura (X'q) (p.u.)	0,36	0,715	0,715
Constante de tempo de eixo direto (T'd0) (s)	6,1	4,75	4,75
Constante de tempo de eixo em quadratura (T'q0) (s)	0,3	1,5	1,5
Subtransitório			
Reatância de eixo direto (X''d) (p.u.)	0,13	0,12	0,12
Reatância de eixo em quadratura (X''q) (p.u.)	0,13	0,12	0,12
Constante de tempo de eixo direto (T''d0) (s)	0,04	0,06	0,06
Constante de tempo de eixo em quadratura (T''q0) (s)	0,099	0,21	0,21

Tabela A.3: Dados de transformadores, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Transformador 1 (Barra-04--HV - Barra-07--ZV)	Transformador 2 (Barra-04--HV - Barra-09--LV)
Potência nominal (MVA)	100	100
Resistência (R) (p.u.)	0	0
Reatância indutiva (XI) (p.u.)	0,20912	0,55618
Conexão	Deta - Estrela aterrado	Deta - Estrela aterrado
TAP	0,978	0,969
Defasagem	-30	-30

Tabela A.4: Dados de transformadores, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Transformador 3 (Barra-05--HV - Barra-06--LV)	Transformador 4 (Barra-08--TV Barra- 07--ZV)
Potência nominal (MVA)	100	100
Resistência (R) (p.u.)	0	0
Reatância indutiva (XI) (p.u.)	0,25202	0,17615
Conexão	Deta - Estrela aterrado	Deta - Estrela aterrado
TAP	0,932	1
Defasagem	-30	0

Tabela A.5: Dados de linhas, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Linha 1 (Barra-01-- HV - Barra- 02--HV)	Linha 2 (Barra-01--HV - Barra-05-- HV)	Linha 3 (Barra-02-- HV - Barra- 03--HV)	Linha 4 (Barra-02-- HV - Barra- 04--HV)
Potência nominal (MVA)	100	100	100	100
Resistência (R) (p.u.)	0,01938	0,05403	0,04699	0,05811
Reatância indutiva (XI) (p.u.)	0,05917	0,22304	0,19797	0,17632
Susceptância capacitiva (B) (p.u.)	0,0528	0,0492	0,0438	0,034
Comprimento da linha (km)	100	100	100	100

Tabela A.6: Dados de linhas, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Linha 5 (Barra-02-- HV - Barra- 05--HV)	Linha 6 (Barra-03--HV - Barra-04-- HV)	Linha 7 (Barra-04-- HV - Barra- 05--HV)	Linha 8 (Barra-06-- LV - Barra- 11--LV)
Potência nominal (MVA)	100	100	100	100
Resistência (R) (p.u.)	0,05695	0,06701	0,01335	0,09498
Reatância indutiva (XI) (p.u.)	0,17388	0,17103	0,04211	0,1989
Susceptância capacitiva (B) (p.u.)	0,0346	0,0128	0,0	0,0
Comprimento da linha (km)	100	100	100	100

Tabela A.7: Dados de linhas, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Linha 9 (Barra-06-- LV - Barra- 12--LV)	Linha 10 (Barra-06--LV - Barra-13-- LV)	Linha 11 (Barra-07-- ZV - Barra- 09--LV)	Linha 12 (Barra-09-- LV - Barra- 10--LV)
Potência nominal (MVA)	100	100	100	100
Resistência (R) (p.u.)	0,12291	0,06615	0	0,03181
Reatância indutiva (XI) (p.u.)	0,25581	0,13027	0,11001	0,0845
Susceptância capacitiva (B) (p.u.)	0,0	0,0	0,0	0,0
Comprimento da linha (km)	100	100	100	100

Tabela A.8: Dados de linhas, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Linha 13 (Barra-09-- LV - Barra- 14--LV)	Linha 14 (Barra-10--LV - Barra-11-- LV)	Linha 15 (Barra-12-- LV - Barra- 13--LV)	Linha 16 (Barra-13-- LV - Barra- 14--LV)
Potência nominal (MVA)	100	100	100	100
Resistência (R) (p.u.)	0,12711	0,08205	0,22092	0,17093
Reatância indutiva (XI) (p.u.)	0,27038	0,19207	0,19988	0,34802
Susceptância capacitiva (B) (p.u.)	0,0	0,0	0,0	0,0
Comprimento da linha (km)	100	100	100	100

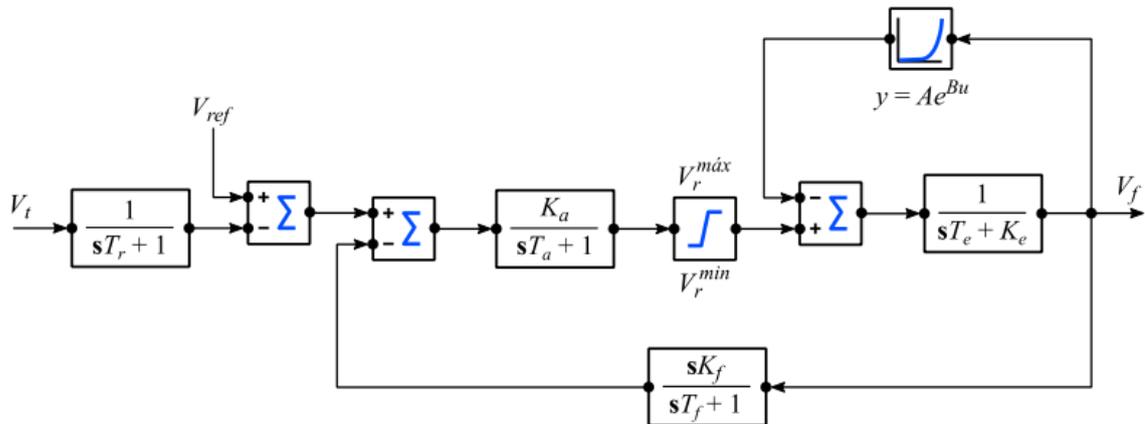
Tabela A.9: Dados de cargas, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Carga 1 (Barra-04- -HV)	Carga 2 (Barra-06- -LV)	Carga 3 (Barra-13-- LV)	Carga 5 (Barra-12-- LV)	Carga 6 (Barra-05-- HV)
Potência ativa	47,8	11,2	13,5	6,1	7,6
Potência reativa	-3,9	7,5	5,8	1,6	1,6
Tipo de carga (fluxo de carga)	potência constante	potência constante	potência constante	potência constante	constant power

Tabela A.10: Dados de cargas, sistema exemplo *IEEE* 14 barras.

	Carga 7 (Barra-02- -HV)	Carga 8 (Barra-03- -HV)	Carga 9 (Barra-09-- LV)	Carga 10 (Barra-10-- LV)	Carga 11 (Barra-11-- LV)
Potência ativa	21,7	94,2	29,5	9	3,5
Potência reativa	12,7	19	16,6	5,8	1,8
Tipo de carga (fluxo de carga)	potência constante	potência constante	potência constante	potência constante	potência constante

Figura A.1: Modelo de AVR utilizado na simulação, sistema exemplo *IEEE 14 barras*.

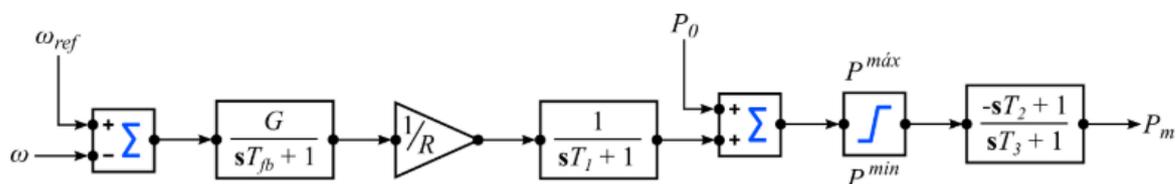


Fonte: [11]

Tabela A.11: Dados de *AVRs*, sistema exemplo *IEEE 14 barras*.

Parâmetro	AVR1	AVR2	AVR3	AVR4	AVR5
Máquina síncrona	Gerador 1	Gerador 2	Compensador síncrono 1	Compensador síncrono 2	Compensador síncrono 3
V _r máx	9,99	2,05	2,05	2,05	2,05
V _r min	0	0	0	0	0
K _a	200	20	20	20	20
T _a	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
K _f	0,0012	0,001	0,001	0,001	0,001
T _f	1	1	1	1	1
K _e	1	1	1	1	1
T _e	0,19	1,98	1,98	0,7	0,7
T _r	0	0	0	0	0
A	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
B	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Figura A.2: Modelo de regulador de velocidade e turbina utilizado nas simulações, sistema exemplo *IEEE 14* barras.



Fonte: [11]

Tabela A.12: Dados do regulador de velocidade utilizado nas simulações, sistema exemplo *IEEE 14* barras.

Máquina síncrona	Tipo	G	R	Tfb	T1	T2	T3	Pmáx	Pmin
Gerador 1	Hidráulica	1	0,02	0,2	0,3	0,15	0,2	6	0
Gerador 2	Térmica	1	0,02	0,2	0,3	0	0,2	6	0

Fonte: [11]