



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

SIMULAÇÕES DE OSCILAÇÕES DE TENSÃO EM ALIMENTADORES COM COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE

Taubaté
2021



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

WILLIAN SOUZA DE JESUS

**Simulações de Oscilações de Tensão em Alimentadores com Compensação
Reativa Série**

Willian Souza de Jesus

Simulações de Oscilações de Tensão em Alimentadores com Compensação Reativa Série

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Orientador (a): Prof. Me. Sandro Botossi dos Santos.

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau**

J58s

Jesus, Willian Souza de

Simulações de oscilações de tensão em alimentadores com
compensação reativa série / Willian Souza de Jesus. -- 2021.
70 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2021.

Orientação: Prof. Me. Sandro Botossi dos Santos, Departamento de
Engenharia Elétrica.

1. Banco de capacitores. 2. Compensação reativa. 3. Motores de
indução trifásicos. 4. Sistemas de distribuição. I. Universidade de Taubaté.
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica. Graduação em
Engenharia Elétrica e Eletrônica. II. Título.

CDD – 621.37

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995



UNITAU

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

SIMULAÇÕES DE OSCILAÇÕES DE TENSÃO EM ALIMENTADORES COM COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE

WILLIAN SOUZA DE JESUS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “**GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**”

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Sandro Botossi dos Santos
Orientador/UNITAU-DEE

Prof. Me. Marcelo Pinheiro Werneck
UNITAU-DEE

Eng. Me. Nelson Clodoaldo de Jesus
Membro Externo

Dezembro de 2021

A minha mãe, por me apoiar, ajudar e amar incondicionalmente independente de qualquer coisa. Também a meu pai, por me inspirar, me ajudar e contribuir imensamente nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares, que apesar das dificuldades, sempre me apoiaram.

A minha namorada, por sempre me amparar.

A todos que me apoiaram, incentivaram e fizeram diferença nesta trajetória.

Ao meu professor orientador Sandro Botossi dos Santos, pela paciência e orientação no desenvolvimento do trabalho.

À CPFL Energia.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência.”

Henry Ford

JESUS, W. S. **Simulações de Oscilações de Tensão em Alimentadores com Compensação Reativa Série**. 2021. 70 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2021.

RESUMO

Este trabalho aborda a modelagem de sistemas de distribuição e resultados de simulações, realizadas no software ATPDraw, com a utilização de compensação reativa série em alimentadores, a partir de bancos de capacitores em série, a fim de analisar os efeitos e impactos desse tipo de aplicação. Nos sistemas elétricos de potência, um dos maiores desafios da atualidade é aumentar a potência transmitida pela rede. Uma das soluções para tal desafio é o uso de um sistema de compensação série, que promove não apenas uma maior transferência de potência, mas também maior estabilidade ao sistema, tanto em situação de transitórios como para regime permanente. No entanto, o uso de capacitores série na rede pode gerar efeitos adversos, como ferrorressonância e auto-excitação de motores, limitando seu uso em sistemas elétricos de distribuição principalmente quando da presença de cargas sensíveis, tais como motores de indução trifásicos.

PALAVRAS-CHAVE: ATPDraw. Banco de Capacitores em Série. Compensação Reativa Série. Motores de Indução Trifásicos. Simulações. Sistemas de Distribuição.

JESUS, W. S. **Voltage Oscillation Simulations in Feeders with Series Reactive Compensation.** 2021. 70 p. Graduation Work in Electrical Engineering – Department of Electrical Engineering, Taubaté University, Taubaté, 2021.

ABSTRACT

This work addresses the modeling of distribution systems and simulation results, performed in the ATPDraw software, using series reactive compensation in feeders, from series capacitor banks, in order to analyze the effects and impacts of this type of application. In electrical power systems, one of today's biggest challenges is to increase the transmitted power by the grid. One of the solutions for that challenge is the use of a series compensation system, which promotes not only a higher power transference but also higher stability for the system both in the transient and steady-state. However, the use of series capacitors in the grid may imply adverse effects, such as ferroresonance and motor self-excitation, limiting their use in electrical distribution systems, especially when sensitive loads are present, such as three-phase induction motors.

KEYWORDS: ATPDraw. Distribution Systems. Series Capacitor Bank. Series Reactive Compensation. Simulations. Three-phase Induction Motor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama unifilar do Alimentador 1.....	18
Figura 2 - Diagrama unifilar do Alimentador 2.....	19
Figura 3 - Diagrama unifilar do Alimentador 3.....	21
Figura 4 - Diagrama unifilar do Alimentador 4.....	23
Figura 5 - Diagrama unifilar simplificado para teste de curto-circuito.....	25
Figura 6 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 1.....	25
Figura 7 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 1.....	26
Figura 8 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 1.....	27
Figura 9 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 2.....	29
Figura 10 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 2.....	30
Figura 11 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 2.....	31
Figura 12 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 3.....	32
Figura 13 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 3.....	33
Figura 14 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 3.....	34
Figura 15 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 4.....	36
Figura 16 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 4.....	37
Figura 17 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 4.....	38
Figura 18 - Circuito utilizado para modelagem dos MITs no ATPDraw.....	40
Figura 19 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 50 [cv].....	41
Figura 20 - Velocidade atingida pelo motor de 50 [cv].....	41
Figura 21 - Corrente de partida do motor de 50 [cv].....	41
Figura 22 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 100 [cv].....	42
Figura 23 - Velocidade atingida pelo motor de 100 [cv].....	42
Figura 24 - Corrente de partida do motor de 100 [cv].....	42
Figura 25 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 150 [cv].....	43
Figura 26 - Velocidade atingida pelo motor de 150 [cv].....	43
Figura 27 - Corrente de partida do motor de 150 [cv].....	43
Figura 28 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 200 [cv].....	44
Figura 29 - Velocidade atingida pelo motor de 200 [cv].....	44
Figura 30 - Corrente de partida do motor de 200 [cv].....	44
Figura 31 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 250 [cv].....	45
Figura 32 - Velocidade atingida pelo motor de 250 [cv].....	45

Figura 33 - Corrente de partida do motor de 250 [cv].....	45
Figura 34 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 300 [cv].....	46
Figura 35 - Velocidade atingida pelo motor de 300 [cv].....	46
Figura 36 - Corrente de partida do motor de 300 [cv].....	46
Figura 37 - Diagrama fasorial do sistema sem CRS.....	49
Figura 38 - Diagrama fasorial do sistema com CRS e X_C inferior a X_L	49
Figura 39 - Diagrama fasorial do sistema com CRS e X_C superior a X_L	49
Figura 40 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 em RP.....	52
Figura 41 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 em RP.....	52
Figura 42 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 em RP.....	53
Figura 43 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 em RP.....	53
Figura 44 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 após PM	54
Figura 45 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 após PM	54
Figura 46 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 após PM	55
Figura 47 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 após PM	55
Figura 48 - Diagrama unifilar do Alimentador 1 com implementação do BCS.....	57
Figura 49 - Diagrama unifilar do Alimentador 2 com implementação do BCS.....	57
Figura 50 - Diagrama unifilar do Alimentador 3 com implementação do BCS.....	57
Figura 51 - Diagrama unifilar do Alimentador 4 com implementação do BCS.....	57
Figura 52 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 com BCS e em RP	58
Figura 53 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 com BCS e em RP	58
Figura 54 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 com BCS e em RP	59
Figura 55 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 com BCS e em RP	59
Figura 56 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 com BCS e após PM.....	60
Figura 57 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 com BCS e após PM.....	60
Figura 58 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 com BCS e após PM.....	61
Figura 59 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 com BCS e após PM.....	61
Figura 60 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 com e sem BCS em RP.....	62
Figura 61 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 com e sem BCS em RP.....	62
Figura 62 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 com e sem BCS em RP.....	63
Figura 63 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 com e sem BCS em RP.....	63
Figura 64 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 200 [cv].....	65
Figura 65 - Velocidade atingida pelo motor de 200 [cv].....	65
Figura 66 - Corrente de partida do motor de 200 [cv].....	66

Figura 67 - Tensão do sistema com ocorrência de ressonância subsíncrona.....	66
Figura 68 - Curva Torque x Velocidade de um MIT com ocorrência de RSS	67
Figura 69 - Curva Torque x Velocidade de um MIT com partida normal	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos cabos no sistema em 15 kV	17
Tabela 2 - Características gerais do AL 1.....	18
Tabela 3 - Características das cargas presentes no AL 1.....	19
Tabela 4 - Características gerais do AL 2.....	20
Tabela 5 - Características das cargas presentes no AL 2.....	20
Tabela 6 - Características dos cabos no sistema em 23 kV	21
Tabela 7 - Características gerais do AL 3.....	22
Tabela 8 - Características das cargas presentes no AL 3.....	22
Tabela 9 - Características gerais do AL 4.....	23
Tabela 10 - Características das cargas presentes no AL 4.....	24
Tabela 11 - Comparação entre valores para motores de 50 a 150 [cv]	47
Tabela 12 - Comparação entre valores para motores de 200 a 300 [cv]	47
Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos	47
Tabela 14 - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alimentador
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transient Program
BC	Banco de Capacitores
BCS	Banco de Capacitores em Série
C	Carga
CRS	Compensação Reativa Série
cv	cavalo-vapor
k	Kilo (10^3)
k_c	Grau de Compensação
km	Quilômetro
MIT	Motor de Indução Trifásico
NBR	Norma Brasileira Registrada
P	Ponto de Medição da Tensão
PM	Partida de Motor
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
REG	Regulador de Tensão
RMS	Root Mean Square
RP	Regime Permanente
RSS	Ressonância Subsíncrona
SE	Subestação
TA	Tensão de Atendimento
TL	Tensão de Leitura
TR	Tensão de Referência
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória

LISTA DE SÍMBOLOS

$\cos \Phi$	fator de potência
E	tensão de linha
$I_{CC3\Phi}$	corrente de curto-circuito trifásico
I_N	corrente nominal
I_P	corrente de partida
k_C	grau de compensação reativa
L	comprimento do trecho
n_N	velocidade nominal
R_0	resistência de sequência zero
R_1	resistência de sequência positiva
s_N	escorregamento nominal
$T_{MÁX}$	torque máximo
T_N	torque nominal
T_P	torque de partida
X_0	indutância de sequência zero
X_1	indutância de sequência positiva
X_C	reatância capacitiva
X_L	reatância indutiva
X_{LT}	soma das reatâncias indutivas até o BCS
Z_C	impedância característica do trecho
Z_{CC}	impedância de curto-circuito
Z_{PCC}	impedância total até o ponto de curto-circuito
Z_T	impedância total do trecho

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	MODELAGEM DE SISTEMAS TÍPICOS DE DISTRIBUIÇÃO	17
2.1	LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO	17
2.1.1	Linhas de distribuição em 15 kV	17
2.1.1.1	Alimentador 1 (AL 1)	18
2.1.1.2	Alimentador 2 (AL 2)	19
2.1.2	Linhas de distribuição em 23 kV	21
2.1.2.1	Alimentador 3 (AL 3)	21
2.1.2.2	Alimentador 4 (AL 4)	23
2.2	TESTES DE CURTO-CIRCUITO	24
2.2.1	Curto-Circuito No Alimentador 1 Em 15 kV	25
2.2.2	Curto-Circuito No Alimentador 2 Em 15 kV	29
2.2.3	Curto-Circuito No Alimentador 3 Em 23 kV	33
2.2.4	Curto-Circuito No Alimentador 4 Em 23 kV	37
3	MODELAGEM DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS (MIT)	41
4	APLICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE	50
4.1	GRAU DE COMPENSAÇÃO	51
4.2	FERRORRESSONÂNCIA.....	51
4.3	AUTO-EXCITAÇÃO DE MOTORES	52
5	SIMULAÇÕES DOS ALIMENTADORES	53
5.1	REGIME PERMANENTE (RP)	53
5.1.1	Alimentador 1	53
5.1.2	Alimentador 2	53
5.1.3	Alimentador 3	54
5.1.4	Alimentador 4	54
5.2	PARTIDA DE MOTORES (PM).....	55
5.2.1	Alimentador 1	55
5.2.2	Alimentador 2	55
5.2.3	Alimentador 3	56
5.2.4	Alimentador 4	56
5.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
6	SIMULAÇÕES DOS ALIMENTADORES COM CRS	58

6.1	REGIME PERMANENTE (RP)	59
6.1.1	Alimentador 1	59
6.1.2	Alimentador 2	59
6.1.3	Alimentador 3	60
6.1.4	Alimentador 4	60
6.2	PARTIDA DE MOTORES (PM).....	61
6.2.1	Alimentador 1	61
6.2.2	Alimentador 2	61
6.2.3	Alimentador 3	62
6.2.4	Alimentador 4	62
6.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
6.4	SIMULAÇÃO DE AUTO-EXCITAÇÃO DE MOTOR.....	66
7	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Devido à ascendente necessidade de cada vez mais haver maior qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia, concernentes à perda da capacidade de investimento no setor elétrico e à concorrência, são buscadas alternativas técnico-econômicas eficientes para aprimorar o desempenho dos sistemas. Sistemas de distribuição, por vezes, passam por algumas adversidades para atender as cargas presentes, bem como novos clientes. O sistema de distribuição rural, por exemplo, geralmente apresenta dificuldades quanto à regulação de tensão, com perdas consideráveis, devido aos tipos de cabos utilizados, cargas em excesso e dimensões longas, o que gera agravamento nos níveis de tensões ao longo do sistema.

A aplicação de bancos de capacitores em série, e, portanto, utilização de compensação reativa série, em sistemas de transmissão é amplamente conhecida, estudada e utilizada, com o foco sendo o aumento da capacidade de condução das linhas de transmissão, ampliação da estabilidade tanto para regime permanente quanto para regime transitório, bem como o controle do fluxo de potência. Nesse tipo de sistema, há comprovação da eficiência e eficácia da aplicação através da operação de diversos bancos de capacitores série.

Quanto aos sistemas de distribuição, a aplicação de compensação reativa série é restrita e pouco estudada, existindo reduzidos equipamentos desse tipo. No entanto, a execução da técnica fornece diversas vantagens sobre os métodos usuais, que utilizam reguladores automáticos de tensão e capacitores *shunt*.

A compensação série reduz quedas de tensão e promove regulação instantânea da tensão no sistema, além de fornecer potência reativa ao sistema diretamente proporcional à carga, reduzindo carregamento de cabos e transformadores. O impacto do BCS é maior conforme menor for o fator de potência no ponto de aplicação, portanto a razão entre a reatância e a resistência afeta fundamentalmente a qualidade da regulação (OSTWALD, 2000, p. 2).

Recomenda-se a utilização de CRS em linhas de longo comprimento e com condutores de bitolas grandes, e o aumento da tensão depende sobretudo do grau de compensação optado para o banco. Além dos pontos positivos supracitados, a aplicação da técnica também promove redução de flutuações de tensão e respectivos *Flickers* e suporte à partida de motores elétricos, uma vez que compensa quedas nos níveis de tensão.

Dentre enormes vantagens e benefícios da aplicação da compensação reativa série, é essencial levar em consideração dos efeitos colaterais potencialmente existentes, que podem impossibilitar a operação, pois, se não forem corretamente mitigados, geram perturbações perigosas e intoleráveis ao alimentador e respectivas cargas. O fenômeno de ferorressonância, durante energização de transformadores e religamento do alimentador, oscilações em regime permanente e ocorrência de oscilações subsíncronas durante partidas de motores compõem os efeitos adversos causados pela aplicação. Além dos mencionados, podem ocorrer mais alguns problemas, como o aumento da tensão de restabelecimento transitória (TRT) em religadores e disjuntores e aumento das sobretensões nas fases sãs para faltas monofásicas à terra.

Esse trabalho de graduação tem a finalidade de apresentar uma análise de resultados de diversas simulações e casos com oscilações de tensão durante operação de motores de indução trifásicos em diversos típicos sistemas de distribuição rural.

Nos próximos capítulos, serão apresentadas as características da modelagem dos sistemas de distribuição e motores para estudos de transitórios eletromagnéticos no programa ATPDraw, com e sem compensação reativa série.

2 MODELAGEM DE SISTEMAS TÍPICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Simulações computacionais visam fornecer subsídios a estudos de sistemas reais, de qualquer dimensão, nas quais são abordadas diversas situações e condições adversas, com considerável taxa de acerto, a fim de gerar desde estudos preventivos até melhorias no sistema.

A partir dessa aplicação, foram modelados quatro sistemas elétricos, baseados em alimentadores reais, de consideravelmente grande extensão, caracterizados como linhas de distribuição de grande porte, conforme apresentado a seguir, utilizando-se o *software* de transitórios eletromagnéticos ATPDraw (*Alternative Transient Program*).

2.1 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

A linha de distribuição foi modelada com a utilização de um componente que consiste em uma linha simétrica com RL acoplado e com parâmetros concentrados, tendo como dados de entrada a impedância característica nas sequências zero e positiva e o comprimento do referido trecho. As linhas são compostas também por cargas (C) e reguladores de tensão (REG), e algumas possuem bancos de capacitores (BC). Pontos de interesse, dos quais serão obtidos os valores de tensão, estão demarcados como P.

2.1.1 Linhas de distribuição em 15 kV

Foram modelados dois diferentes alimentadores para a classe de 15 kV. A modelagem foi embasada nas características contidas na Tabela 1.

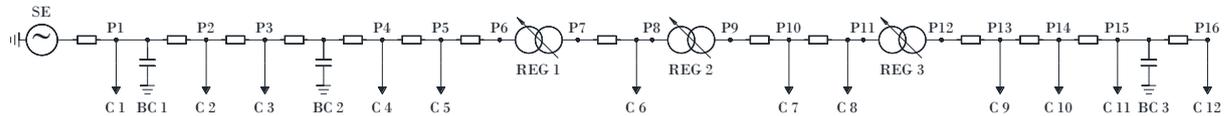
Tabela 1 - Características dos cabos no sistema em 15 kV

Cabo	R1 [Ω/km]	X1 [Ω/km]	R0 [Ω/km]	X0 [Ω/km]
A336	0,1896	0,3700	0,3993	1,2570
A4/0	0,3003	0,3887	0,5467	1,2971
A1/0	0,6008	0,4150	1,0428	1,5805
A02	0,9567	0,4366	1,3988	1,6021
E185	0,1813	0,2602	0,5090	1,5222
E70	0,4918	0,3009	0,9205	1,7478
S2/0	0,4757	0,4783	0,7389	1,4560
S02	0,9506	0,4789	1,3834	1,6451

2.1.1.1 Alimentador 1 (AL 1)

O diagrama unifilar do Alimentador 1 está apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama unifilar do Alimentador 1



Fonte: autoria própria.

Os trechos que compõem o Alimentador 1 estão detalhados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Características gerais do AL 1

Cabo	Comprimento do trecho [km]	Comprimento Total [km]	Observação	R1	X1	R0	X0
-	-	-	SE/P _{CC1}	0,4323	2,2464	0,0299	1,4930
A336	0,495	0,495		0,5261	2,4296	0,2275	2,1152
A336	0,454	0,949		0,6122	2,5976	0,4088	2,6859
A336	0,941	1,890	BC 1	0,7906	2,9458	0,7845	3,8688
A336	0,223	2,113		0,8329	3,0283	0,8736	4,1491
A336	1,355	3,468		1,0898	3,5297	1,4146	5,8524
A336	1,955	5,423		1,4604	4,2531	2,1952	8,3099
A336	1,435	6,858	BC 2	1,7324	4,7840	2,7682	10,1138
A336	0,565	7,423	P _{CC2}	1,8396	4,9931	2,9938	10,8240
A336	3,307	10,730		2,4665	6,2168	4,3142	14,9810
A336	1,950	12,680	REG 1	2,8362	6,9383	5,0928	17,4323
A336	3,520	16,200		3,5035	8,2408	6,4983	21,8571
A336	6,520	22,720	REG 2	4,7396	10,6534	9,1016	30,0530
A336	5,100	27,820	P _{CC3}	5,7064	12,5406	11,1379	36,4639
A336	2,780	30,600		6,2335	13,5692	12,2479	39,9584
A336	0,182	30,782	REG 3	6,2680	13,6366	12,3206	40,1872
A336	2,650	33,432		6,7704	14,6172	13,3787	43,5184
A336	0,955	34,387		6,9514	14,9705	13,7600	44,7189
A336	2,310	36,697		7,3893	15,8253	14,6823	47,6226
A336	3,810	40,507	BC 3	8,1117	17,2351	16,2036	52,4119
A336	2,870	43,377		8,6557	18,2971	17,3495	56,0196
A336	8,120	51,497	fim	10,1951	21,3017	20,5917	66,2268

As informações referentes às cargas que constituem a linha estão detalhadas na Tabela 3.

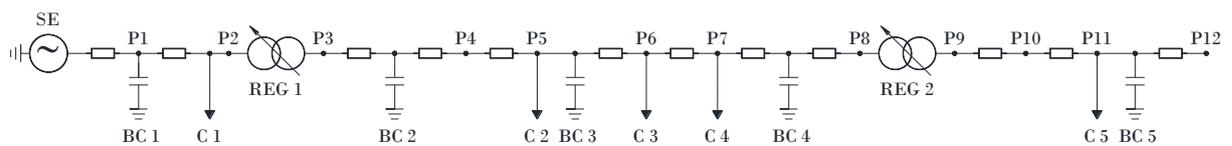
Tabela 3 - Características das cargas presentes no AL 1

Carga	R [Ω]	X [Ω]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	FP
C1	242,24	322,99	786,16	589,62	982,70	0,80
C2	9931,91	13242,55	19,17	14,38	23,97	0,80
C3	472,94	630,60	402,67	302,00	503,34	0,80
C4	993,19	1324,25	191,75	143,81	239,68	0,80
C5	993,19	1324,25	191,75	143,81	239,68	0,80
C6	397,27	529,70	479,37	359,52	599,21	0,80
C7	763,99	1018,66	249,27	186,95	311,59	0,80
C8	584,23	778,97	325,97	244,48	407,46	0,80
C9	451,45	601,94	421,84	316,38	527,30	0,80
C10	300,00	270,26	634,80	704,65	948,42	0,67
C11	827,66	1103,55	230,09	172,57	287,62	0,80
C12	472,95	630,60	402,66	302,00	503,33	0,80

2.1.1.2 Alimentador 2 (AL 2)

O diagrama unifilar do Alimentador 2 está apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama unifilar do Alimentador 2



Fonte: autoria própria.

Os trechos que constituem o Alimentador 2 estão presentes na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Características gerais do AL 2

Cabo	Comprimento do trecho [km]	Comprimento Total [km]	Observação	R1	X1	R0	X0
-	-	-	SE/P _{CC1}	0,0411	1,2107	0,0229	1,1426
E185	0,111	0,111	BC 1	0,0612	1,2396	0,0794	1,3116
E185	1,190	1,301		0,2770	1,5492	0,6851	3,1230
A336	1,057	2,358		0,4774	1,9403	1,1071	4,4517
A336	5,844	8,202	REG 1	1,5853	4,1028	3,4405	11,7978
A336	1,112	9,314		1,7961	4,5142	3,8845	13,1956
A336	3,040	12,354		2,3724	5,6391	5,0984	17,0170
E185	0,360	12,714	BC 2/P _{CC2}	2,4377	5,7328	5,2816	17,5650
E185	0,126	12,840		2,4605	5,7656	5,3457	17,7568
A336	0,724	13,564		2,5978	6,0335	5,6348	18,6669
A336	0,121	13,685		2,6207	6,0782	5,6831	18,8190
E185	0,159	13,844		2,6509	6,1371	5,7466	19,0189
A336	0,069	13,913	BC 3	2,6639	6,1626	5,7742	19,1056
A336	0,553	14,466		2,7688	6,3672	5,9950	19,8008
A336	1,033	15,499		2,9646	6,7495	6,4074	21,0993
A336	4,279	19,778		3,7758	8,3328	8,1159	26,4782
A336	1,452	21,230		4,0511	8,8701	8,6957	28,3034
E185	0,540	21,770		4,1490	9,0106	8,9705	29,1254
S02	1,239	23,009	BC 4	5,3268	9,6039	10,6846	31,1637
S02	0,042	23,051	REG 2	5,3667	9,6241	10,7427	31,2327
S02	0,299	23,350		5,6509	9,7673	11,1563	31,7246
A1/0	0,142	23,492	P _{CC3}	5,7362	9,8262	11,3044	31,9491
E70	0,172	23,664		5,8208	9,8779	11,4628	32,2497
A02	0,194	23,858	BC 5	6,0064	9,9626	11,7341	32,5605
A02	0,803	24,661	fim	6,7747	10,3132	12,8573	33,8470

As informações referentes às cargas presentes no sistema estão detalhadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características das cargas presentes no AL 2

Carga	R [Ω]	X [Ω]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	FP
C1	240,50	411,92	791,85	462,32	916,93	0,86
C2	392,24	632,89	485,52	300,91	571,20	0,85
C3	156,88	368,28	1213,92	517,11	1319,47	0,92
C4	196,10	460,36	971,14	413,68	1055,57	0,92
C5	30,16	70,82	6314,32	2689,07	6863,07	0,92

2.1.2 Linhas de distribuição em 23 kV

Foram modelados dois diferentes alimentadores em 23 kV. A modelagem foi embasada nas informações presentes na Tabela 6.

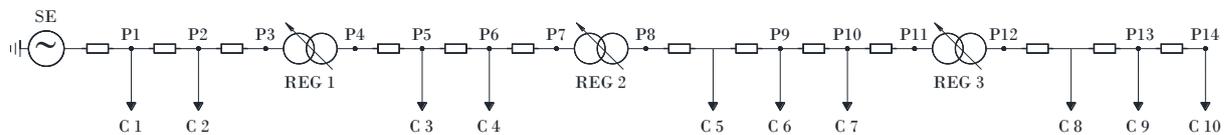
Tabela 6 - Características dos cabos no sistema em 23 kV

Cabo	R1 [Ω/km]	X1 [Ω/km]	R0 [Ω/km]	X0 [Ω/km]
A02	0,9803	0,4637	1,1283	1,6555
A2/0	0,4870	0,4333	0,6351	1,6251
E70	0,4949	0,3224	0,6429	1,8418
E95	0,3573	0,3100	0,5053	1,8295
E150	0,2302	0,2923	0,3782	1,8118
E185	0,1836	0,2846	0,3316	1,8041
S02	0,9740	0,4637	1,1221	1,6555
S04	1,5482	0,5141	1,6963	1,7059
S1/0	0,6102	0,5147	0,7582	1,7066
S2/0	0,4847	0,5054	0,6328	1,6982
S3/0	0,3832	0,4930	0,5313	1,6849
S4/0	0,3043	0,4681	0,4523	1,6599

2.1.2.1 Alimentador 3 (AL 3)

O diagrama unifilar do Alimentador 1 está apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama unifilar do Alimentador 3



Fonte: autoria própria.

Os trechos que compõem o Alimentador 3 estão detalhados conforme Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Características gerais do AL 3

Cabo	Comprimento do trecho [km]	Comprimento Total [km]	Observação	R1	X1	R0	X0
-	-	-	SE/P _{CC1}	1,4785	7,4167	0,0001	1,2534
E150	0,008	0,008		1,4803	7,4190	0,0030	1,2674
E150	0,106	0,113		1,5046	7,4498	0,0429	1,4586
S4/0	3,156	3,269	P _{CC2}	2,4650	8,9272	1,4704	6,6974
E95	0,060	3,330		2,4866	8,9460	1,5009	6,8080
S04	2,467	5,797		6,3067	10,2145	5,6865	11,0173
S04	2,693	8,491	REG 1	10,4764	11,5991	10,2550	15,6117
S04	2,911	11,402		14,9833	13,0957	15,1931	20,5777
S04	3,298	14,700		20,0897	14,7913	20,7880	26,2042
S04	3,891	18,591	REG 2	26,1139	16,7917	27,3885	32,8421
S04	0,075	18,666		26,2301	16,8303	27,5157	32,9700
S04	3,463	22,129		31,5908	18,6104	33,3892	38,8768
S04	9,746	31,875		46,6800	23,6210	49,9219	55,5031
S04	4,683	36,558	REG 3	53,9301	26,0284	57,8655	63,4916
S04	0,078	36,636		54,0506	26,0684	57,9975	63,6243
S04	1,732	38,368		56,7326	26,9590	60,9361	66,5796
S02	0,151	38,519	P _{CC3}	56,8800	27,0292	61,1059	66,8301
S04	1,847	40,367		59,7399	27,9789	64,2394	69,9813
S04	6,369	46,735	fim	69,6003	31,2532	75,0430	80,8461

As informações referentes às cargas que constituem a linha estão detalhadas na Tabela 8.

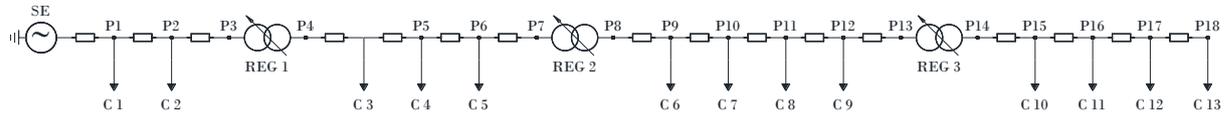
Tabela 8 - Características das cargas presentes no AL 3

Carga	R [Ω]	X [Ω]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	FP
C1	6013,41	9236,95	87,97	57,27	104,97	0,84
C2	1581,23	2106,98	334,55	251,07	418,28	0,80
C3	1912,72	3777,22	276,57	140,05	310,01	0,89
C4	8526,76	13932,05	62,04	37,97	72,74	0,85
C5	4525,62	10234,09	116,89	51,69	127,81	0,91
C6	1823,32	3486,92	290,13	151,71	327,40	0,89
C7	16059,50	26423,58	32,94	20,02	38,55	0,85
C8	1602,50	2146,92	330,11	246,40	411,93	0,80
C9	29819,62	44416,46	17,74	11,91	21,37	0,83
C10	1104,13	1776,12	479,11	297,84	564,14	0,85

2.1.2.2 Alimentador 4 (AL 4)

O diagrama unifilar do Alimentador 4 está apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama unifilar do Alimentador 4



Fonte: autoria própria.

Os trechos que constituem o Alimentador 4 estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Características gerais do AL 4

Cabo	Comprimento do trecho [km]	Comprimento Total [km]	Observação	R1	X1	R0	X0
-	0	0	SE/P _{CC1}	0,6948	4,8049	0,0000	0,9206
S3/0	0,073	0,073		0,7226	4,8407	0,0386	1,0430
S3/0	10,048	10,120		4,5728	9,7942	5,3769	17,9723
S1/0	0,177	10,297		4,6806	9,8851	5,5108	18,2736
S1/0	1,311	11,608	REG 1	5,4803	10,5597	6,5045	20,5104
S1/0	0,107	11,714		5,5454	10,6146	6,5854	20,6924
S1/0	9,289	21,003		11,2137	15,3957	13,6285	36,5453
S1/0	0,970	21,974		11,8058	15,8952	14,3642	38,2014
S1/0	0,720	22,694	REG 2	12,2454	16,2659	14,9104	39,4307
S1/0	1,555	24,249		13,1940	17,0661	16,0891	42,0840
S1/0	3,777	28,026	P _{CC2}	15,4990	19,0104	18,9532	48,5305
S1/0	4,390	32,416		18,1779	21,2700	22,2818	56,0228
S1/0	4,386	36,802		20,8541	23,5274	25,6071	63,5075
S1/0	1,072	37,874	REG 3	21,5082	24,0791	26,4199	65,3370
S1/0	1,264	39,138		22,2794	24,7296	27,3781	67,4939
S1/0	0,661	39,799		22,6828	25,0699	27,8794	68,6220
S1/0	0,684	40,483		23,1003	25,4220	28,3981	69,7896
S1/0	0,120	40,603		23,1733	25,4836	28,4888	69,9939
S04	0,214	40,816		23,5039	25,5934	28,8511	70,3582
S02	3,911	44,727	fim/P _{CC3}	27,3132	27,4069	33,2395	76,8327

As informações referentes às cargas presentes na linha estão detalhadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características das cargas presentes no AL 4

Carga	R [Ω]	X [Ω]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	FP
C1	584,82	1534,40	904,55	344,76	968,02	0,93
C2	2879,85	7294,54	183,69	72,52	197,49	0,93
C3	2723,72	4554,85	194,22	116,14	226,30	0,86
C4	3844,20	10299,84	137,61	51,36	146,88	0,94
C5	1361,96	3520,10	388,41	150,28	416,47	0,93
C6	823,60	1927,07	642,30	274,51	698,50	0,92
C7	4827,96	11716,50	109,57	45,15	118,51	0,92
C8	5194,93	10837,94	101,83	48,81	112,92	0,90
C9	6195,83	16377,71	85,38	32,30	91,29	0,94
C10	6972,45	23563,47	75,87	22,45	79,12	0,96
C11	543,75	1563,65	972,88	338,31	1030,02	0,94
C12	2587,56	7533,47	204,44	70,22	216,16	0,95
C13	2947,90	8525,38	179,45	62,05	189,87	0,95

2.2 TESTES DE CURTO-CIRCUITO

A seguir, serão realizadas simulações de curto-circuito trifásicos em três diferentes locais dos alimentadores, e em seguida serão comparados os valores obtidos com valores calculados manualmente, para validação do método utilizado e também da modelagem dos alimentadores. O cálculo da corrente de curto-circuito é realizado através da seguinte expressão:

$$I_{CC3\Phi} = \frac{E}{\sqrt{3} \times Z_{PCC}} \quad (1)$$

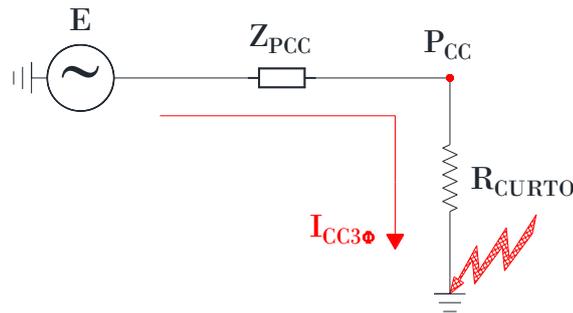
A impedância do curto (Z_{PCC}) é obtida através da soma das impedâncias totais dos trechos presentes até o ponto de curto, que podem ser calculados pela relação entre as Tabelas 1 e 6, nas quais estão relacionados os parâmetros dos cabos, e as Tabelas 2, 4, 7 e 9, que apresentam as extensões de cada trecho.

A expressão que determina o valor da impedância total de um trecho qualquer é:

$$Z_T = L \times Z_C \quad (2)$$

A simulação de curto-circuito basicamente consiste em uma fonte trifásica e uma resistência de curto com valor extremamente reduzido, que ocasionará a falta trifásica. A Figura 5 demonstra o diagrama unifilar simplificado para simulação de falta no ponto determinado (P_{CC}), que está relacionado também nas Tabelas 2, 4, 7 e 9. Para simplificar os cálculos, trechos diferentes, porém constituídos pelo mesmo cabo serão considerados apenas um trecho, sendo sua extensão a soma dos comprimentos de cada trecho.

Figura 5 - Diagrama unifilar simplificado para teste de curto-circuito

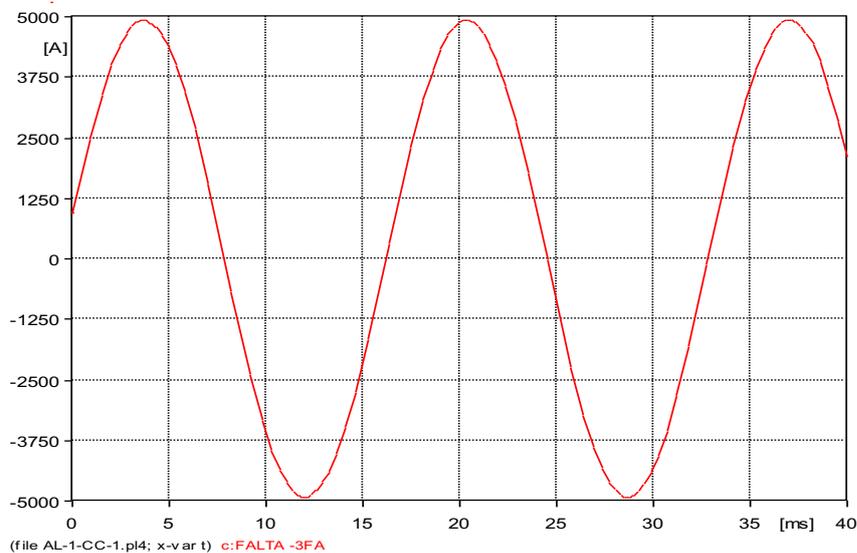


Fonte: autoria própria.

2.2.1 Curto-Circuito No Alimentador 1 Em 15 kV

A seguir apresentam-se os resultados da simulação de curto-circuito no Alimentador 1 em 15 kV, e então é realizado o cálculo manual para comparação. O primeiro ensaio é na SE, em P_{CC1} . A Figura 6 apresenta corrente de curto na ordem de 4925,50 [A] de pico, isto é, aproximadamente 3482,86 [A] RMS.

Figura 6 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 1



Fonte: autoria própria.

Impedância característica do trecho:

$$Z_{C1} = 0,4323 + j2,2464 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

Considera-se valor unitário para a distância da impedância de curto-circuito, uma vez que a falta ocorreu na SE, portanto tem-se como impedância resultante:

$$Z_{T1} = Z_{PCC1} = 1,00 \times (0,4323 + j2,2464) = 0,4323 + j2,2462 \text{ } [\Omega]$$

Impedância em módulo:

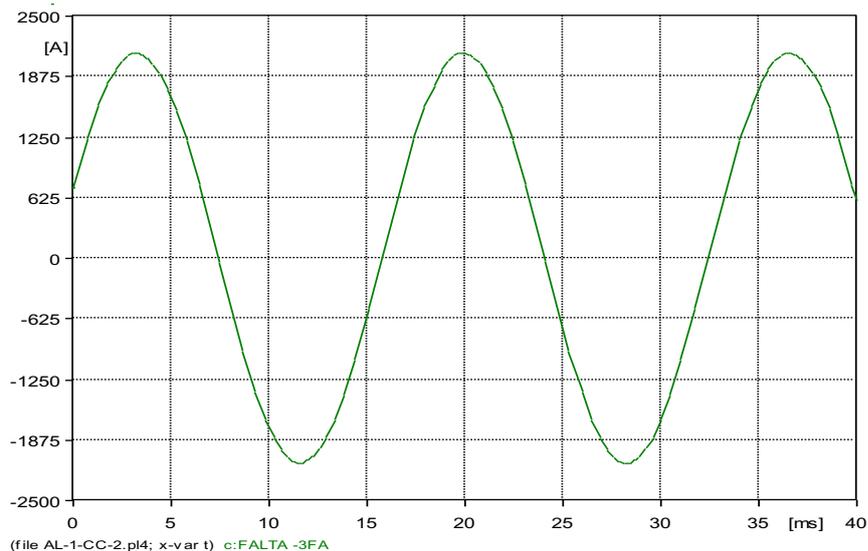
$$|Z_{PCC1}| = \sqrt{(0,4323)^2 + (2,2464)^2} = 2,28762 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC1} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 2,28762} = 3482,84 \text{ } [A]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC2}. O resultado da corrente de curto ilustrada na Figura 7 demonstra valor de 2117,60 [A] de pico, ou seja, aproximadamente 1497,37 [A] RMS.

Figura 7 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 1



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC2}, tem-se a presença de dois diferentes trechos. A impedância do primeiro foi calculada anteriormente:

$$Z_{T1} = 1,00 \times (0,4323 + j2,2464) = 0,4323 + j2,2464 \text{ } [\Omega]$$

O segundo trecho é formado por cabos A336, cuja impedância característica é:

$$Z_{C2} = 0,1896 + j0,370 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

A distância do referido trecho é de 7,423 [km], portanto a impedância do trecho é:

$$Z_{T2} = 7,423 \times (0,1896 + j0,370) = 1,4074008 + j2,7451 \text{ } [\Omega]$$

O somatório de todas as impedâncias que existem até o ponto de curto resulta em:

$$Z_{PCC2} = Z_{T1} + Z_{T2} = (0,4323 + 1,4074008) + j(2,2464 + 2,7451)$$

$$Z_{PCC2} = 1,8397008 + j4,99291 \text{ } [\Omega]$$

Em módulo:

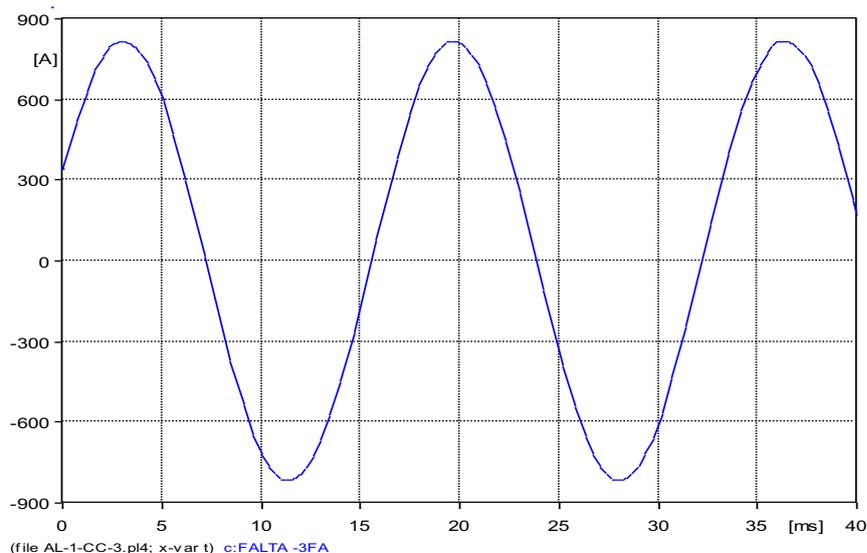
$$|Z_{PCC2}| = \sqrt{(1,8397008)^2 + (4,99291)^2} = 5,321057 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC2} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 5,321057} = 1497,34 \text{ } [\text{A}]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC3}. A Figura 8 apresenta corrente de curto na ordem de 817,84 [A] de pico, isto é, aproximadamente 578,31 [A] RMS.

Figura 8 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 1



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC3} , tem-se a presença de dois trechos. A impedância do primeiro foi calculada anteriormente:

$$Z_{T1} = 1,00 \times (0,4323 + j2,2464) = 0,4323 + j2,2464 \text{ } [\Omega]$$

O segundo trecho é formado por cabos A336, cuja impedância característica é:

$$Z_{C2} = 0,1896 + j0,370 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

A distância do segundo trecho é de 27,82 [km], portanto a impedância do trecho é:

$$Z_{T2} = 27,82 \times (0,1896 + j0,370) = 5,274672 + j10,2934 \text{ } [\Omega]$$

O somatório de todas as impedâncias que existem até o ponto de curto resulta em:

$$Z_{PCC3} = Z_{T1} + Z_{T2} = (0,4323 + 5,274672) + j(2,2464 + j10,2934)$$

$$Z_{PCC3} = 5,706972 + j12,5398 \text{ } [\Omega]$$

Em módulo:

$$|Z_{PCC3}| = \sqrt{(5,706972)^2 + (12,5398)^2} = 13,77737687 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

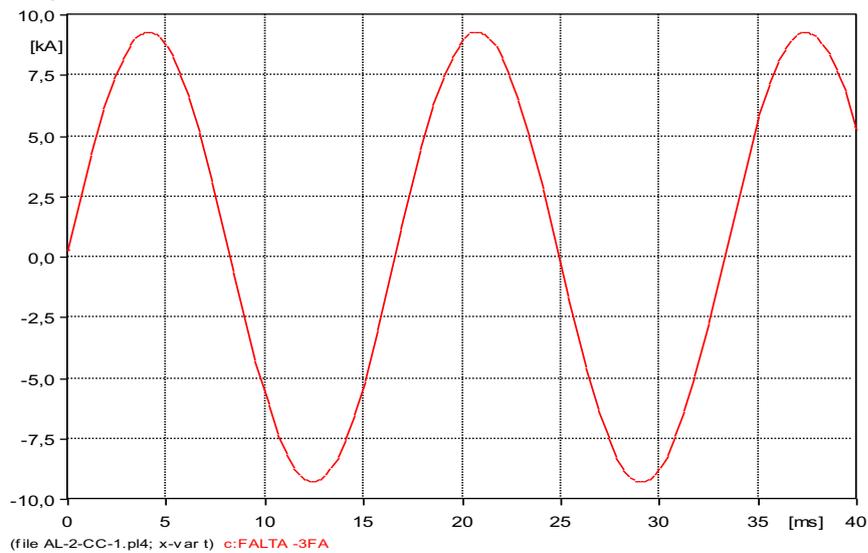
$$I_{CC3} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 13,77737687} = 578,30 \text{ } [A]$$

Os valores calculados estão idênticos aos valores simulados, comprovando o ensaio de curto-circuito e a validação deste alimentador. Os resultados e cálculos da corrente de curto nos próximos alimentadores serão apresentados a seguir, porém de forma mais direta.

2.2.2 Curto-circuito no Alimentador 2 em 15 kV

A seguir apresentam-se os resultados da simulação de curto-circuito no Alimentador 2 em 15 kV, e então é realizado o cálculo manual para comparação. O primeiro ensaio é na SE, em P_{CC1} . O resultado da corrente de curto ilustrada na Figura 9 a seguir demonstra valor de 9301,40 [A] de pico, ou seja, aproximadamente 6577,08 [A] RMS.

Figura 9 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 2



Fonte: autoria própria.

Considera-se valor unitário para a distância da impedância de curto-circuito, uma vez que a falta ocorreu na SE, portanto:

$$Z_{T1} = Z_{PCC1} = 1,00 \times (0,0411 + j1,2107) = 0,0411 + j1,2107 \text{ } [\Omega]$$

Impedância em módulo:

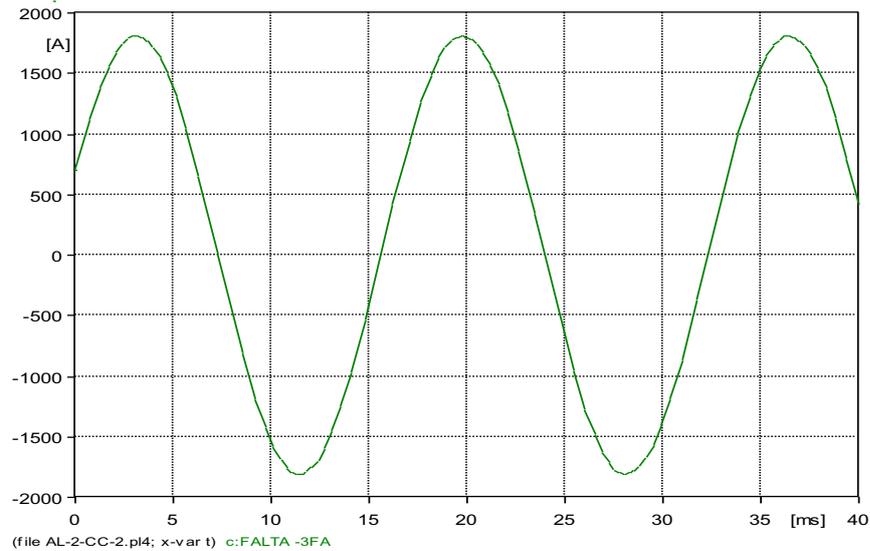
$$|Z_{PCC1}| = \sqrt{(0,0411)^2 + (1,2107)^2} = 1,211397 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC1} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 1,211397} = 6577,06 \text{ } [A]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC2}. A Figura 10 apresenta corrente de curto na ordem de 1808,80 [A] de pico, isto é, aproximadamente 1279,01 [A] RMS.

Figura 10 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 2



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC2}, tem-se a presença de três diferentes trechos. A impedância do primeiro foi calculada anteriormente:

$$Z_{T1} = 1,00 \times (0,0411 + j1,2107) = 0,0411 + j1,2107 \text{ } [\Omega]$$

O segundo trecho é constituído por cabos E185, e sua extensão é de 1,661 [km]:

$$Z_{T2} = 1,661 \times (0,1813 + j0,2602) = 0,3011393 + j0,4321922 \text{ } [\Omega]$$

O terceiro trecho é formado por cabos A336, e seu comprimento é de 11,053 [km]:

$$Z_{T3} = 11,053 \times (0,1896 + j0,370) = 2,0956488 + j4,08961 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{PCC2} = Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3}$$

$$Z_{PCC2} = 2,4378881 + j5,7325022 \text{ } [\Omega]$$

Em módulo:

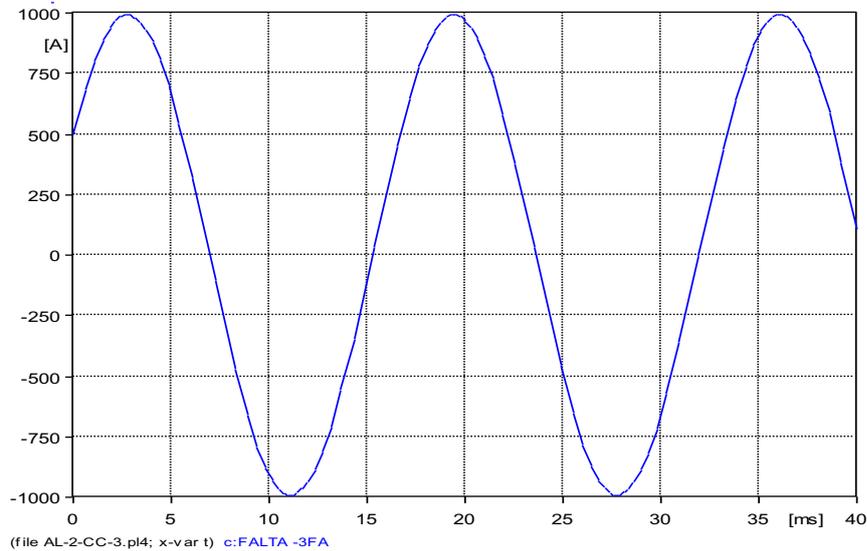
$$|Z_{PCC2}| = \sqrt{(2,4378881)^2 + (5,7325002)^2} = 6,2293563 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC2} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 6,2293563} = 1279,01 \text{ } [A]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC3}. O resultado da corrente de curto ilustrada na Figura 11 demonstra valor de 991,70 [A] de pico, ou seja, aproximadamente 701,24 [A] RMS.

Figura 11 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 2



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC3}, tem-se a presença de cinco trechos diferentes. A impedância do primeiro foi calculada anteriormente:

$$Z_{T1} = 1,00 \times (0,0411 + j1,2107) = 0,0411 + j1,2107 \text{ } [\Omega]$$

O segundo trecho é constituído por cabos E185, e sua extensão é de 2,486 [km]:

$$Z_{T2} = 2,486 \times (0,1813 + j0,2602) = 0,4507118 + j 0,6468572 \text{ } [\Omega]$$

O terceiro trecho é formado por cabos A336, e seu comprimento é de 19,284 [km]:

$$Z_{T3} = 19,284 \times (0,1896 + j0,370) = 3,6562464 + j7,13508 \text{ } [\Omega]$$

O quarto trecho é composto por cabos S02, e sua distância é de 1,58 [km]:

$$Z_{T4} = 1,58 \times (0,9506 + j0,4789) = 1,501948 + j0,756662 \text{ } [\Omega]$$

O quinto trecho é constituído por cabos A1/0, e sua extensão é de 0,142 [km]:

$$Z_{T5} = 0,142 \times (0,6008 + j0,415) = 0,0853136 + j 0,05893 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{PCC3} = Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3} + Z_{T4} + Z_{T5}$$

$$Z_{PCC3} = 5,7353198 + j 9,8082292 \text{ } [\Omega]$$

Em módulo:

$$|Z_{PCC3}| = \sqrt{(5,7353198)^2 + (9,8082292)^2} = 11,36200921 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

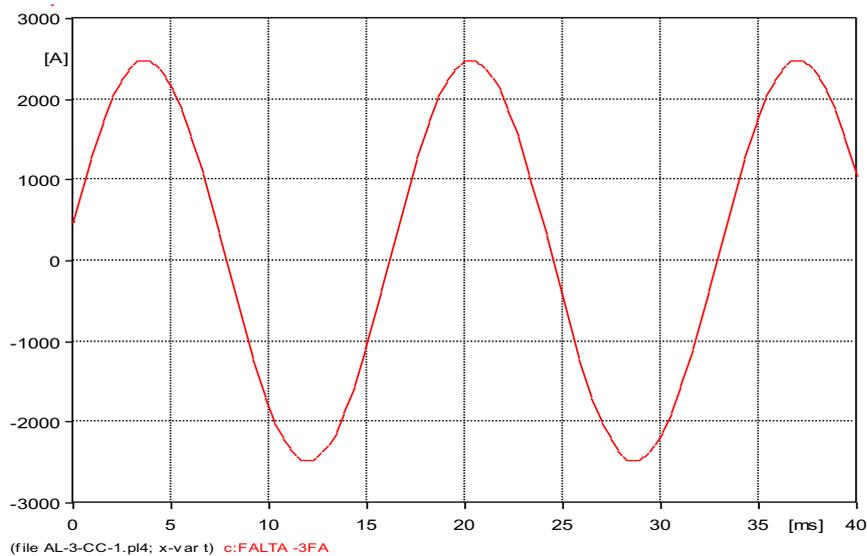
$$I_{CC3} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 11,36200921} = 701,23 \text{ } [A]$$

Os valores calculados estão idênticos aos valores simulados, comprovando o teste de curto-circuito e a validação deste alimentador.

2.2.3 Curto-circuito em Alimentador 3 em 23 kV

A seguir apresentam-se os resultados da simulação de curto-circuito no Alimentador 3 alimentadores em 23 kV, e então é realizado o cálculo manual para comparação. O primeiro ensaio é na SE, em P_{CC1}. A Figura 12 apresenta corrente de curto na ordem de 2483,20 [A] de pico, isto é, aproximadamente 1755,88 [A] RMS.

Figura 12 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 3



Fonte: autoria própria.

Considera-se valor unitário para a distância da impedância de curto-circuito, uma vez que a falta ocorreu na SE, portanto:

$$Z_{T1} = Z_{PCC1} = 1,00 \times (1,4785 + j7,4167) = 1,4785 + j7,4167 \text{ } [\Omega]$$

Impedância em módulo:

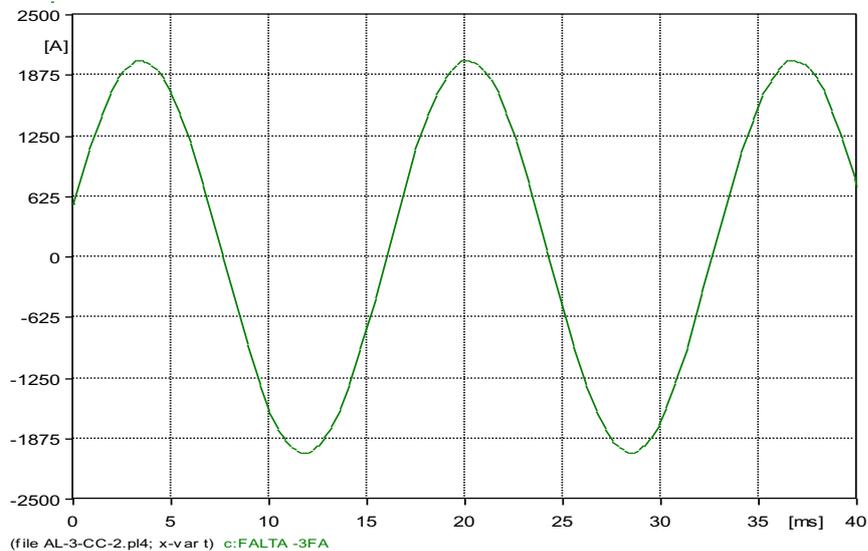
$$|Z_{PCC1}| = \sqrt{(1,4785)^2 + (7,4167)^2} = 7,562671 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC1} = \frac{23000}{\sqrt{3} \times 7,56267} = 1755,87 \text{ } [A]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC2}. O resultado da corrente de curto ilustrada na Figura 13 demonstra valor de 2027,20 [A] de pico, ou seja, aproximadamente 1433,45 [A] RMS.

Figura 13 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 3



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC2}, tem-se a presença de três diferentes trechos. A impedância do primeiro foi calculada anteriormente:

$$Z_{T1} = 1,4785 + j7,4167 \text{ } [\Omega]$$

O segundo trecho é constituído por cabos E150, e sua extensão é de 0,113 [km]:

$$Z_{T2} = 0,113 \times (0,2302 + j0,2923) = 0,0260126 + j0,0330299 \text{ } [\Omega]$$

O terceiro trecho é formado por cabos S4/0, e seu comprimento é de 3,156 [km]:

$$Z_{T3} = 3,156 \times (0,3043 + j0,4681) = 0,9603708 + j1,4773236 \text{ } [\Omega]$$

O somatório de todas as impedâncias que existem até o ponto de curto resulta em:

$$Z_{PCC2} = Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3}$$

$$Z_{PCC2} = 2,4648834 + j8,9270935 \text{ } [\Omega]$$

Em módulo:

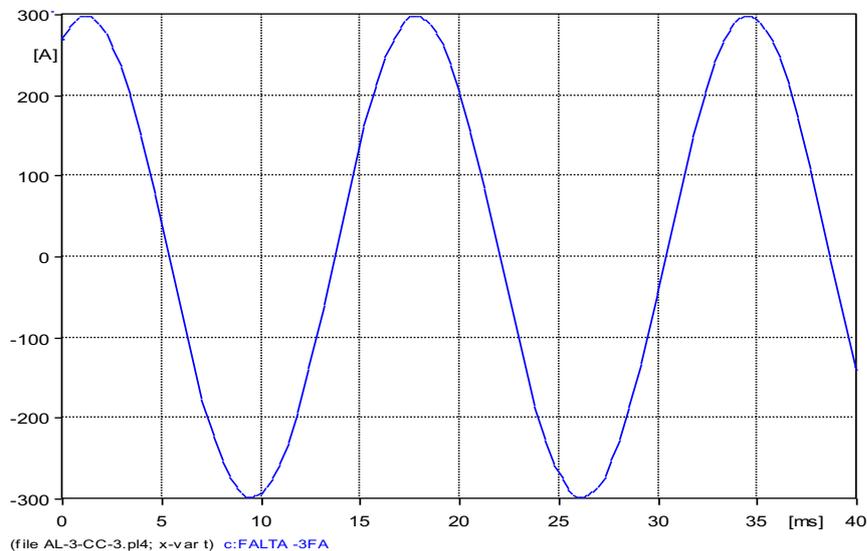
$$|Z_{PCC2}| = \sqrt{(2,4648834)^2 + (8,9270935)^2} = 9,261136 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC2} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 9,261136} = 1433,84 \text{ } [A]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC3} . A Figura 14 apresenta corrente de curto na ordem de 298,18 [A] de pico, isto é, aproximadamente 210,85 [A] RMS.

Figura 14 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 3



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC2} , tem-se a presença de seis diferentes trechos. As impedâncias dos três primeiros trechos já foram calculadas anteriormente, conforme apresentado a seguir:

$$Z_{T1} = 1,4785 + j7,4167 [\Omega]$$

$$Z_{T2} = 0,0260126 + j0,0330299 [\Omega]$$

$$Z_{T3} = 0,9603708 + j1,4773236 [\Omega]$$

O quarto trecho é composto por cabos E95, e sua distância é de 0,06 [km]:

$$Z_{T4} = 0,06 \times (0,3573 + j0,31) = 0,021438 + j0,0186 [\Omega]$$

O quinto trecho é constituído por cabos S04, e sua extensão é de 35,038 [km]:

$$Z_{T5} = 35,038 \times (1,5482 + j0,5141) = 54,2458316 + j18,0130358 [\Omega]$$

O sexto trecho é formado por cabos S02, e seu comprimento é de 0,151 [km]:

$$Z_{T6} = 0,151 \times (0,974 + j0,4637) = 0,147074 + j0,0700187 [\Omega]$$

O somatório de todas as impedâncias que existem até o ponto de curto resulta em:

$$Z_{PCC3} = Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3} + Z_{T4} + Z_{T5} + Z_{T6}$$

$$Z_{PCC3} = 56,879227 + j27,028748 [\Omega]$$

Em módulo:

$$|Z_{PCC3}| = (\sqrt{(56,879227)^2 + (27,028748)^2}) = 62,9746 [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

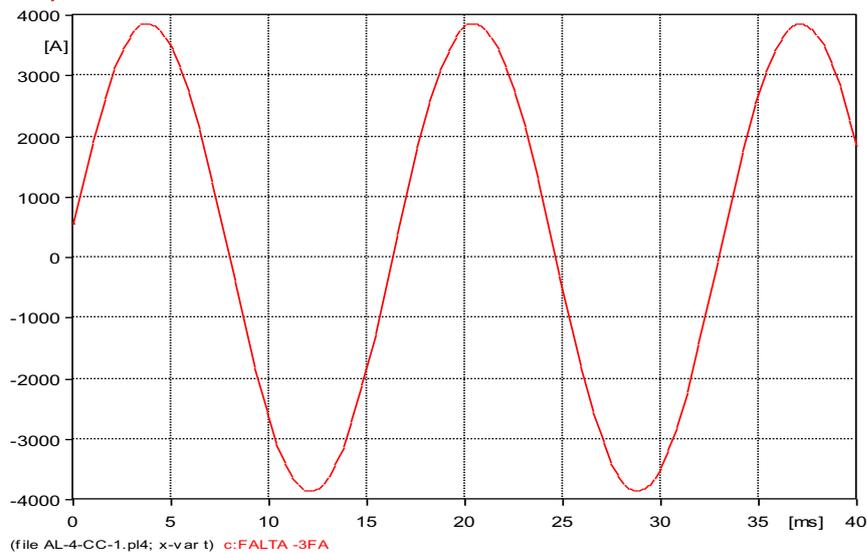
$$I_{CC3} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 62,9746} = 210,86 [A]$$

Os valores calculados estão idênticos aos valores simulados, comprovando o teste de curto-circuito e a validação deste alimentador.

2.2.4 Curto-circuito em Alimentador 4 em 23 kV

A seguir apresentam-se os resultados da simulação de curto-circuito no Alimentador 4 alimentadores em 23 kV, em dois pontos distintos. O resultado da corrente de curto ilustrada na Figura 15 demonstra valor de 3868,20 [A] de pico, ou seja, aproximadamente 2735,23 [A] RMS.

Figura 15 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC1} no AL 4



Fonte: autoria própria.

Considera-se valor unitário para a distância da impedância de curto-circuito, uma vez que a falta ocorreu na SE, portanto:

$$Z_{PCC1} = 1,00 \times (0,6948 + j4,8049) = 0,6948 + j4,8049 \text{ } [\Omega]$$

Impedância em módulo:

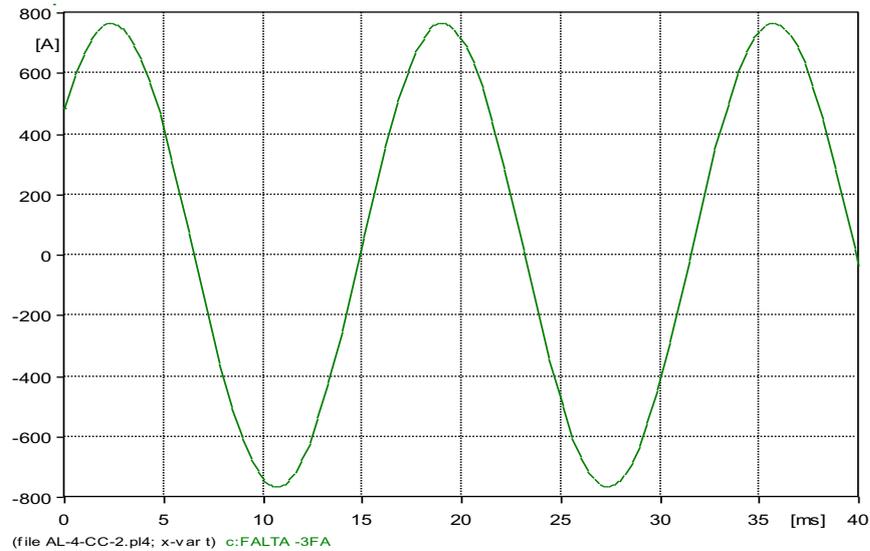
$$|Z_{PCC1}| = \sqrt{(0,6948)^2 + (4,8049)^2} = 4,854878 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC1} = \frac{23000}{\sqrt{3} \times 4,854878} = 2735,20 \text{ } [A]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC2}. A Figura 16 apresenta corrente de curto na ordem de 765,39 [A] de pico, isto é, aproximadamente 541,21 [A] RMS.

Figura 16 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC2} no AL 4



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC2}, tem-se a presença de três trechos diferentes. A impedância do primeiro foi calculada anteriormente:

$$Z_{T1} = 0,6948 + j4,8049 \text{ } [\Omega]$$

O segundo trecho é constituído por cabos S3/0, e sua extensão é de 10,12 [km]:

$$Z_{T2} = 0,113 \times (0,3832 + j0,493) = 3,877984 + j4,98916 \text{ } [\Omega]$$

O terceiro trecho é formado por cabos S1/0, e seu comprimento é de 17,9 [km]:

$$Z_{T3} = 17,9 \times (0,6102 + j0,5147) = 10,92258 + j9,21313 \text{ } [\Omega]$$

O somatório de todas as impedâncias que existem até o ponto de curto resulta em:

$$Z_{PCC2} = Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3}$$

$$Z_{PCC2} = 15,495314 + j19,0072 \text{ } [\Omega]$$

Em módulo:

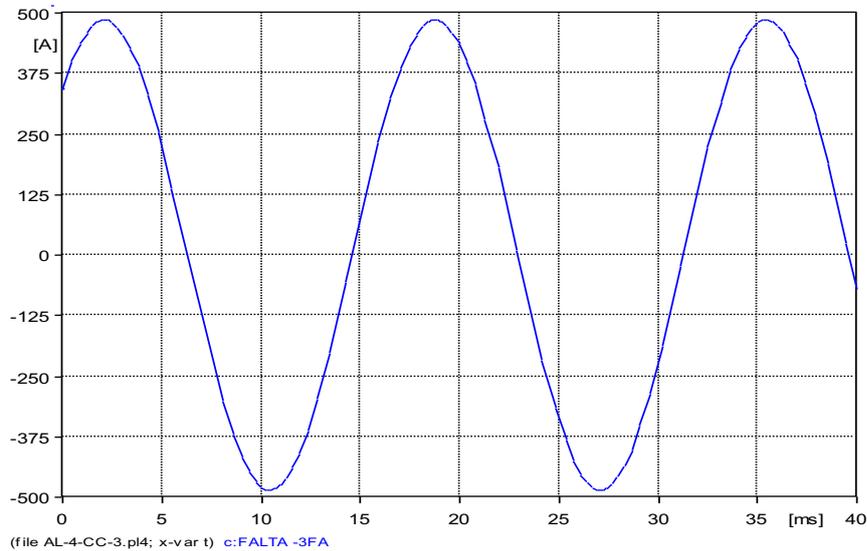
$$|Z_{PCC2}| = \sqrt{(15,49531)^2 + (19,0072)^2} = 24,52302 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC2} = \frac{23000}{\sqrt{3} \times 24,52302} = 541,49 \text{ } [A]$$

O próximo local de ensaio de curto-circuito é em P_{CC3}. O resultado da corrente de curto ilustrada na Figura 17 demonstra valor de 485,20 [A] de pico, ou seja, aproximadamente 343,09 [A] RMS.

Figura 17 - Corrente de curto-circuito trifásico em P_{CC3} no AL 4



Fonte: autoria própria.

Para o curto ocorrido em P_{CC3}, tem-se a presença de cinco trechos diferentes. A impedância dos dois primeiros trechos já foi calculada anteriormente:

$$Z_{T1} = 1,4785 + j7,4167 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{T2} = 3,877984 + j4,98916 \text{ } [\Omega]$$

O terceiro trecho é formado por cabos S1/0, e seu comprimento é de 30,48 [km]:

$$Z_{T3} = 30,48 \times (0,6102 + j0,5147) = 18,598896 + j 15,688056 \text{ } [\Omega]$$

O quarto trecho é composto por cabos S04, e sua distância é de 0,213 [km]:

$$Z_{T4} = 0,213 \times (1,5482 + j0,5141) = 0,3297666 + j0,1095033 \text{ } [\Omega]$$

O quinto trecho é constituído por cabos S02, e sua extensão é de 3,91 [km]:

$$Z_{T5} = 3,91 \times (0,974 + j0,4637) = 3,80834 + j1,813067 \text{ } [\Omega]$$

O somatório de todas as impedâncias que existem até o ponto de curto resulta em:

$$Z_{PCC3} = Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3} + Z_{T4} + Z_{T5}$$

$$Z_{PCC3} = 27,3097366 + j27,4046963 \text{ } [\Omega]$$

Em módulo:

$$|Z_{PCC3}| = \sqrt{(27,3097366)^2 + (27,4046963)^2} = 38,689 \text{ } [\Omega]$$

Cálculo da corrente de curto:

$$I_{CC3} = \frac{23000}{\sqrt{3} \times 38,689} = 343,22 \text{ } [A]$$

Os valores calculados estão idênticos aos valores simulados, comprovando o ensaio de curto-circuito e a validação deste alimentador.

3 MODELAGEM DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS (MIT)

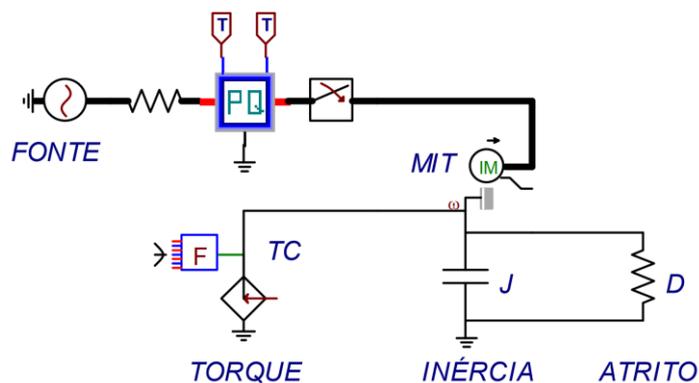
A fim de simular o comportamento com cargas sensíveis, motores de indução trifásicos (MITs) foram modelados no ATPDraw, com o auxílio do programa motdatpr, a partir de catálogos e folhas de dados de indústrias especializadas na produção deste equipamento.

O motdatpr calcula as indutâncias e resistências do circuito equivalente de um MIT, e para tal requer alguns parâmetros de entrada, listados a seguir:

- Tensão fase-fase em [kV];
- Potência ativa em [kW];
- Escorregamento;
- Rendimento;
- Fator de Potência;
- Razão entre a corrente de partida e a corrente nominal (I_p/I_N).

Os motores modelados possuem tensão nominal de 380 [V], dois pares de polos, e potências de 50 a 300 [cv]. Nas simulações, os motores serão conectados no final (último ponto) dos alimentadores. A Figura 18 apresenta um exemplo de circuito utilizado para a modelagem de motores de indução trifásicos (MIT) no ATPDraw.

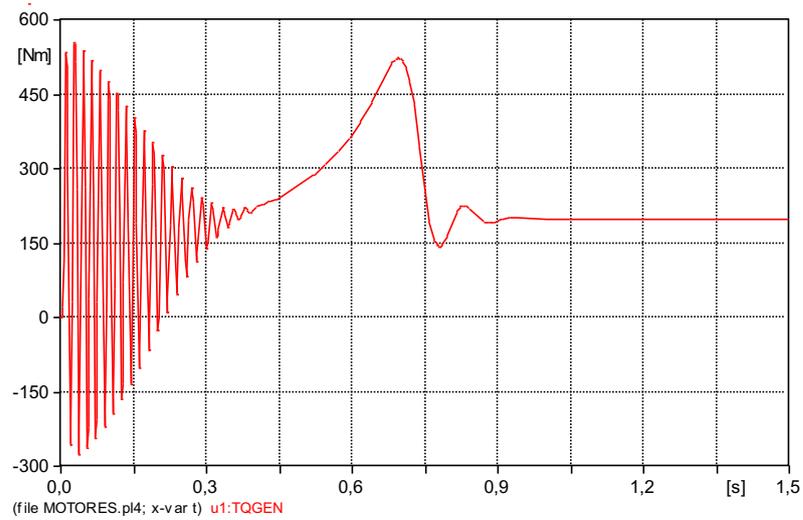
Figura 18 - Circuito utilizado para modelagem dos MITs no ATPDraw



Fonte: (JESUS, 2011).

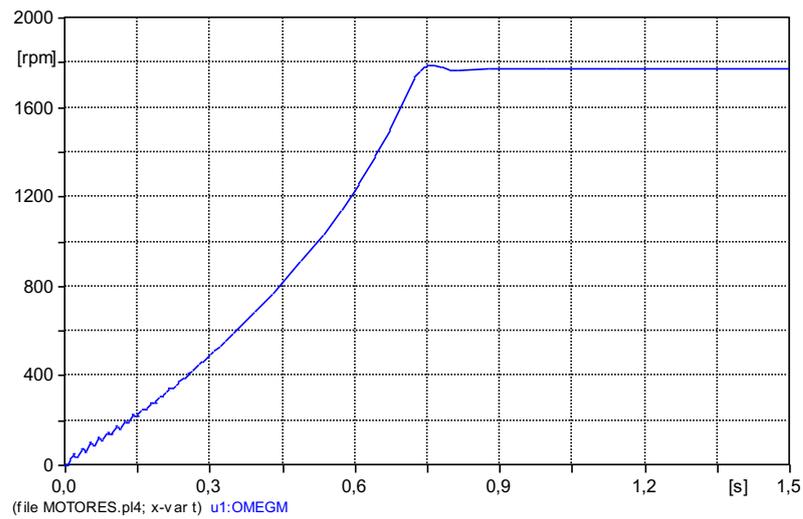
As Figuras 19 a 36 apresentam o conjugado desenvolvido, a velocidade alcançada e a corrente de partida (e seu respectivo valor eficaz), respectivamente para todos os motores modelados, sob carga nominal.

Figura 19 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 50 [cv]



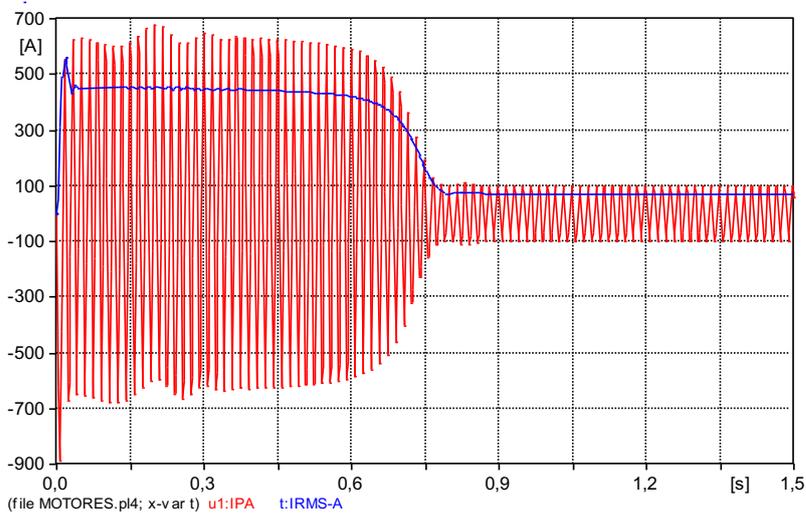
Fonte: autoria própria.

Figura 20 - Velocidade atingida pelo motor de 50 [cv]



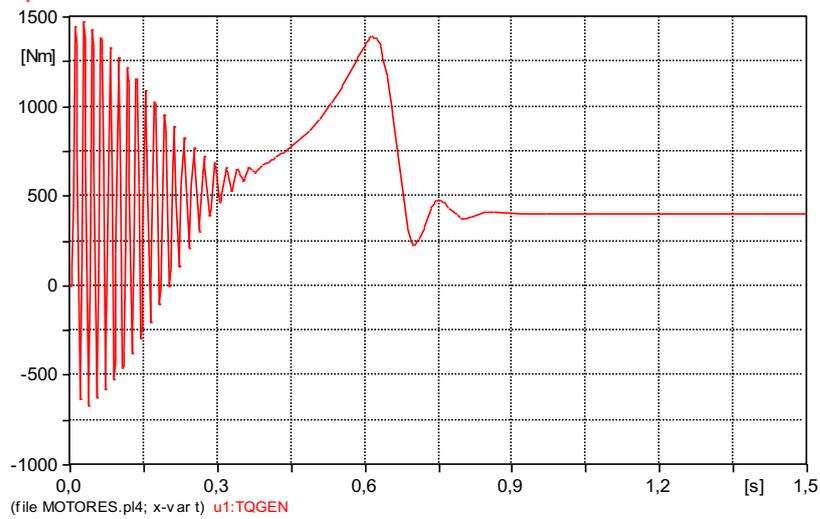
Fonte: autoria própria.

Figura 21 - Corrente de partida do motor de 50 [cv]



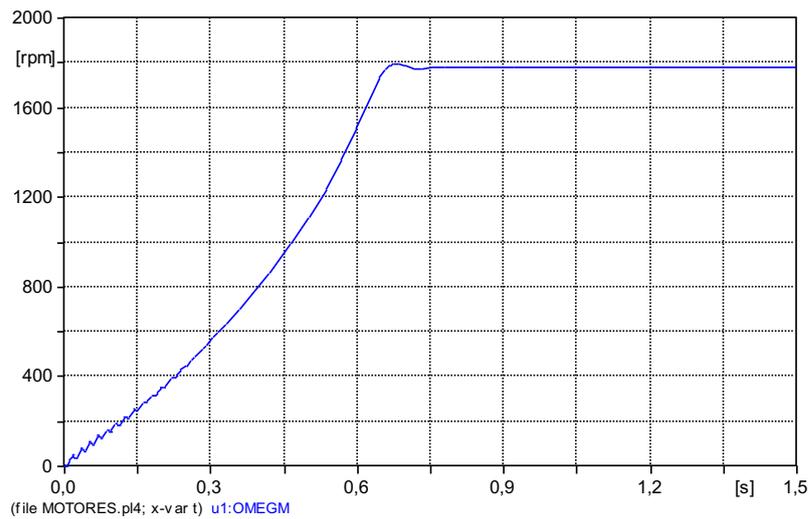
Fonte: autoria própria.

Figura 22 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 100 [cv]



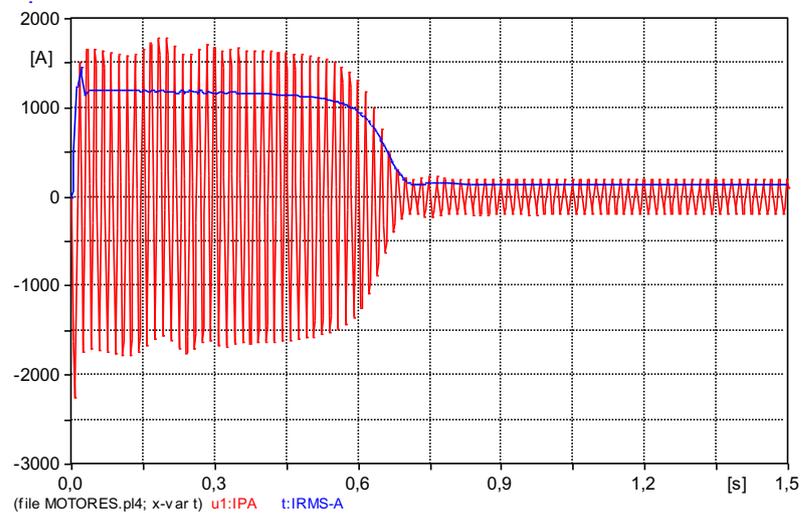
Fonte: autoria própria.

Figura 23 - Velocidade atingida pelo motor de 100 [cv]



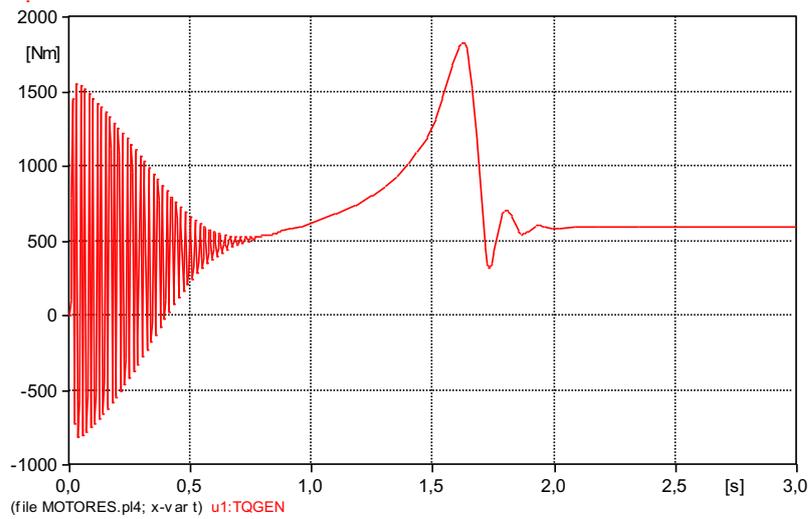
Fonte: autoria própria.

Figura 24 - Corrente de partida do motor de 100 [cv]



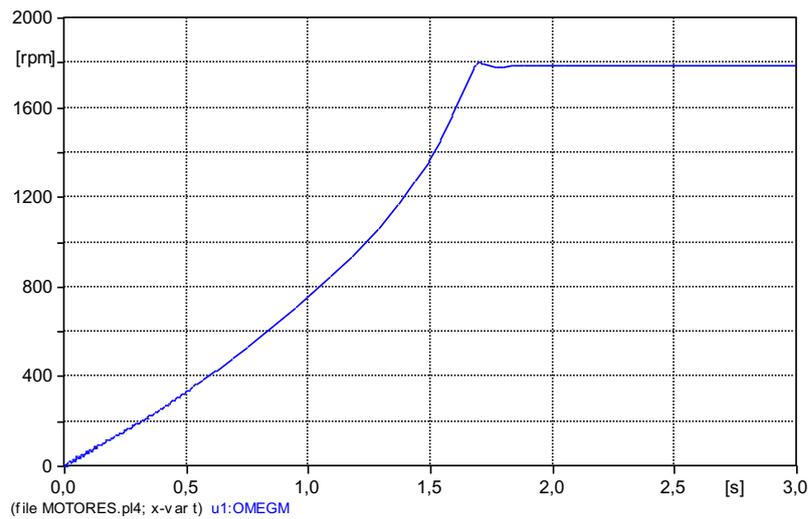
Fonte: autoria própria.

Figura 25 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 150 [cv]



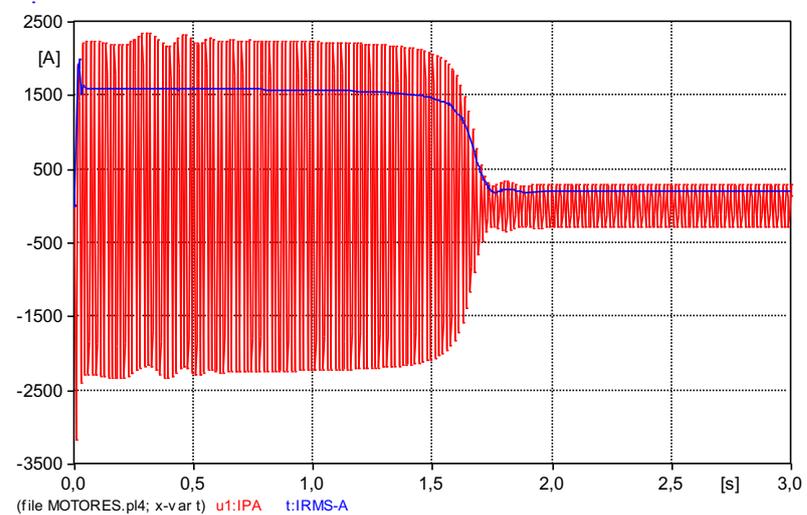
Fonte: autoria própria.

Figura 26 - Velocidade atingida pelo motor de 150 [cv]



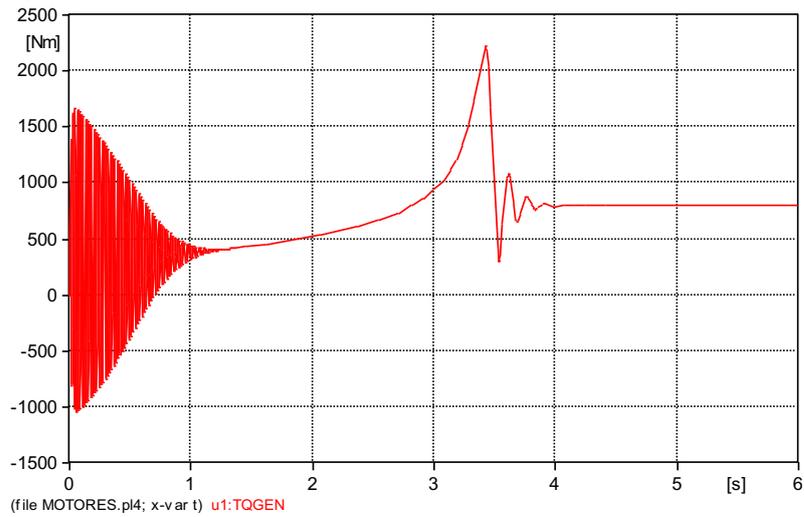
Fonte: autoria própria.

Figura 27 - Corrente de partida do motor de 150 [cv]



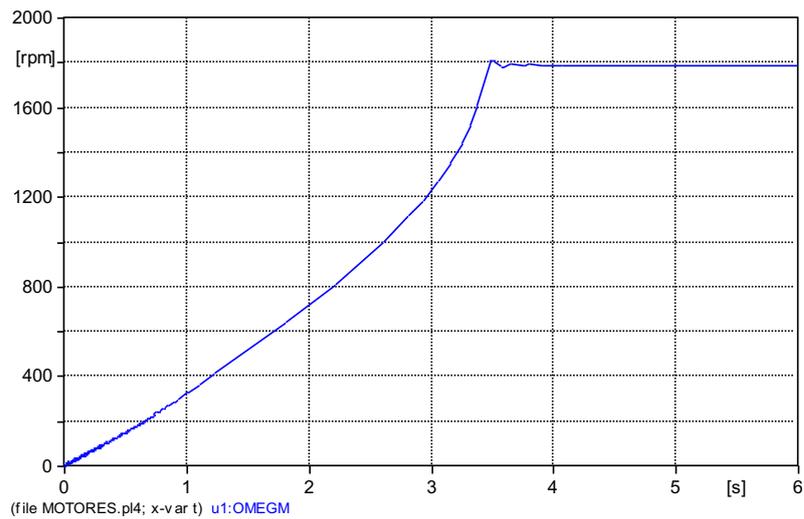
Fonte: autoria própria.

Figura 28 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 200 [cv]



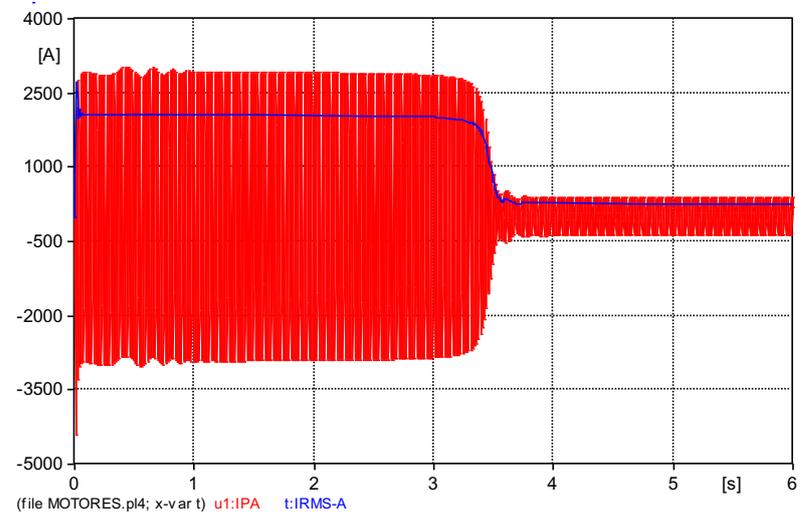
Fonte: autoria própria.

Figura 29 - Velocidade atingida pelo motor de 200 [cv]



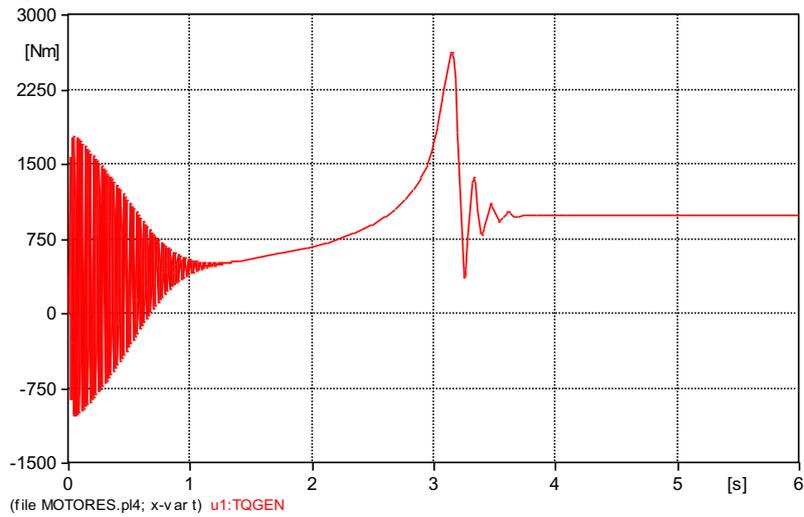
Fonte: autoria própria.

Figura 30 - Corrente de partida do motor de 200 [cv]



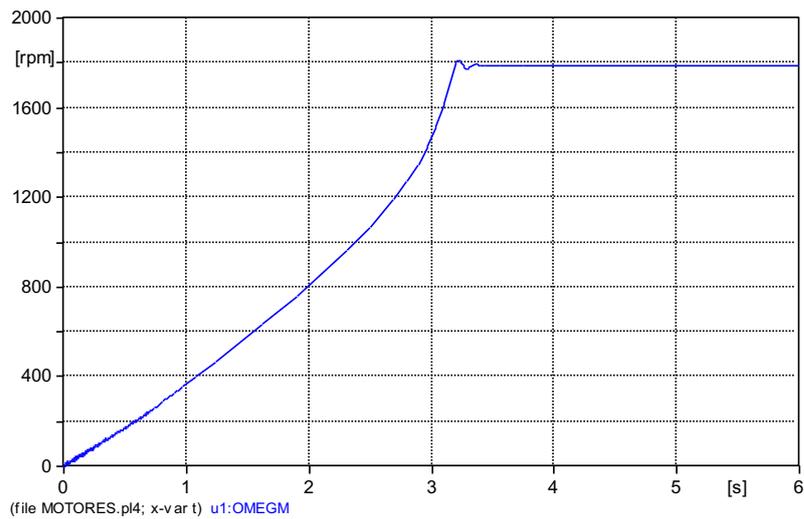
Fonte: autoria própria.

Figura 31 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 250 [cv]



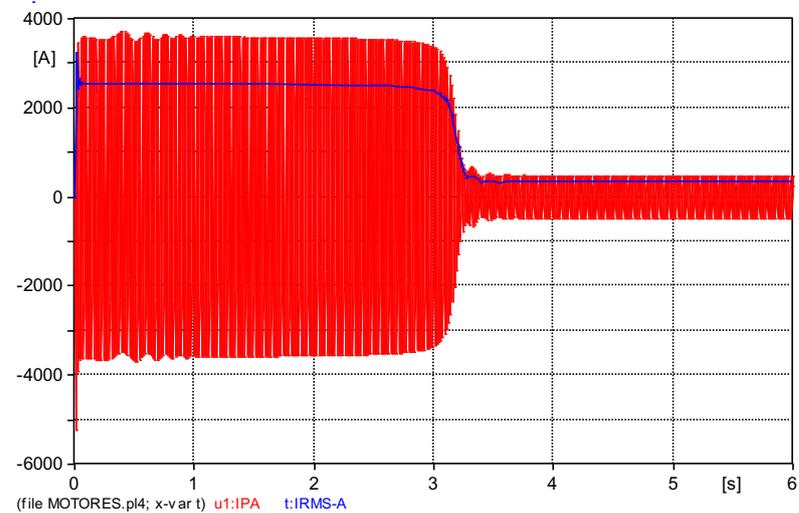
Fonte: autoria própria.

Figura 32 - Velocidade atingida pelo motor de 250 [cv]



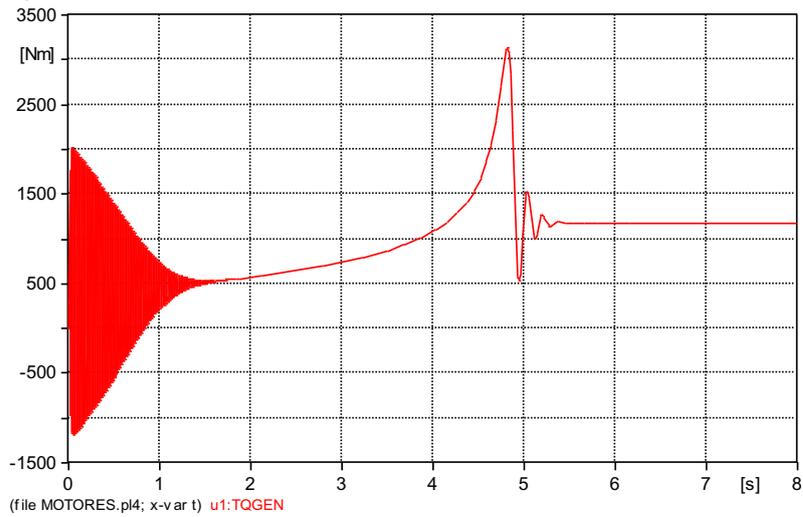
Fonte: autoria própria.

Figura 33 - Corrente de partida do motor de 250 [cv]



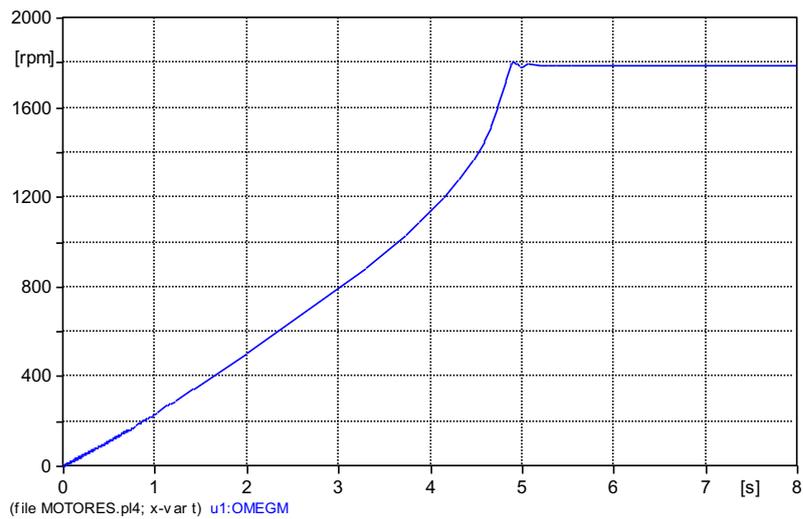
Fonte: autoria própria.

Figura 34 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 300 [cv]



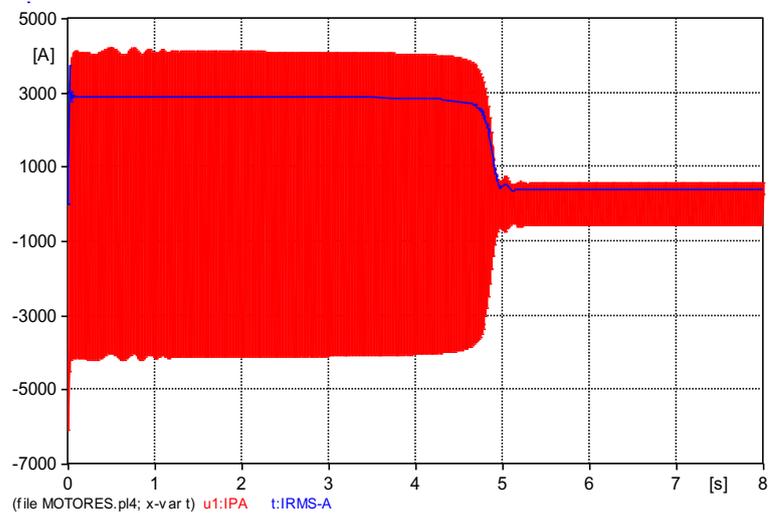
Fonte: autoria própria.

Figura 35 - Velocidade atingida pelo motor de 300 [cv]



Fonte: autoria própria.

Figura 36 - Corrente de partida do motor de 300 [cv]



Fonte: autoria própria.

Para validar a modelagem dos motores, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos nas simulações no ATPDraw com os valores presentes nas folhas de dados dos motores de indução trifásicos. As Tabelas 11 e 12 apresentam comparação direta entre os valores, e a Tabela 13 mostra o maior erro, em porcentagem, dentre todas as comparações, para cada grandeza analisada.

Tabela 11 - Comparação entre valores para motores de 50 a 150 [cv]

Grandeza	Folha de Dados	ATP	Folha de Dados	ATP	Folha de Dados	ATP
P_N [cv]	50,00		100		150	
I_N [A]	70,90	70,81	140,00	140,59	206,00	202,93
I_P/I_N	6,40	6,45	8,50	8,52	8,90	8,79
n_N [rpm]	1775,00	1775,00	1780,00	1780,20	1787,00	1785,10
s_N [%]	1,39%	1,39%	1,11%	1,10%	0,72%	0,83%
$\cos \Phi$	0,84	0,84	0,85	0,85	0,84	0,86
T_N [Nm]	199,00	199,01	403,00	402,43	588,00	588,51
T_P [pu]	2,50	2,53	3,40	3,45	2,50	2,81
$T_{MÁX}$ [pu]	2,70	2,73	3,60	3,65	3,00	3,09

Tabela 12 - Comparação entre valores para motores de 200 a 300 [cv]

Grandeza	Folha de Dados	ATP	Folha de Dados	ATP	Folha de Dados	ATP
P_N [cv]	200		250		300	
I_N [A]	271,00	270,70	338,00	335,88	399,00	399,39
I_P/I_N	7,70	7,67	7,00	7,60	7,30	7,32
n_N [rpm]	1790,00	1789,80	1790,00	1789,90	1790,00	1789,90
s_N [%]	0,56%	0,57%	0,56%	0,56%	0,56%	0,56%
$\cos \Phi$	0,87	0,87	0,86	0,87	0,87	0,87
T_N [Nm]	801,00	800,98	988,00	986,87	1170,00	1173,50
T_P [pu]	2,90	2,77	2,50	2,56	2,50	2,56
$T_{MÁX}$ [pu]	2,60	2,77	2,50	2,56	2,40	2,47

Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos

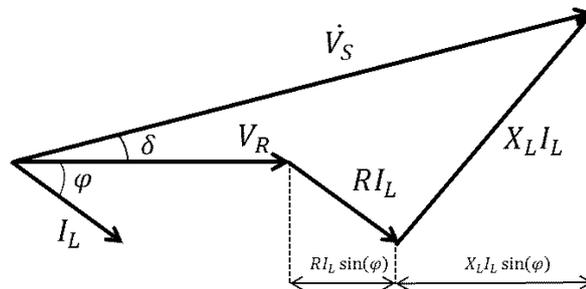
Grandeza	I_N	I_P/I_N	n_N	s_N	$\cos \Phi$	T_N	T_P	$T_{MÁX}$
Erro máximo	1,49%	8,59%	0,11%	0,11%	2,37%	0,30%	12,38%	6,42%

Verifica-se que as principais grandezas de desempenho obtidas nas simulações, sob condições nominais, são bem próximas aos valores utilizados como referência e indicados nas folhas de dados de fabricantes. Os maiores erros constam nas grandezas de torque de partida (T_P) e a razão entre a corrente de partida (I_P) e a corrente nominal (I_N).

4 APLICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE

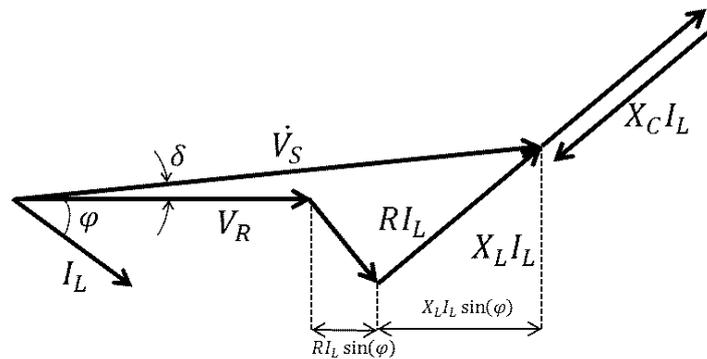
A utilização de banco de capacitores em série em sistemas de distribuição é consideravelmente reduzida em comparação à sua utilização em sistemas de transmissão. Para sistemas de distribuição, a aplicação de CRS visa principalmente regular, instantaneamente, a tensão nas linhas, além de também aumentar a capacidade de transmissão de energia, com confiabilidade e custo reduzido. As Figuras 37, 38 e 39 apresentam os diagramas fasoriais de sistemas sem e com a instalação do banco de capacitores em série.

Figura 37 - Diagrama fasorial do sistema sem CRS



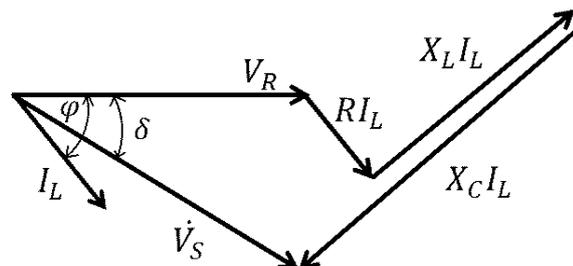
Fonte: (JESUS, 2016)

Figura 38 - Diagrama fasorial do sistema com CRS e X_C inferior a X_L



Fonte: (JESUS, 2016)

Figura 39 - Diagrama fasorial do sistema com CRS e X_C superior a X_L



Fonte: (JESUS, 2016)

Dentre as três condições apresentadas, o diagrama fasorial apresentado na Figura 39 ilustra a sobrecompensação, uma vez que a reatância capacitiva é maior que a reatância indutiva proveniente da linha, condição em que há um ganho elevado de tensão. Porém, como o banco fornece reativos para o sistema, há uma elevação do fator de potência, e, caso o fator de potência se torne capacitivo, o banco gerará redução na tensão.

Apesar das vantagens dos sistemas de compensação série, alguns efeitos colaterais relevantes podem acontecer, portanto torna-se necessário realizar uma análise detalhada para definição e especificação do projeto, sendo recomendadas simulações utilizando programas de transitórios eletromagnéticos como o ATPDraw. A seguir, será abordado o grau de compensação.

4.1 GRAU DE COMPENSAÇÃO

Em sistemas de distribuição radiais, o grau de compensação (k_C) pode ser definido da seguinte maneira:

$$k_C \% = \frac{X_C}{X_{LT}} \times 100 \quad (3)$$

Recomenda-se a utilização de no máximo 100% de compensação, uma vez que, para valores superiores, torna-se maior também a chance de fenômenos indesejados acontecerem, tais como ferroressonância e auto-excitação de motores, que serão apresentados a seguir. No entanto, se o devido estudo e as corretas simulações forem realizadas, é possível utilizar compensação acima de 100% sem que problemas aconteçam, porém ressalta-se que há riscos.

4.2 FERRORESSONÂNCIA

A ferroressonância é um fenômeno que geralmente causa extremas sobretensões. Se um transformador a vazio ou com baixo carregamento é alimentado por um circuito com banco de capacitores série, uma temporária ou permanente condição de ressonância não-linear pode ocorrer. Correntes subharmônicas e oscilatórias podem ser estabelecidas (JESUS, 2016, p. 7).

A ferrorressonância pode ser evitada a partir das seguintes recomendações:

- By-pass do BCS durante a energização do circuito e permanecer desta forma por algum tempo antes de colocar o banco para operar novamente;
- Reduzir a compensação fornecida pelo BCS com a adição de células capacitivas extras;
- Inserir um resistor de amortecimento em paralelo ao BCS.

4.3 AUTO-EXCITAÇÃO DE MOTORES

As respostas das correntes solicitadas para quaisquer circuitos elétricos que contenham capacitores, indutores e resistores em série podem ser originadas de duas formas distintas. No primeiro caso, pode ser forçada pela influência de uma fonte de tensão externa, e a frequência desta corrente é a mesma da fundamental. No segundo caso, pode coincidir com a frequência natural do circuito, e o percorre em resposta a alguma variação no mesmo, tendendo a zero. O valor da resistência equivalente do sistema determina o tempo de amortecimento do circuito.

A resistência e o amortecimento são diretamente proporcionais. Quanto menor for este amortecimento, maior será a duração da corrente no sistema. Se uma resistência idêntica à de amortecimento, porém hipoteticamente “negativa” é inserida no circuito, correntes na frequência natural do sistema circulam continuamente.

Este é um tipo de condição que pode existir num motor de indução em que um BCS é conectado no circuito do estator. Neste caso, o comportamento da máquina altera entre motor, à frequência fundamental, e gerador, à frequência subsíncrona. (JESUS, 2009, p. 1).

A auto-excitação de motores pode ser evitada a partir das seguintes recomendações:

- By-pass do BCS durante a partida de motores. Porém, uma das vantagens do uso de CRS é a redução de variações de tensão justamente para suporte à partida de motores, o que possivelmente torna esta opção não tão eficaz;
- Assim como no caso de ferrorressonância, a inserção de um resistor em paralelo com o BCS reduz o grau de compensação, fornecendo um amortecimento natural, porém perdendo parte de sua capacidade de regulação de tensão.

5 SIMULAÇÕES DOS ALIMENTADORES

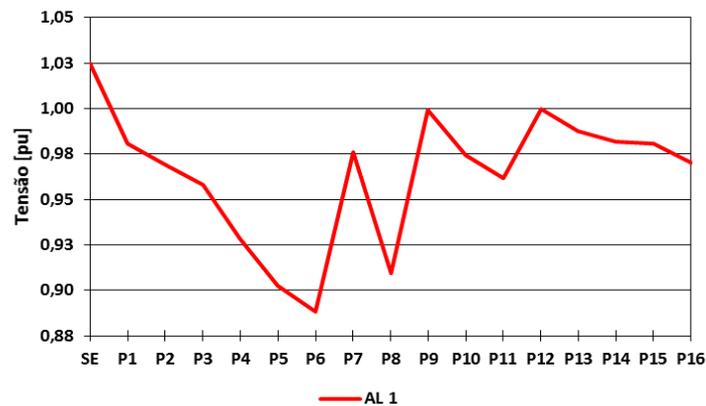
A seguir, será apresentado o perfil da tensão ao longo de cada alimentador, com base nas simulações realizadas, para regime permanente e após partida de motores.

5.1 REGIME PERMANENTE (RP)

5.1.1 Alimentador 1

A Figura 40 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 1 em RP.

Figura 40 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 em RP

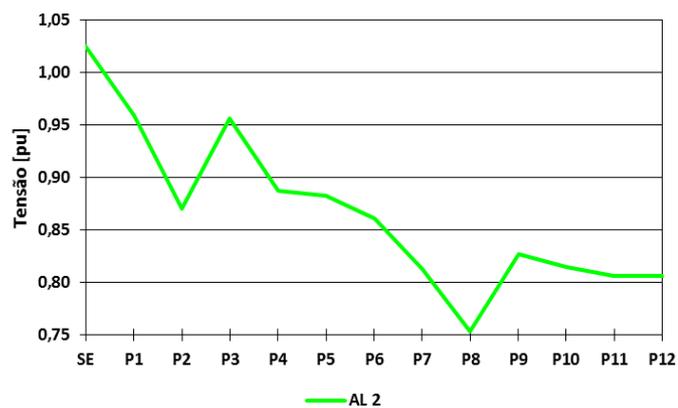


Fonte: autoria própria.

5.1.2 Alimentador 2

A Figura 41 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 2 em RP.

Figura 41 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 em RP

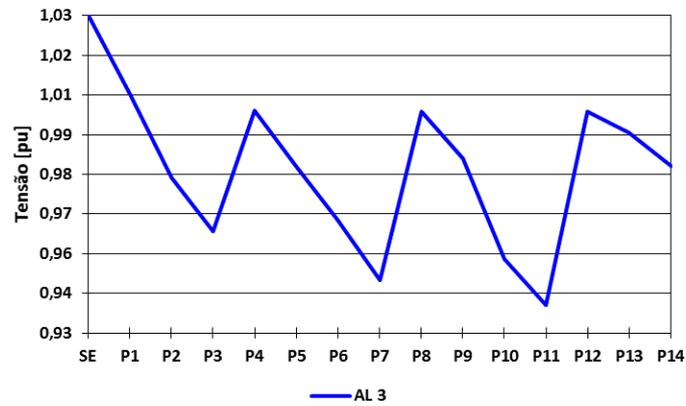


Fonte: autoria própria.

5.1.3 Alimentador 3

A Figura 42 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 3 em RP.

Figura 42 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 em RP

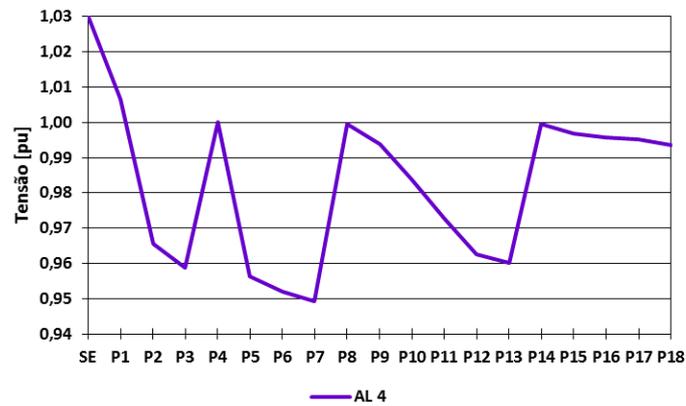


Fonte: autoria própria.

5.1.4 Alimentador 4

A Figura 43 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 4 em RP.

Figura 43 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 em RP



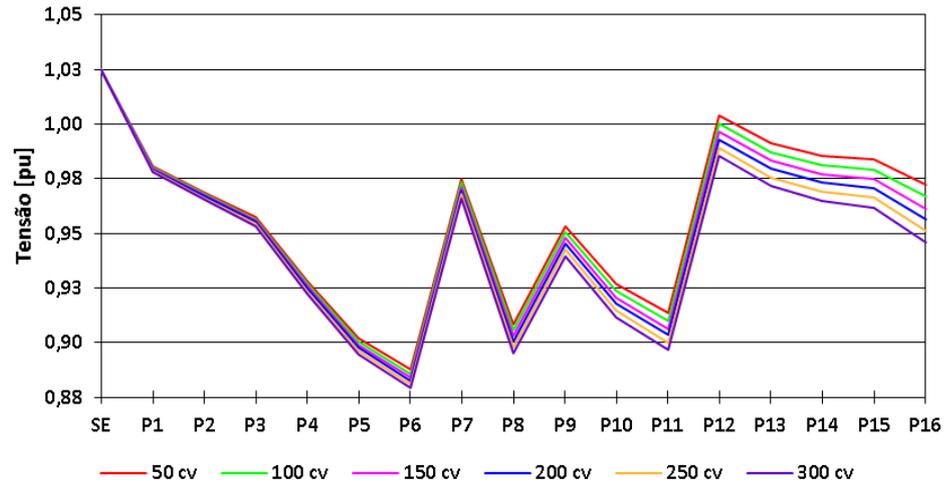
Fonte: autoria própria.

5.2 PARTIDA DE MOTORES (PM)

5.2.1 Alimentador 1

A Figura 44 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 1 após PM.

Figura 44 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 após PM

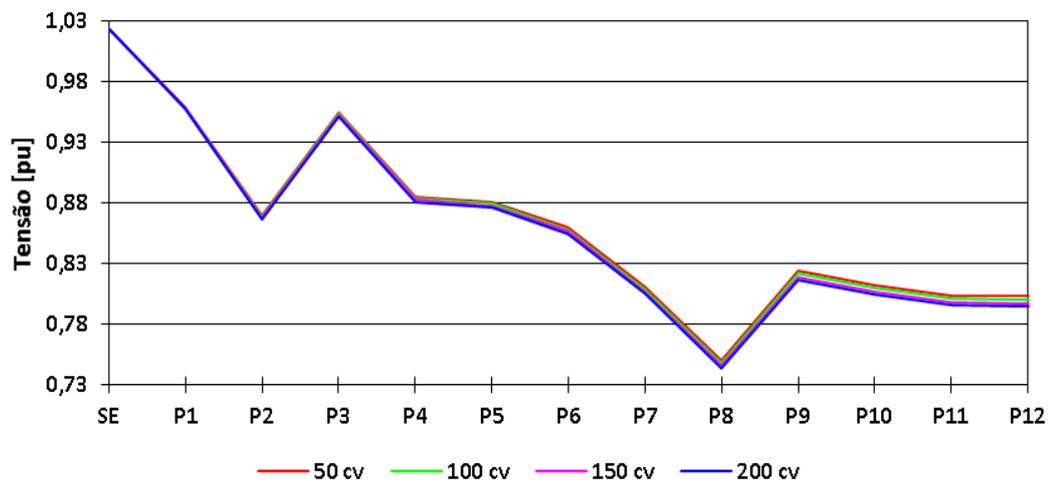


Fonte: autoria própria.

5.2.2 Alimentador 2

A Figura 45 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 2 após PM.

Figura 45 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 após PM

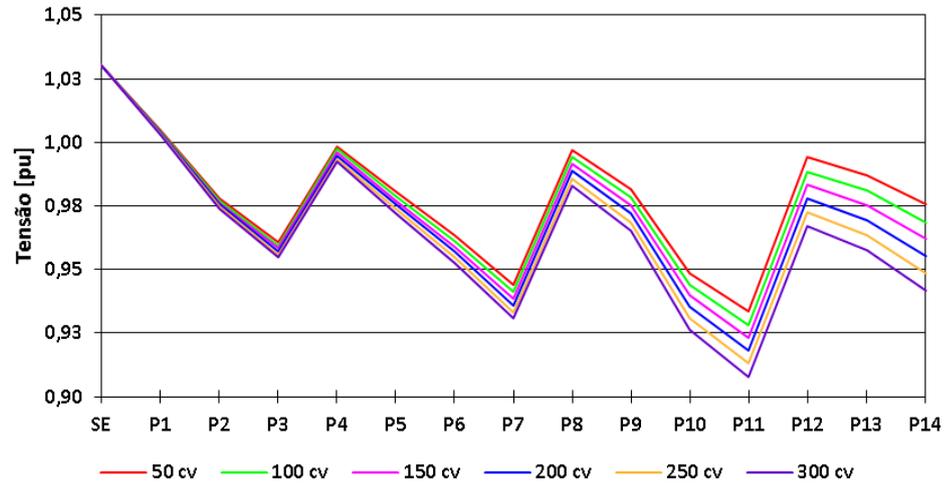


Fonte: autoria própria.

5.2.3 Alimentador 3

A Figura 46 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 3 após PM.

Figura 46 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 após PM

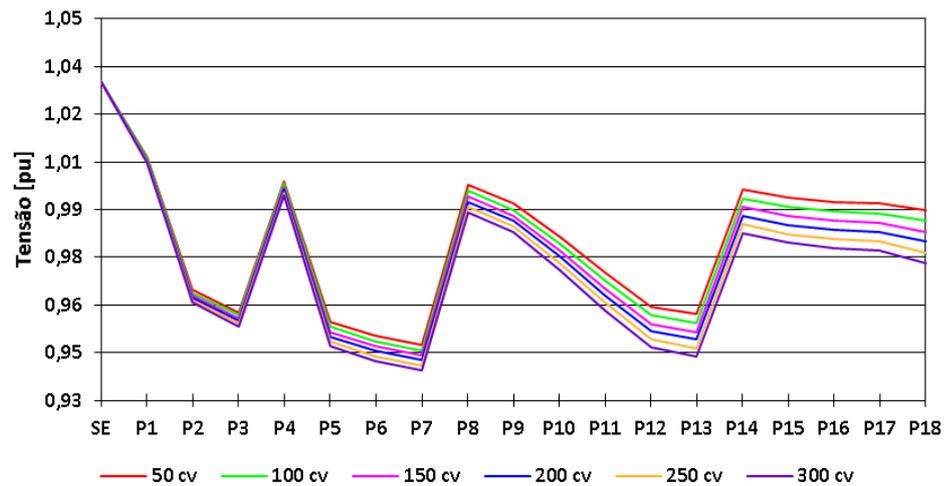


Fonte: autoria própria.

5.2.4 Alimentador 4

A Figura 47 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 4 após PM.

Figura 47 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 após PM



Fonte: autoria própria.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para analisar e classificar o nível da tensão dos alimentadores, quanto à QEE, foi consultado o Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, do PRODIST, revisão 12, da ANEEL, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

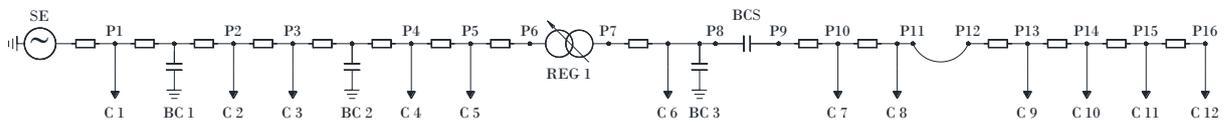
Para as simulações em regime permanente, os Alimentadores 1 e 2 apresentaram valores dentro da faixa crítica, especialmente o AL 2, enquanto que os Alimentadores 3 e 4 mantiveram-se dentro da faixa adequada de operação ao longo de todo o sistema de distribuição.

Para as simulações com condição de Partida de Motor, os Alimentadores 1 e 2 demonstraram número maior ainda de valores dentro da faixa crítica, principalmente o AL 2, enquanto que o Alimentador 3 exibiu poucos pontos na faixa precária, e apenas para alguns motores. O Alimentador 4 mostrou-se dentro da faixa adequada de operação ao longo de todo o sistema de distribuição e para todos os motores. Ressalta-se que, devido ao reduzido valor da tensão, os motores de 250 e 300 [cv] não partiram no Alimentador 2.

6 SIMULAÇÕES DOS ALIMENTADORES COM CRS

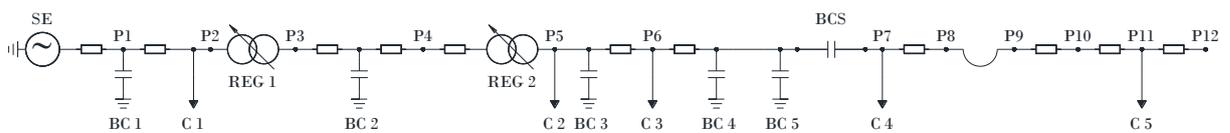
A seguir, serão apresentados os resultados de simulações dos alimentadores com a aplicação de compensação reativa série, através da adição de um banco de capacitores em série. A implementação do BCS em cada alimentador foi realizada com base em diversos testes e simulações, envolvendo principalmente diferentes locais de instalação do equipamento. As Figuras 48, 49, 50 e 51 apresentam os diagramas unifilares dos alimentadores com o BCS, além de algumas alterações recorrentes desta aplicação.

Figura 48 - Diagrama unifilar do Alimentador 1 com implementação do BCS



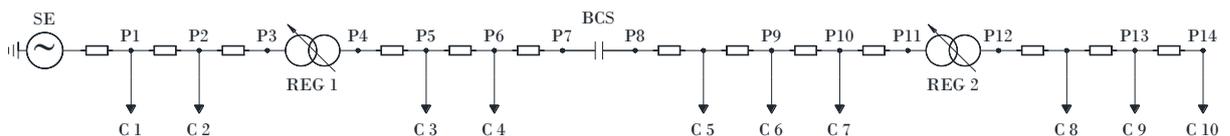
Fonte: autoria própria.

Figura 49 - Diagrama unifilar do Alimentador 2 com implementação do BCS



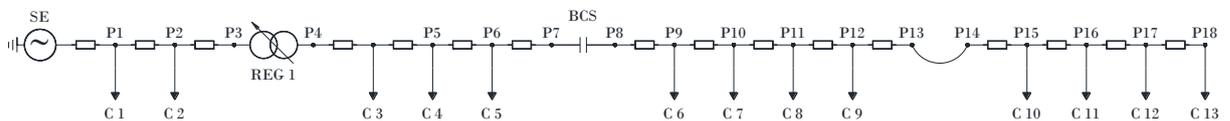
Fonte: autoria própria.

Figura 50 - Diagrama unifilar do Alimentador 3 com implementação do BCS



Fonte: autoria própria.

Figura 51 - Diagrama unifilar do Alimentador 4 com implementação do BCS



Fonte: autoria própria.

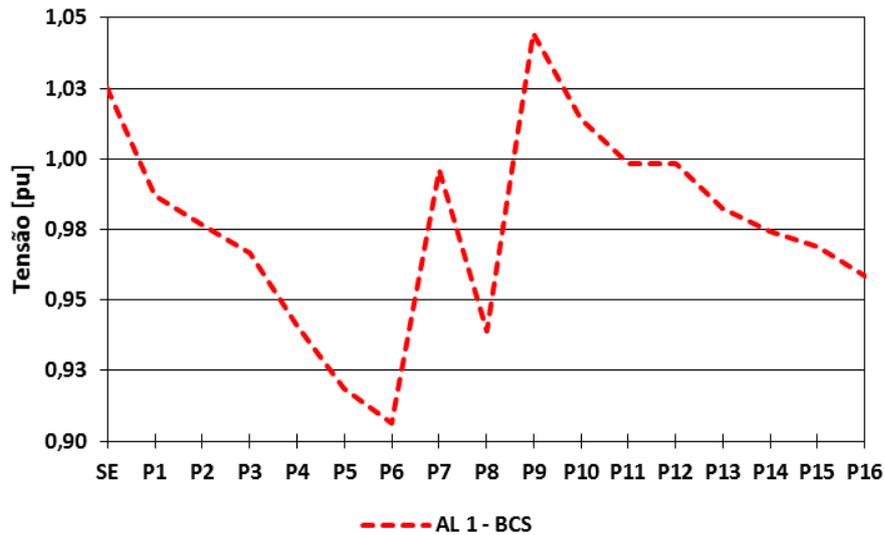
O grau de compensação nas simulações foi limitado a aproximadamente 100%. Como foram considerados valores reais de unidades capacitivas ($X_C = 67 [\Omega]$, $X_C = 100 [\Omega]$, $X_C = 120 [\Omega]$ e $X_C = 200 [\Omega]$) para as classes de tensão abordadas, por vezes não é possível obter exatamente 100% de compensação. Os melhores casos foram os escolhidos, ou para melhorar a regulação da tensão ou para substituir reguladores de tensão.

6.1 REGIME PERMANENTE (RP)

6.1.1 Alimentador 1

A Figura 52 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 1 em RP.

Figura 52 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 com BCS e em RP

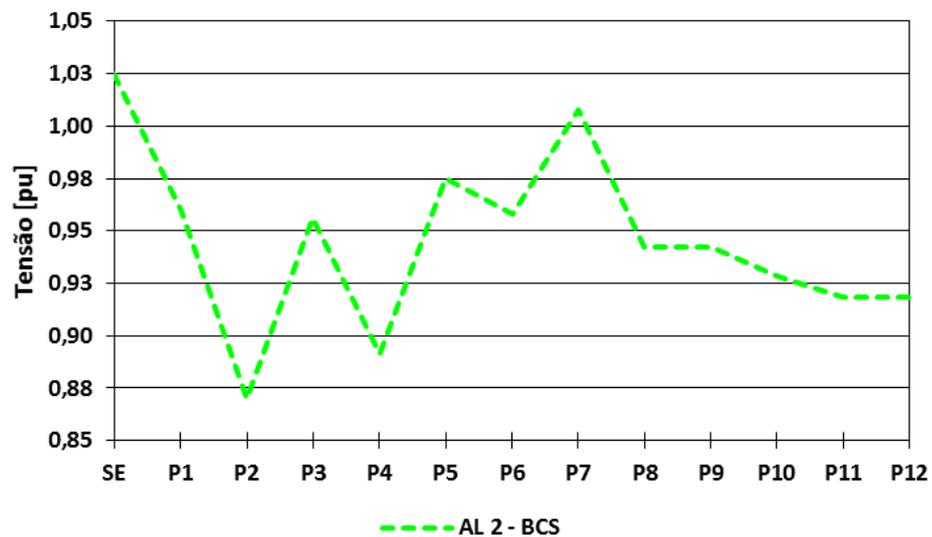


Fonte: autoria própria.

6.1.2 Alimentador 2

A Figura 53 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 2 em RP.

Figura 53 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 com BCS e em RP

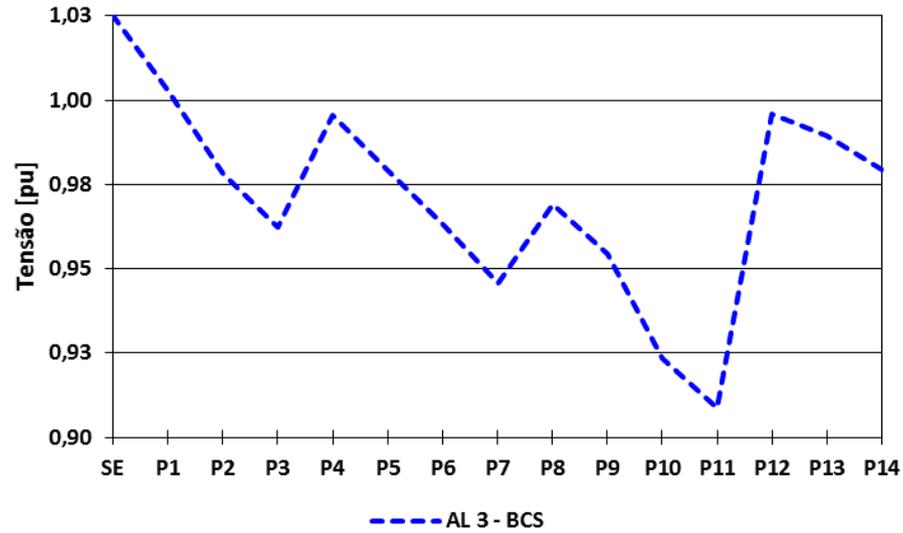


Fonte: autoria própria.

6.1.3 Alimentador 3

A Figura 54 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 3 em RP.

Figura 54 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 com BCS e em RP

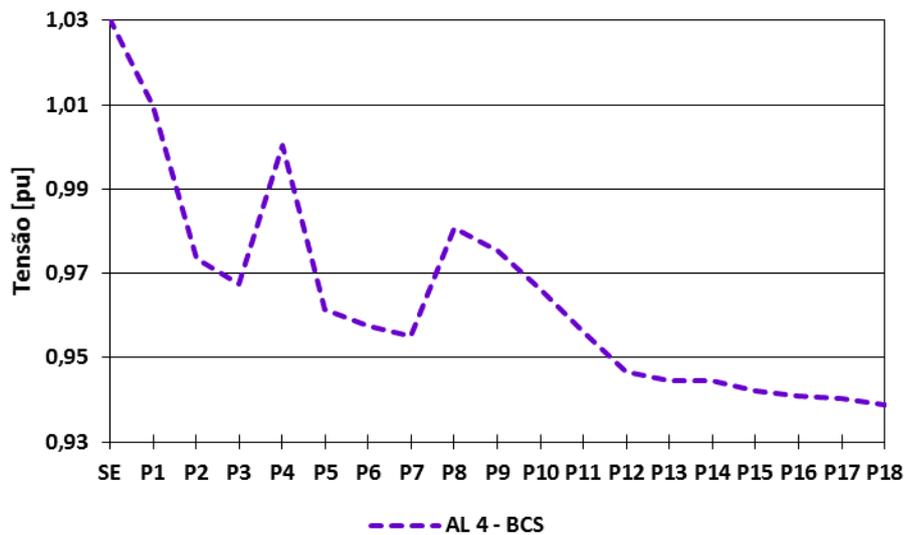


Fonte: autoria própria.

6.1.4 Alimentador 4

A Figura 55 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 4 em RP.

Figura 55 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 com BCS e em RP



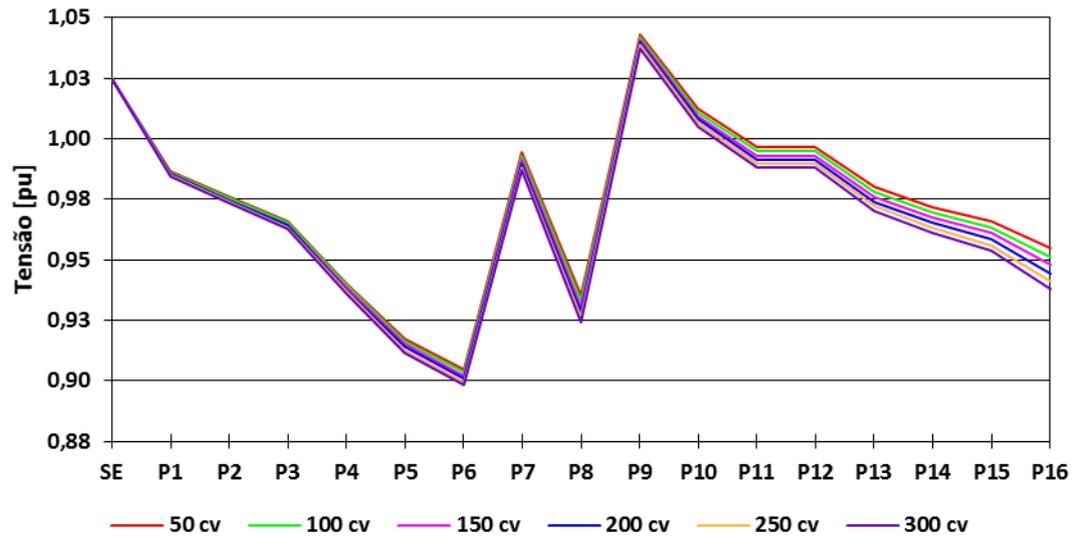
Fonte: autoria própria.

6.2 PARTIDA DE MOTORES (PM)

6.2.1 Alimentador 1

A Figura 56 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 1 após PM.

Figura 56 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 com BCS e após PM

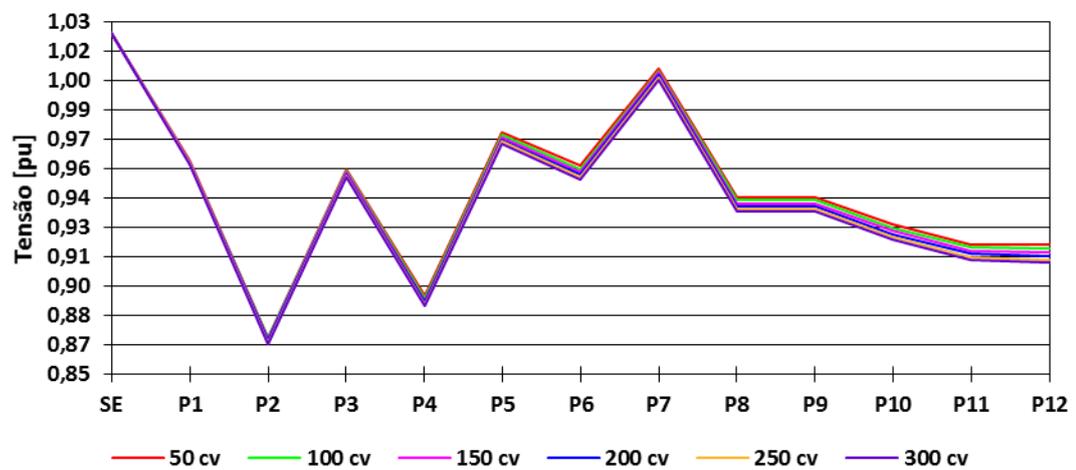


Fonte: autoria própria.

6.2.2 Alimentador 2

A Figura 57 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 2 após PM.

Figura 57 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 com BCS e após PM

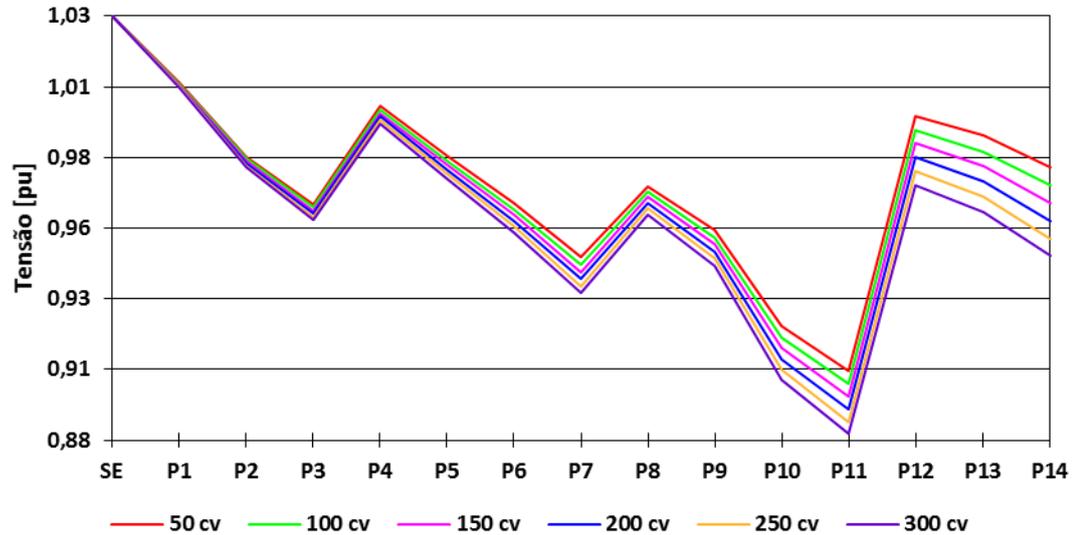


Fonte: autoria própria.

6.2.3 Alimentador 3

A Figura 58 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 3 após PM.

Figura 58 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 com BCS e após PM

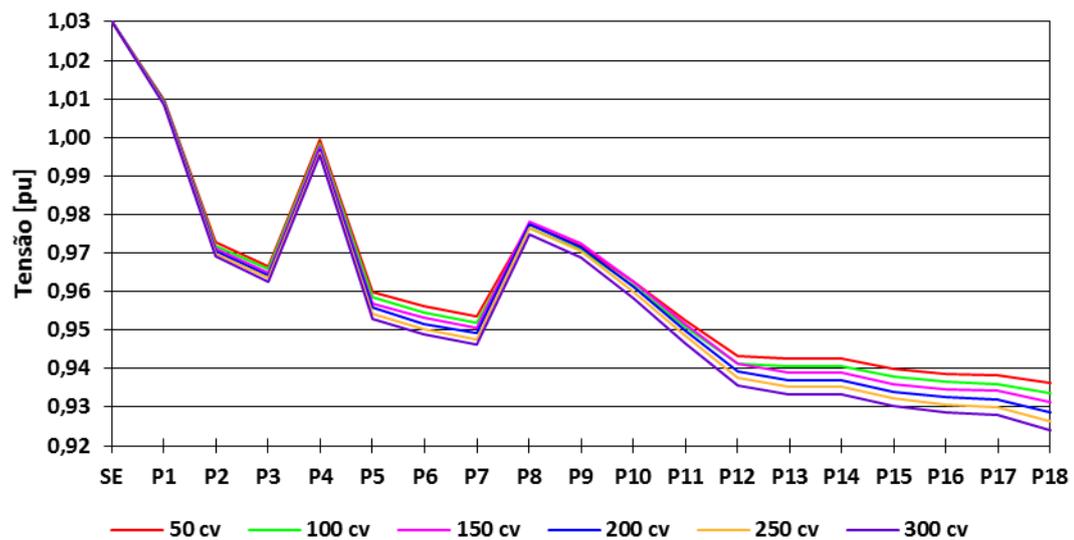


Fonte: autoria própria.

6.2.4 Alimentador 4

A Figura 59 apresenta o comportamento da tensão ao longo do Alimentador 4 após PM.

Figura 59 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 com BCS e após PM

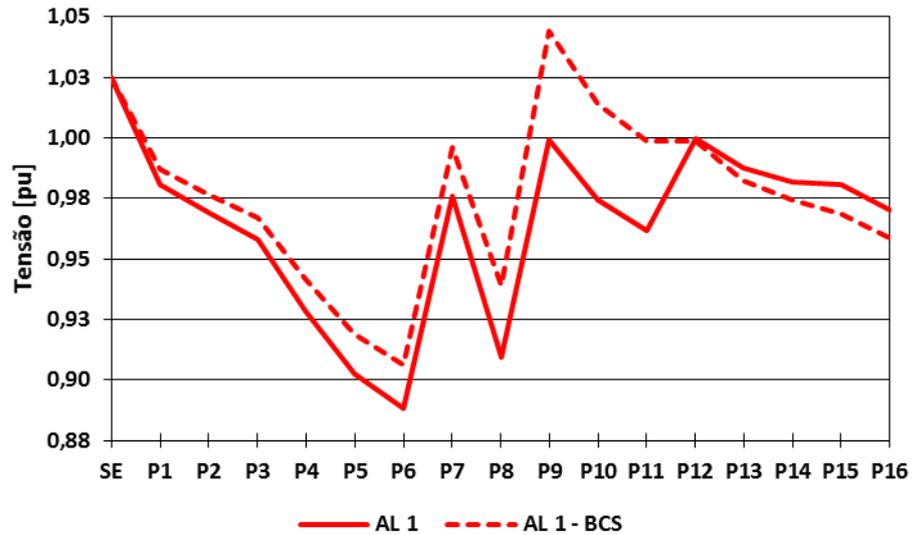


Fonte: autoria própria.

6.3 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

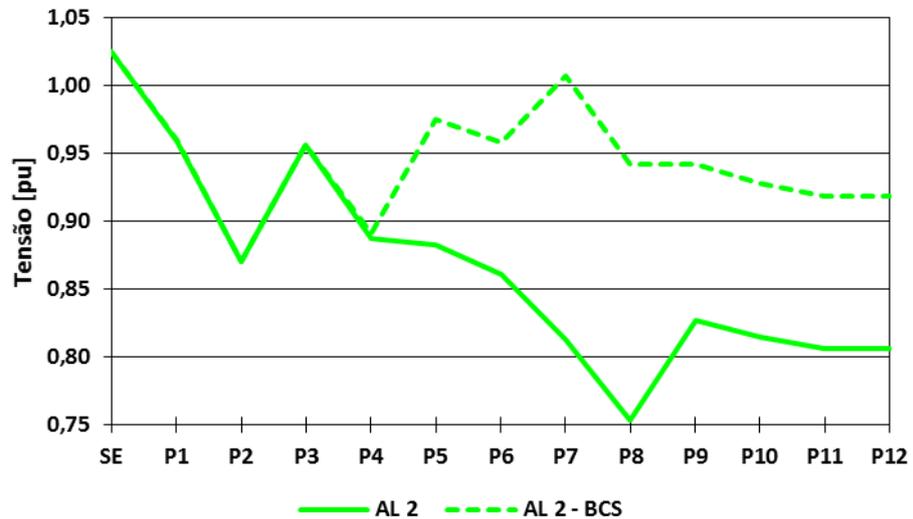
As Figuras 60, 61, 62 e 63 apresentam o comportamento da tensão ao longo do Alimentadores em RP com e sem a utilização de compensação reativa série.

Figura 60 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 1 com e sem BCS em RP



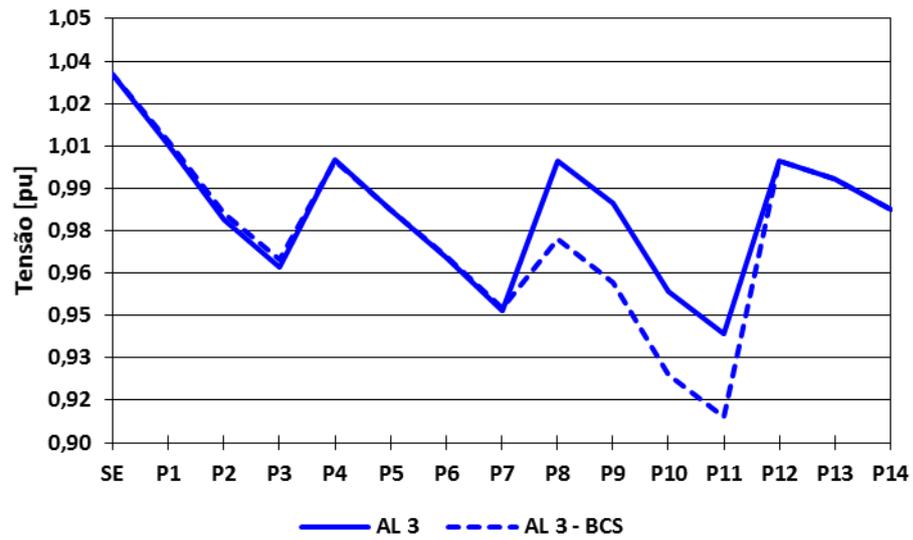
Fonte: autoria própria.

Figura 61 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 2 com e sem BCS em RP



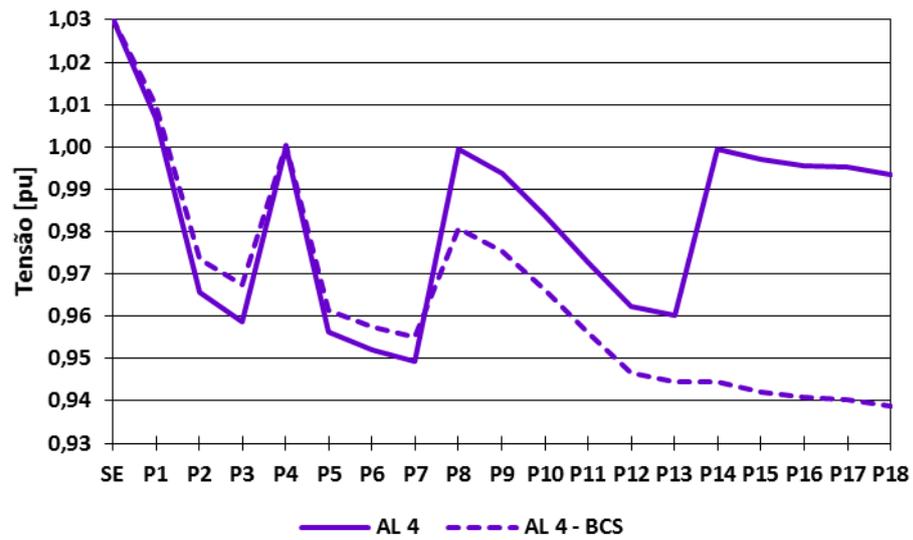
Fonte: autoria própria.

Figura 62 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 3 com e sem BCS em RP



Fonte: autoria própria.

Figura 63 - Perfil de tensão ao longo do Alimentador 4 com e sem BCS em RP



Fonte: autoria própria.

Para analisar e classificar o nível da tensão dos alimentadores, quanto à QEE, foi consultada a Tabela 14 novamente.

Para as simulações em regime permanente, os Alimentadores 1 e 2 ainda apresentaram valores dentro das faixas crítica e precária, respectivamente, mesmo com CRS, porém houve melhora considerável no perfil de tensão destes alimentadores, principalmente no AL 2. O Alimentador 3 permaneceu dentro da faixa adequada quase que em todos os pontos, apresentando uma sutil piora no comportamento da tensão, e o Alimentador 4 manteve-se dentro da faixa adequada de operação ao longo de todo o sistema, porém também com uma sutil redução da tensão.

Para as simulações com condição de Partida de Motor, o Alimentador 1 demonstrou reduzidos pontos na faixa precária, havendo, portanto, melhora considerável do perfil da tensão. O Alimentador 2 ainda apresentou alguns valores dentro das faixas precária e crítica, porém houve uma elevação de tensão considerável em praticamente todos os pontos. O Alimentador 3 exibiu poucos pontos nas faixas crítica e precária, enquanto que novamente o Alimentador 4 manteve-se dentro da faixa adequada de operação ao longo de todo o sistema de distribuição e para todos os motores.

Ressalta-se que, com a utilização de CRS, os motores de 250 e 300 [cv] partiram normalmente no Alimentador 2, evidenciando a melhora no perfil de tensão.

Embora em alguns casos a compensação reativa série pareça ter ocasionado uma redução nos níveis de tensão dos alimentadores, destaca-se, como apresentado nas Figuras 48, 49, 50 e 51, algumas alterações em relação à configuração inicial dos alimentadores, realizadas oriundas da inserção do banco de capacitores em série, tais como:

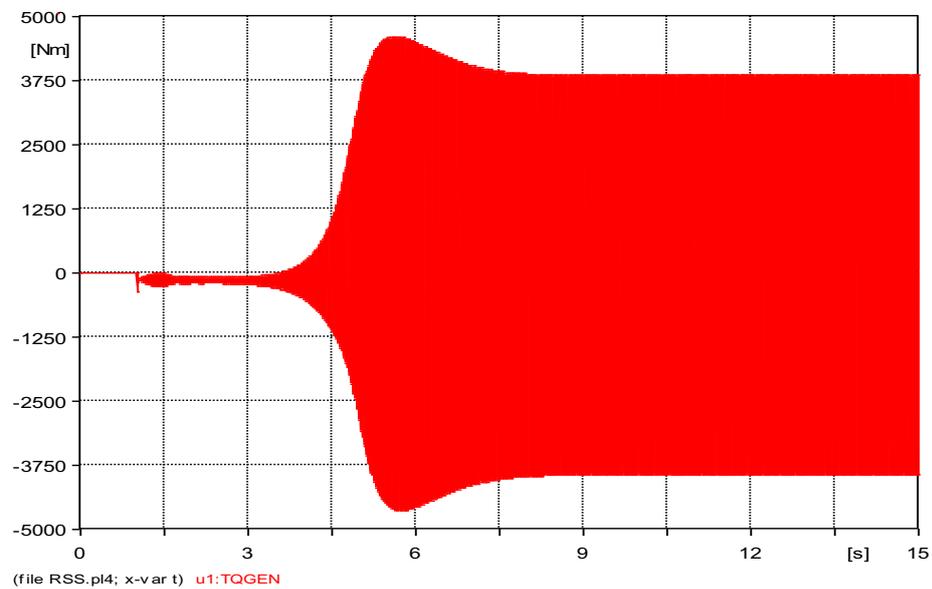
- O REG 2 do Alimentador 1 foi substituído pelo BCS, e, com a melhora no perfil da tensão, não houve mais a necessidade da utilização do REG 3;
- Além da implementação do BCS, a realocação do REG 2 foi necessária para se obter o melhor resultado com grau de compensação em 100%;
- O REG 2 do Alimentador 3 foi substituído pelo BCS, e foi posicionado onde estava o REG 3;
- O REG 2 do Alimentador 4 foi substituído pelo BCS, e, com a melhora no comportamento da tensão, não houve mais a necessidade da utilização do REG 3.

Desta forma, conclui-se que, mesmo com a redução nos níveis de tensão em alguns casos, se a tensão ainda permanecer na faixa adequada, o uso de BCS pode ser vantajoso também em outros quesitos, como na retirada de equipamentos que não se tornem mais necessários após a aplicação de CRS, podendo ser reutilizados em outros circuitos ou ficar como unidade reserva.

6.4 SIMULAÇÃO DE AUTO-EXCITAÇÃO DE MOTOR

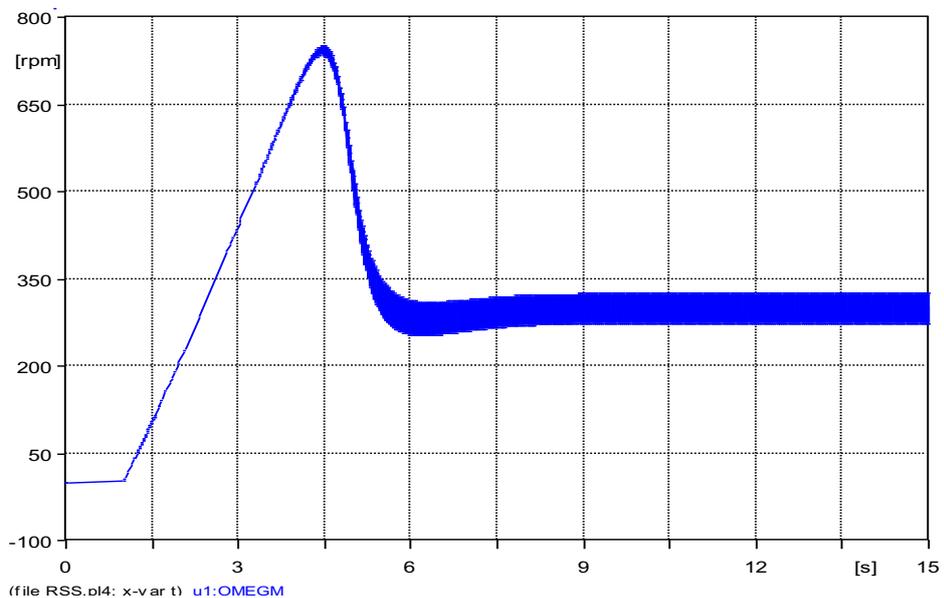
Com o objetivo de simular o fenômeno de auto-excitação de motores, também conhecido como ressonância subsíncronas (RSS), foi modelado um circuito equivalente, em baixa tensão, de um alimentador em 23 [kV], com 200% de compensação reativa série e partida de um motor de indução trifásico de 200 [cv]. As Figuras 64, 65, 66 e 67 apresentam alguns dos resultados dessa simulação.

Figura 64 - Conjugado desenvolvido pelo motor de 200 [cv]



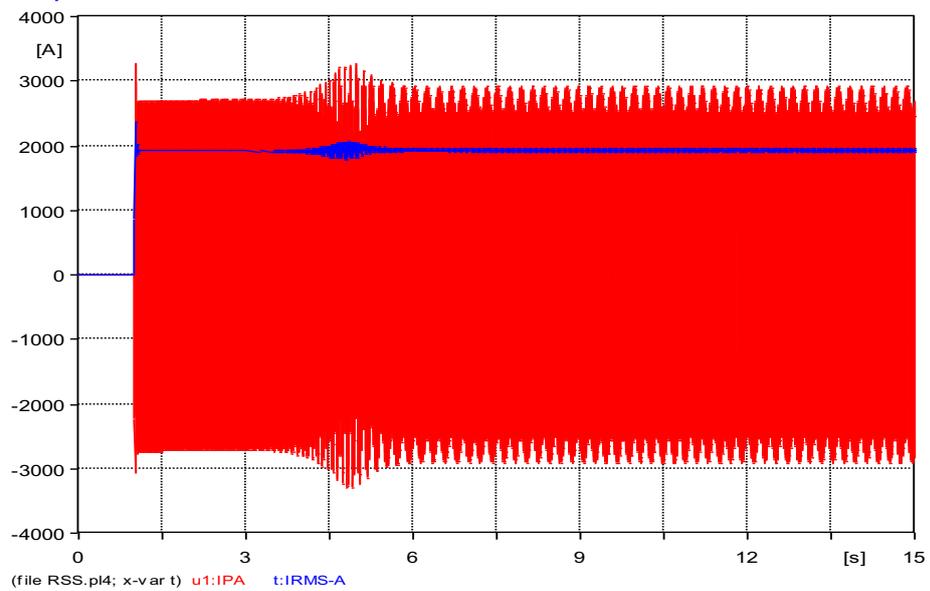
Fonte: autoria própria.

Figura 65 - Velocidade atingida pelo motor de 200 [cv]



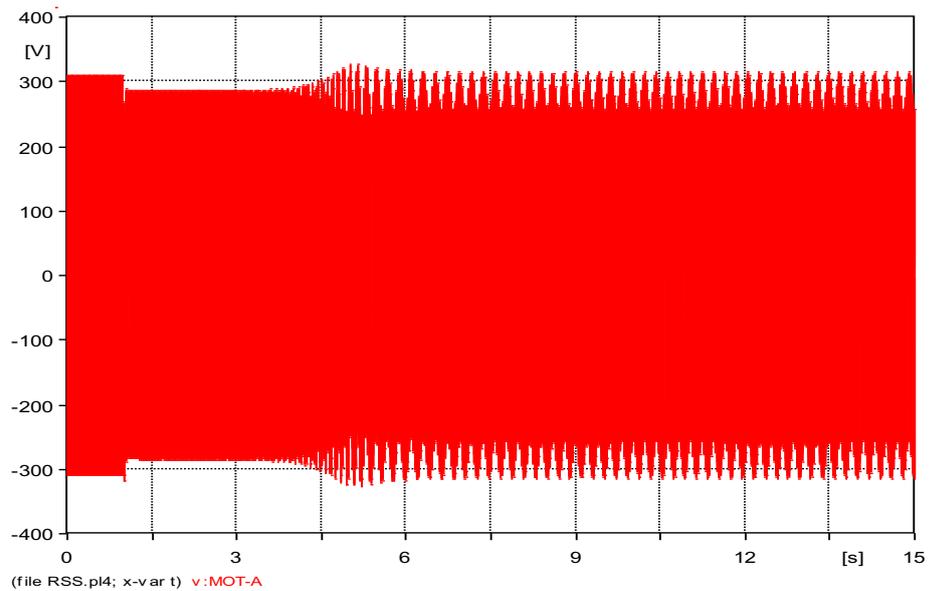
Fonte: autoria própria.

Figura 66 - Corrente de partida do motor de 200 [cv]



Fonte: autoria própria.

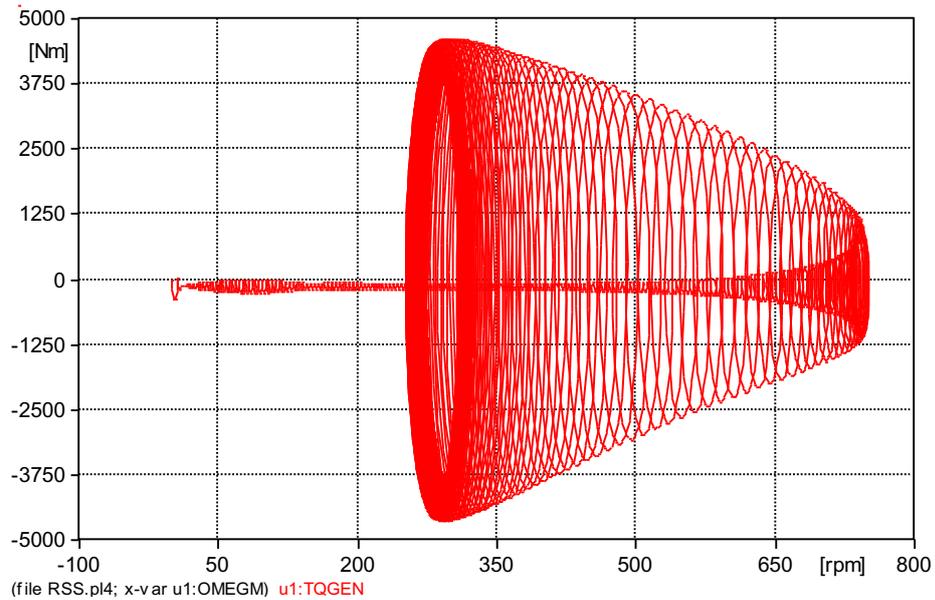
Figura 67 - Tensão do sistema com ocorrência de ressonância subsíncrona



Fonte: autoria própria.

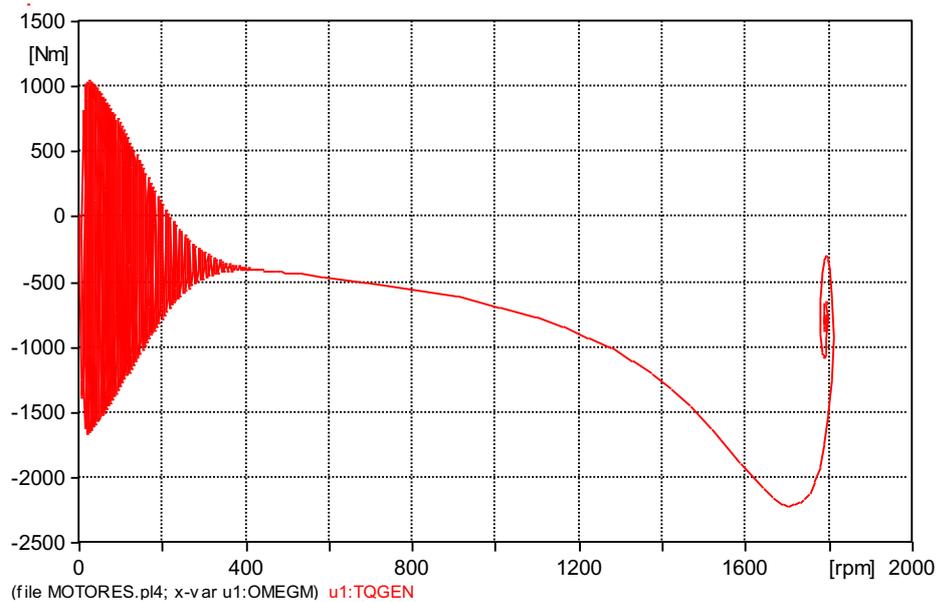
A título de comparação, a Figura 68 apresenta a curva torque x velocidade do motor para o caso de fenômeno de auto-excitação, e a Figura 69 ilustra a mesma curva, porém para a condição normal de partida de um motor.

Figura 68 - Curva Torque x Velocidade de um MIT com ocorrência de RSS



Fonte: autoria própria.

Figura 69 - Curva Torque x Velocidade de um MIT com partida normal



Fonte: autoria própria.

Percebe-se que, durante o fenômeno, o motor atinge velocidade extremamente reduzida em relação à nominal, além de manter elevada corrente de partida, alto torque e oscilações na tensão do sistema enquanto o evento perdurar. Ressalta-se a importância de evitar a utilização de sobrecompensação, porém, caso seja cogitada, torna-se altamente recomendável realizar simulações computacionais.

7 CONCLUSÃO

Um dos principais temas em pauta atualmente é a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), devido à necessidade de cada vez mais haver maior qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia, concernentes à perda da capacidade de investimento no setor elétrico e concorrência. Neste sentido, são buscadas alternativas técnico-econômicas eficientes a fim de aprimorar o desempenho dos sistemas, e uma dessas alternativas é a utilização de compensação reativa série, através de Bancos de Capacitores em Série (BCS).

Apesar de ser amplamente utilizado em sistemas de transmissão, possui uso reduzido em sistemas de distribuição, uma vez que seus efeitos colaterais podem ser bastante severos aos sistemas. Porém, sua correta utilização fornece várias vantagens sobre os métodos mais usuais, que utilizam reguladores automáticos de tensão e capacitores shunt, tais como regulação instantânea de tensão, suporte à partida de motores, redução de quedas de tensão, dentre outros.

Para simular o impacto da aplicação de Compensação Reativa Série (CRS), Sistemas de Distribuição foram modelados, com base em alimentadores reais, no programa de transitórios eletromagnéticos ATPDraw. Para validação dos sistemas, foram efetuados ensaios de curto-circuito, que foram comprovados através de cálculos manuais. Motores de Indução Trifásicos (MITs) foram também modelados, com o objetivo de avaliar os impactos da aplicação também frente a cargas sensíveis, e foram validados a partir da comparação dos resultados de simulações com valores de catálogos e folhas de dados de indústrias especializadas na produção deste equipamento.

Alguns dos alimentadores já apresentavam níveis de tensão adequados, porém outros apresentavam quedas de tensão relevantes, principalmente devido a longas distâncias. A utilização de CRS beneficiou consideravelmente os sistemas com níveis de tensão em faixas precárias. No Alimentador 2, por exemplo, inicialmente não houve a partida dos motores de 250 e 300 [cv], que partiram com sucesso após a inserção do BCS, comprovando a eficácia da aplicação.

Os impactos da CRS foram observados mais intensos nos alimentadores em 15 [kV], uma vez que, devido às características dos cabos, a relação X/R é maior nestes sistemas, o que afeta diretamente na capacidade da compensação. No entanto, os alimentadores em 23 [kV] se beneficiaram também, por exemplo quando da não necessidade da utilização de vários reguladores de tensão (REG), podendo o equipamento ser armazenado como reserva ou até mesmo utilizado em outro sistema.

Por fim, foi realizada uma simulação do fenômeno de auto-excitação de motores (ressonância subsíncrona), demonstrando resultados de um dos efeitos colaterais que podem acompanhar a utilização de compensação reativa série em sistemas de distribuição, tendo a máquina comportamento de motor e gerador simultaneamente. Tal fenômeno decorre principalmente de elevados graus de compensação, acima de 100%, e, portanto, ressalta-se a importância de evitar a utilização de sobrecompensação, porém, caso seja cogitada, torna-se altamente recomendável realizar simulações computacionais.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 12, vigente a partir de 01/01/2021.

ATPDRAW version 7.3 for Windows Users' Manual. Disponível em: <https://www.atpdraw.net/getifile.php?myfile=ATPDrawManual73.pdf>. Acesso em: 07 de Outubro de 2021.

JESUS, N.C. et al. Modelagem, simulação e análise do desempenho de motores de indução trifásicos com o programa ATPDraw. 2011, CBQEE (Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica).

JESUS, N.C. et al. Compensação série em sistemas radiais de média tensão. Curitiba - PR - Brasil. 2016, XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica.

JESUS, N.C.; COGO, J.R. Estudo de oscilações subsíncronas em motores aplicados em sistemas com compensação série. Blumenau – Brasil. 2009, VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica.

OSTWALD, M.V. Simulação das oscilações de tensão em sistemas de distribuição com compensação série. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica – Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2000.