

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

JOSÉ GUILHERME RODRIGUES FILHO

SUPRESSORES DE TRANSITÓRIOS DE ALTA FREQUÊNCIA EM
SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS SF₆

ITAJUBÁ
2016

JOSÉ GUILHERME RODRIGUES FILHO

SUPRESSORES DE TRANSITÓRIOS DE ALTA FREQUÊNCIA EM
SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS SF₆

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez († *in memoriam*).

Coorientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto.

ITAJUBÁ
2016

TERMO DE APROVAÇÃO



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Título da Tese: **“Supressores de Transitórios de Alta Frequência em Subestações Isoladas a Gás SF₆”.**

Autor: **José Guilherme Rodrigues Filho**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito A = Aprovado - R = Reprovado	Rubrica
1º	A	<i>[Assinatura]</i>
2º	A	<i>Feliciano</i>
3º	A	
4º	A	<i>Ailton Violin</i>
5º	A	<i>avulo</i>

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Tese.

Este documento terá a validade de 90 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Tese.

Resultado Médio: **Conceito:** A, ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 08 de Junho de 2016.

[Assinatura]

Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
1º Examinador – UFPR

[Assinatura]

Prof. Dr. José Feliciano Adami
2º Examinador – UNESP/GUA

[Assinatura]

Prof. Dr. Credson de Salles
3º Examinador – UNIFEI

[Assinatura]

Prof. Dr. Ailton Violin
4º Examinador – UNIFEI

[Assinatura]

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto
5º Examinador (Orientador) - UNIFEI

À minha esposa, Maria Luiza.

*Aos meus filhos, Ana Luiza e Luiz
Guilherme.*

*Pelo apoio e compreensão nos momentos
de ausência, em que me dediquei a mais
este desafio.*

AGRADECIMENTOS

À ITAIPU BINACIONAL, em seu nível gerencial que me incluiu no programa de treinamento, permitindo meus deslocamentos de Foz do Iguaçu até Itajubá e Curitiba; aos colegas das divisões de Laboratório, SMIL.DT, Manutenção, SMMT.DT, e Engenharia de Manutenção, SMIE.DT, que participaram de forma direta na montagem do modelo reduzido e na versão em 500 kV.

À toda equipe do LAT-EFEI, Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez, aos colegas mestrandos e doutorandos que muito contribuíram no desenvolvimento do modelo digital, do modelo reduzido, nas análises dos ensaios e na elaboração deste texto.

À equipe do Laboratório de Alta Tensão dos INSTITUTOS LACTEC, Curitiba, cuja parceria para montagem de um trecho de Subestação Blindada em SF₆ 500 kV, e sua energização para realização dos ensaios de operação da Chave Seccionadora, permitiram a coleta de dados para validação da hipótese nos ensaios em condições similares às encontradas na operação de campo.

“No esforço para compreender a realidade, somos como um homem tentando entender o mecanismo de um relógio fechado. Ele vê o mostrador e os ponteiros, ouve o seu tique-taque, mas não tem meios para abrir a caixa. Se esse homem for habilidoso, poderá imaginar um mecanismo responsável pelos fatos que observa, mas nunca poderá ficar completamente seguro de que sua hipótese seja a única possível.”

Albert Einstein (1879-1955)

RESUMO

Transitórios de frequência muito alta, *Very Fast Transients*, devido a manobras ou *flashovers* em equipamentos de alta tensão isolados a gás SF₆ já são pesquisados e tem sua caracterização bem definida há mais de três décadas. Porém nos últimos anos, devido à crescente utilização de subestações isoladas a gás e o predomínio de disjuntores com câmaras de extinção a SF₆, mesmo em subestações com isolamento convencional a ar, a interação destes transitórios com o dielétrico dos equipamentos, com a possibilidade de levar a falhas prematuras, passou a despertar novamente o interesse de fabricantes e usuários de equipamentos de alta tensão. Ainda existe uma lacuna nas normas que determine qualitativamente e quantitativamente para cada tipo de equipamento os níveis de geração e de suportabilidade destes transitórios de frequência muito alta. Atualmente quando se identifica a sua ocorrência em níveis que ultrapassam a suportabilidade dos equipamentos, os custos envolvidos para a compatibilização quer com a alteração da disposição dos equipamentos, quer com a alteração de projeto principalmente de transformadores, são sempre muito elevados e demandam longo período de tempo para implementação. Este trabalho tem como objetivo propor uma alternativa, de baixo custo e rapidez de implementação, para reduzir os níveis destas sobretensões, utilizando a inserção de anéis (toroides) de material magnético em trechos dos barramentos blindados de forma a aumentar a indutância linear nestes trechos, que passam a atuar como supressores de surtos de alta frequência. Como introdução é realizada uma revisão do conceito do transitório de frequência muito alta, assim como suas formas e origens em equipamentos isolados a SF₆ e de como o dielétrico de equipamentos como transformadores podem ser degradados cumulativamente até causar a falha, pela ruptura do dielétrico. A proposta foi validada primeiramente através de modelagem digital utilizando o software ATPDrawTM. A seguir foram realizadas medições em um modelo reduzido utilizando cabos coaxiais nos comprimentos dos barramentos blindados onde foram conectados componentes R, L e C representando os supressores e demais componentes modelados. Finalmente foram realizados ensaios e medições em um circuito montado em um laboratório de alta tensão com componentes de uma subestação 500 kV, isolada a gás SF₆. Os resultados das medições no circuito em 500 kV confirmaram os resultados das atenuações obtidas (20% a 40%) na modelagem computacional e no modelo reduzido, comprovando assim a viabilidade da implementação da alternativa proposta.

Palavras-chave: VFTO. VFFO. Transitórios de frequência muito alta. Subestação isolada a gás SF₆. Sobretensões. Supressores de surtos em alta tensão.

ABSTRACT

Very Fast Transient Overvoltages, due to switching operations or flashovers in high voltage SF₆ gas insulated equipment are already researched and have its characterization well understood for over three decades. However, only in recent years due to the increasing use of gas insulated substations and the predominance of circuit breakers with SF₆ extinction chambers in conventional air insulated substations, its interaction with the dielectric of the equipment, began to draw the attention of manufacturers and users of high voltage equipment again. There is still an absence in the standards to determine qualitatively and quantitatively for each type of equipment levels for generation and withstand these very high frequency transients. When this occurs currently at levels that exceed the supportability of the equipment, the costs involved to establish the compatibility with, either the change in the positioning of equipment, either with the design change mainly in transformers, are always very high and require long time for implementation. This work aims to propose an alternative, low cost and fast implementation, to reduce the levels of these surges, using the insertion of rings (toroid) of magnetic material in sections of gas insulated busbars to increase the linear inductance in these sections, which shall act as surge suppressors for high frequency. As an introduction, a review of the concept of very high frequency transitory overvoltages, as well as their shapes and origins in SF₆ insulated equipment and as the dielectric equipment such as transformers can be degraded cumulatively to cause failure by dielectric breakdown. The proposal was validated primarily through computer modeling using the software ATPDrawTM. At sequence by measurements performed in a reduced model using coaxial cables in lengths of gas insulated busbars where R, L and C components were connected representing suppressors and other modeled components. Finally tests and measurements were performed in a circuit assembled at a high voltage laboratory with components of a 500 kV Gas Insulated Substation. The results of measurements on the circuit at 500 kV confirmed the attenuation results (20% to 40%) of computer modeling and scale model, thus demonstrating to be viable in fact the implementation of the proposed alternative.

Keywords: VFTO. VFFO. Very fast transient overvoltages. SF₆ gas insulated substation. Overvoltages. Surge suppressors for high voltage transient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caracterização de tensões transitórias.....	19
Figura 2 – Caracterização das sobretensões por valor de pico e duração.....	20
Figura 3 – Diagrama de Tensões em um barramento durante seccionamento	21
Figura 4 – Sequência de reignições durante a abertura de chave seccionadora.	22
Figura 5 – Exemplo de Curva de Resposta em Frequência de um transformador de alta tensão.....	23
Figura 6 – Diagrama unifilar do bay dos geradores 1 e 2 de Itaipu (dentro do tracejado vermelho, o trecho modelado).	30
Figura 7 – Vista em corte do trecho da subestação blindada ABB-ELK 3. Detalhe da posição do disjuntor, da chave seccionadora, do transformador e das três posições sugeridas para instalação dos supressores de transitórios.	31
Figura 8 – Dimensões de referência do “condutor” e “invólucro para SE-Blindada ABB-ELK3.....	33
Figura 9 – Modelo da representação no ATPDraw para disjuntor aberto.....	33
Figura 10 – Modelo para representar o arco durante a operação da chave seccionadora	34
Figura 11 – Modelo para chave seccionadora fechada.	34
Figura 12 – Modelo para o transformador	35
Figura 13 – Oscilograma da simulação comparativa da sobretensão de manobra da chave seccionadora com e sem o uso de supressores.....	36
Figura 14 – Oscilograma da simulação comparativa da sobretensão de manobra da chave seccionadora, com carga residual de -1 p.u., com e sem o uso de supressores.	36
Figura 15 – Simulação da injeção de impulso, 1,14 x 50 ns, partindo da chave seccionadora em direção ao transformador.....	37
Figura 16 – Permeabilidade magnética versus frequência para liga metálica F60.....	39
Figura 17 – Permeabilidade magnética versus frequência para o ferrite MMT139.....	39
Figura 18 – Permeabilidade relativa versus temperatura para o ferrite MMT139.	40
Figura 19 – Perdas versus densidade de fluxo versus frequência para liga F60.....	40
Figura 20 – Vista dos cinco tipos de toroides utilizados para montagem dos atenuadores.	41
Figura 21 – Supressor com montagem interna do toroide junto ao condutor.	43

Figura 22 – Supressor com montagem do toroide externo ao invólucro e sem interrupção de continuidade do invólucro.	43
Figura 23 – Supressor com montagem do toroide externo ao invólucro, com interrupção do da blindagem e links externos para continuidade do invólucro.....	43
Figura 24 – Modelo reduzido utilizado para representar o transformador	44
Figura 25 – Gerador de pulsos repetitivos com 1,14 nanosegundos tempo de subida.	45
Figura 26 – Oscilograma do pulso gerado no modelo reduzido.	45
Figura 27 – Montagem para levantamento da curva de saturação dos cinco atenuadores.	49
Figura 28- Gráfico de barras para os valores T_{PRP} [%] da Tabela 2.....	53
Figura 29 – Diagrama do conjunto de barramentos montados no Laboratório de Alta Tensão.....	54
Figura 30 – Vista da montagem do trecho de subestação de 500 kV na sala de ensaios do Laboratório de Alta Tensão dos Institutos Lactec.	55
Figura 31 – Capacitor 1200 pF x 100 kV, original da câmara de extinção do disjuntor.	56
Figura 32 – Detalhe da montagem de capacitores na posição do transformador.....	57
Figura 33 – Detalhe da montagem de capacitores na posição do disjuntor, à esquerda antes e à direita depois da montagem do anel anti-corona.	57
Figura 34 – Toroides utilizados, à esquerda S_139, ao centro S_190 e à direita S_Nano.	58
Figura 35 – Vista da parte interna do barramento blindado mostrando os toroides montados sobre trecho do condutor com diâmetro reduzido.	59
Figura 36 – Célula de teste montada para validação da resposta em frequência do sensor.	60
Figura 37 – Detalhes dos aterramentos e blindagens adicionais, à esquerda malha de terra e cabeamentos, à direita caixa com dupla blindagem para montagem do osciloscópio.	62
Figura 38 – Conexões externas em 500 kV, do transformador elevador ao divisor capacitivo e deste até a bucha Ar/SF ₆ , interface para energização dos barramentos isolados em SF ₆	62
Figura 39 – Trecho de um oscilograma de abertura da chave seccionadora mostrando a sequência de reignições.	63
Figura 40 – Trecho de um oscilograma de fechamento da chave seccionadora mostrando a sequência de reignições.	64
Figura 41 - Oscilograma de uma reignição gravado com resolução de $1,0 \times 10^{-10}$ s.....	65

Figura 42 - Detalhe do início do transitório de uma reigição com identificação dos parâmetros definidos pela IEC 60071-1 (T_f , f_1 e f_2).....	65
Figura 43 – Caracterização dos parâmetros 1ºP+, 1ºP-, 2ºP+, 2ºP-, 3ºP+, 3ºP-, 4ºP+, 4ºP e Tot_Reig.	66
Figura 44 – Gráfico mostrando valores relativos das variáveis Tot_Reig, Vpp_max, Vp_max, Vpp_med, e Vp_med durante operação de abertura da chave seccionadora.	70
Figura 45 - Gráfico mostrando valores relativos das variáveis Tot_Reig, Vpp_max, Vp_max, Vpp_med, e Vp_med durante operação de fechamento da chave seccionadora.	70
Figura 46 – Distribuição de probabilidades para médias amostrais de Tot_Reig sem supressor e Tot_Reig com supressor S_Nano.	72
Figura 47 – Possibilidades de conclusão em um teste de hipóteses.....	73
Figura 48 – Diagrama de caixa, “ <i>Boxplot</i> ”, com indicação da forma em que são representadas as principais características da amostra.	74
Figura 49 – Gráfico com “ <i>P values</i> ” obtidos nos 30 testes de hipótese agrupados por variável e tipo de manobra.....	76
Figura 50 - Circuito ATPDraw para simulação da abertura da Chave Seccionadora, sem carga armazenada do lado do transformador	86
Figura 51 – Circuito ATPDraw para simulação da abertura da Chave Seccionadora, com carga armazenada do lado do transformador	87
Figura 52 – Circuito ATPDraw para simulação da injeção de impulso no modelo reduzido com cabos coaxiais	88
Figura 53 – Oscilograma na condição de montagem com modelo de transformador capacitivo “T_Cap”, sem supressor	89
Figura 54 – Oscilograma na condição de montagem com modelo de transformador capacitivo mais ramo RLC, “T_Cap+Ind”, sem supressor	90
Figura 55 – Oscilograma da tensão transitória gerada pelo chaveamento do gerador de pulsos repetitivos. Tempo de subida 1,14 nano-segundos.....	91
Figura 56 – Oscilograma na condição de cabos sem o transformador.....	92
Figura 57 – Oscilograma de 10 pulsos subsequentes na condição de montagem com Trafo “T_Cap” sem supressor, para verificação da repetibilidade	93
Figura 58 – Oscilograma de 10 pulsos subsequentes na condição A2-I-P1 com Trafo “T_Cap” para verificação da repetibilidade	94

Figura 59 – Oscilograma de 9 pulsos subsequentes na condição A1-I-P1 com Trafo “T_Cap” para verificação da repetibilidade	95
Figura 60 – Curvas de saturação dos núcleos toroidais	96
Figura 61 – Curvas de resposta em frequência dos toroides levantadas com o instrumento FRAnalyser	97
Figura 62 – Oscilogramas de resposta a impulso dos núcleos toroidais	98
Figura 63 – Oscilograma na condição A1-I-P1-T_Cap	99
Figura 64 – Oscilograma na condição A2-I-P1-T_Cap	100
Figura 65 – Oscilograma na condição A3-I-P1-T_Cap	101
Figura 66 – Oscilograma na condição A4-I-P1-T_Cap	102
Figura 67 – Oscilograma na condição A5-I-P1-T_Cap	103
Figura 68 – Oscilograma na condição A1-E-P1-T_Cap.....	104
Figura 69 – Oscilograma na condição A2- E-P1-T_Cap.....	105
Figura 70 – Oscilograma na condição A1-G-P1-T_Cap	106
Figura 71 – Oscilograma na condição A2-G-P1-T_Cap	107
Figura 72 – Oscilograma na condição A3-G-P1-T_Cap	108
Figura 73 – Oscilograma na condição A4-G-P1-T_Cap	109
Figura 74 – Oscilograma na condição A5-G-P1-T_Cap	110
Figura 75 – Oscilograma na condição A1-I-P2-T_Cap	111
Figura 76 – Oscilograma na condição A2-I-P2-T_Cap	112
Figura 77 – Oscilograma na condição A3-I-P2-T_Cap	113
Figura 78 – Oscilograma na condição A4-I-P2-T_Cap	114
Figura 79 – Oscilograma na condição A5-I-P2-T_Cap	115
Figura 80 – Oscilograma na condição A1-E-P2-T_Cap.....	116
Figura 81 – Oscilograma na condição A2-E-P2-T_Cap.....	117
Figura 82 – Oscilograma na condição A1-G-P2-T_Cap	118
Figura 83 – Oscilograma na condição A2-G-P2-T_Cap	119
Figura 84 – Oscilograma na condição A3-G-P2-T_Cap	120
Figura 85 – Oscilograma na condição A4-G-P2-T_Cap	121
Figura 86 – Oscilograma na condição A5-G-P2-T_Cap	122
Figura 87 – Oscilograma na condição A1-I-P3-T_Cap	123
Figura 88 – Oscilograma na condição A2-I-P3-T_Cap	124
Figura 89 – Oscilograma na condição A3-I-P3-T_Cap	125
Figura 90 – Oscilograma na condição A4-IP3-T_Cap	126

Figura 91 – Oscilograma na condição A5-I-P3-T_Cap	127
Figura 92 – Oscilograma na condição A1-E-P3-T_Cap.....	128
Figura 93 – Oscilograma na condição A2-E-P3-T_Cap.....	129
Figura 94 – Oscilograma na condição A1-G-P3-T_Cap	130
Figura 95 – Oscilograma na condição A2-G-P3-T_Cap	131
Figura 96 – Oscilograma na condição A3-G-P3-T_Cap	132
Figura 97 – Oscilograma na condição A4-G-P3-T_Cap	133
Figura 98 – Oscilograma na condição A5-G-P3-T_Cap	134
Figura 99 – Oscilograma na condição A1-I-P1-T_Cap+Ind.....	135
Figura 100 – Oscilograma na condição A2-I-P1-T_Cap+Ind.....	136
Figura 101 – Oscilograma na condição A3-I-P1-T_Cap+Ind.....	137
Figura 102 – Oscilograma na condição A4-I-P1-T_Cap+Ind.....	138
Figura 103 – Oscilograma na condição A5-I-P1-T_Cap+Ind.....	139
Figura 104 – Oscilograma na condição A1-E-P1-T_Cap+Ind.....	140
Figura 105 – Oscilograma na condição A2-E-P1-T_Cap+Ind.....	141
Figura 106 – Oscilograma na condição A1-G-P1-T_Cap+Ind	142
Figura 107 – Oscilograma na condição A2-G-P1-T_Cap+Ind	143
Figura 108 – Oscilograma na condição A3-G-P1-T_Cap+Ind	144
Figura 109 – Oscilograma na condição A4-G-P1-T_Cap+Ind	145
Figura 110 – Oscilograma na condição A5-G-P1-T_Cap+Ind	146
Figura 111 – Oscilograma na condição A1-I-P2-T_Cap+Ind.....	147
Figura 112 – Oscilograma na condição A2-I-P2-T_Cap+Ind.....	148
Figura 113 – Oscilograma na condição A3-I-P2-T_Cap+Ind.....	149
Figura 114 – Oscilograma na condição A4-I-P2-T_Cap+Ind.....	150
Figura 115 – Oscilograma na condição A5-I-P2-T_Cap+Ind.....	151
Figura 116 – Oscilograma na condição A1-E-P2-T_Cap+Ind.....	152
Figura 117 – Oscilograma na condição A2-E-P2-T_Cap+Ind.....	153
Figura 118 – Oscilograma na condição A1-G-P2-T_Cap+Ind	154
Figura 119 – Oscilograma na condição A2-G-P2-T_Cap+Ind	155
Figura 120 – Oscilograma na condição A3-G-P2-T_Cap+Ind	156
Figura 121 – Oscilograma na condição A4-G-P2-T_Cap+Ind	157
Figura 122 – Oscilograma na condição A5-G-P2-T_Cap+Ind	158
Figura 123 – Oscilograma na condição A1-I-P3-T_Cap+Ind.....	159
Figura 124 – Oscilograma na condição A2-I-P3-T_Cap+Ind.....	160

Figura 125 – Oscilograma na condição A3-I-P3-T_Cap+Ind	161
Figura 126 – Oscilograma na condição A4-I-P3-T_Cap+Ind	162
Figura 127 – Oscilograma na condição A5-I-P3-T_Cap+Ind	163
Figura 128 – Oscilograma na condição A1-E-P3-T_Cap+Ind.....	164
Figura 129 – Oscilograma na condição A2-E-P3-T_Cap+Ind.....	165
Figura 130 – Oscilograma na condição A1-G-P3-T_Cap+Ind	166
Figura 131 – Oscilograma na condição A2-G-P3-T_Cap+Ind	167
Figura 132 – Oscilograma na condição A3-G-P3-T_Cap+Ind	168
Figura 133 – Oscilograma na condição A4-G-P3-T_Cap+Ind	169
Figura 134 – Oscilograma na condição A5-G-P3-T_Cap+Ind	170
Figura 135 – Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab.	171
Figura 136 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	172
Figura 137 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	173
Figura 138 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	174
Figura 139 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	175
Figura 140 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	176
Figura 141 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	177
Figura 142 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	178
Figura 143 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	179
Figura 144 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	180
Figura 145 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	181
Figura 146 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	182
Figura 147 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	183
Figura 148 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	184
Figura 149 - Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab	185
Figura 150 – Diagrama Unifilar da SE Blindada Itaipu 50 Hz. Em detalhe no retângulo azul, o bay dos geradores 1 e 2, utilizado na modelagem (Figura 5)	187
Figura 151 – Diagrama Unifilar da SE Blindada Itaipu 60 Hz	187
Figura 152 – Dimensional do trecho da SE Blindada de Itaipu entre os disjuntores e o transformador	187
Figura 153 – Informações Técnicas Cabo RG-58 da Cabletech [®] , em detalhe a velocidade de propagação, 65 % da velocidade de propagação da luz	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de falhas em transformadores por VFTO.....	27
Tabela 2 - Soluções de Mitigação adotadas por empresas do SEP-Brasil.....	28
Tabela 3 – Relação dos cinco tipos de atenuadores utilizados com respectivas referências do fabricante, permeabilidade relativa e demais características.....	41
Tabela 4 – Valores de T_{PR} [%], (Equação 2), e T_{PRP} [%], (Equação 3), medidos no modelo reduzido.....	52
Tabela 5 – Características dos materiais magnéticos utilizados nos três tipos de supressores testados.....	58
Tabela 6 – Formas de onda aplicada ao sensor e Fatores de Escala obtidos.	60
Tabela 7 – Variáveis tabuladas das 30 manobras sem utilização de supressor.....	68
Tabela 8 – Variáveis tabuladas das 30 manobras com supressor S_190.	68
Tabela 9 - Variáveis tabuladas das 30 manobras com supressor S_Nano.	69
Tabela 10 - Variáveis tabuladas das 30 manobras com supressor S_139.....	69
Tabela 11 – Valores de “ <i>P value</i> ” obtidos nos 30 testes de hipótese realizados.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VFTO	“ <i>Very Fast Transient Overvoltages</i> ”.
VFFO	“ <i>Very Fast Front Overvoltage</i> ”.
IEC	“ <i>International Electrotechnical Commission</i> ”.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre.
CIGRÉ	“ <i>Conceil International des Grands Réseaux Électriques</i> ”.
p.u.	Por unidade.
ATPDraw TM	Pré-processador gráfico para o ATP da Bonneville Power Administration.
GIS	“ <i>Gas Insulated Switchgear</i> ”
ABB	Asea Brown Boveri.
IEEE	“ <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> ”.
ZnO	Óxido de Zinco.
COPEL	Companhia Paranaense de Energia.
S_139	Supressor toroidal de ferrite com material 139.
S_190	Supressor toroidal de ferrite com material 190.
S_Nano	Supressor toroidal de material magnético nanocristalino.
Vt_max	Máxima tensão no transformador.
Vc_max	Máxima tensão na chave seccionadora
Tot_Reig	Total de reignições em uma manobra.
Vpp_max	Maior tensão pico a pico em uma manobra.
Vp_max	Maior tensão de pico, positiva ou negativa, em uma manobra.
Vpp_med	Média das quatro maiores tensões pico a pico em uma manobra.
Vp_med	Média das quatro maiores tensões de pico em uma manobra.
Minitab®	Software de estatística desenvolvido pela Minitab Inc.

LISTA DE SÍMBOLOS

Z_s	Impedância de surto do barramento blindado.
μ	Eletromagnetismo, permeabilidade magnética;
μ	Estatística, média de uma população.
μ_0	Eletromagnetismo, permeabilidade magnética do vácuo;
μ_0	Estatística, média da população da hipótese H_0 .
μ_r	Eletromagnetismo, permeabilidade magnética relativa ao vácuo;
μ_1	Estatística, média da população da hipótese H_1 .
H_0	Hipótese “nula”, a que se pretende rejeitar em um teste de hipóteses.
H_1	Hipótese “alternativa” que se pretende comprovar em um teste de hipóteses.
\bar{X}	Média de uma amostra.
σ	Desvio padrão de uma população.
S	Desvio padrão de uma amostra.
N	Total de elementos de uma população.
n	Total de elementos de uma amostra.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTO.....	19
1.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
1.3	HIPÓTESE PARA SOLUÇÃO	24
1.4	ObjETIVOS.....	25
1.5	JUSTIFICATIVA.....	25
1.6	ESTRUTURA DA TESE	25
2	ESTADO DA ARTE	27
3	MODELAGEM.....	30
3.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	30
3.2	MODELO REDUZIDO.....	38
4	MEDIÇÕES EM UM TRECHO DE SE BLINDADA 500 kV	54
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE.....	85
	ANEXOS	186

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

As sobretensões transitórias muito rápidas, conhecidas do acrônimo em inglês VFTO, “*Very Fast Transient Overvoltages*” [1], ou ainda VFFO, “*Very Fast Front Overvoltage*” [2], tem sua caracterização pela IEC 60071-1 [2], como sendo surtos de tensão com tempo de subida menor que 100 ns e oscilações subsequentes com frequências até 300 kHz, conforme Figura 1, coluna da direita.

Classe	Baixa Frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Formas de tensão e sobretensão					
Faixas de tensão e sobretensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_t \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de tensão padronizadas					a
Teste de suportabilidade de tensão padronizado	a	Teste de frequência industrial de pequena duração	Teste de impulso de manobra	Teste de impulso de descarga atmosférica	a

^a A ser especificado pelo comitê do equipamento

Figura 1 – Caracterização de tensões transitórias.

Fonte: Traduzido da IEC 60071-1 [2].

As principais fontes destes transitórios no Sistema Elétrico de Potência (SEP) são as manobras de abertura e fechamento de seccionadoras e de disjuntores que têm como meio isolante na câmara de extinção o gás SF₆ (Hexafluoreto de Enxofre).

Devido à sua alta eletronegatividade e rigidez dielétrica ($89 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ [3]) o SF_6 consegue, sob determinadas condições, tanto a interrupção como reestabelecimento do arco elétrico em tempos inferiores a décimos de nanosegundos, dando assim origem a surtos de tensão com frentes muito íngremes, que de acordo com as capacitâncias e indutâncias adjacentes vão se propagar como ondas viajantes sujeitas a reflexões e atenuações ao longo do percurso.

Como fator de coordenação de isolamento, o “*TECHNICAL REPORT*” IEC TR 60071-4 [4], Figura 2, estima que o valor máximo destas sobretensões deva ficar abaixo dos valores das sobretensões de manobra.

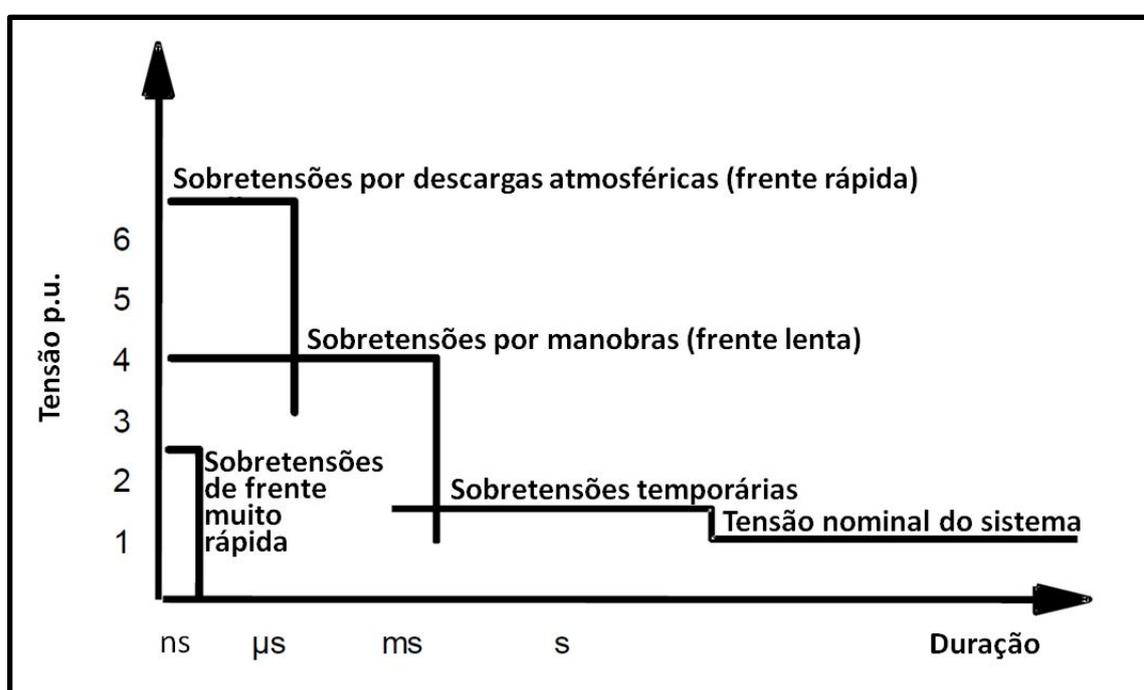


Figura 2 – Caracterização das sobretensões por valor de pico e duração.
Fonte: Traduzido da IEC TR 60071-4 [4].

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Com a utilização cada vez maior nos Sistemas Elétricos de Potência de disjuntores que tem como meio isolante em suas câmaras de extinção o gás SF_6 , assim como o emprego de subestações isoladas a SF_6 , em que além dos disjuntores também são utilizadas chaves seccionadoras que tem o SF_6 como meio de extinção do arco durante o seccionamento, estes transitórios estão cada vez mais fazendo parte do conjunto de solicitações que devem ser consideradas como críticas para a

determinação da vida útil do dielétrico dos equipamentos conectados próximos a estes disjuntores e chaves seccionadoras, principalmente transformadores.

No caso específico das chaves seccionadoras isoladas a SF₆, como o movimento dos contatos móveis é bem mais lento que o dos disjuntores, existe ainda o agravante de que em cada operação de abertura ou fechamento ocorrem várias reignições do arco dando origem a dezenas de solicitações em menos de dois ciclos da tensão na frequência industrial.

Esta sequência de reignições pode ser melhor compreendida através da análise conjunta das Figuras 3 e 4. No diagrama da Figura 3, estão representadas as tensões durante a abertura de uma chave seccionadora, sendo U_1 a tensão do lado da alimentação, U_2 a tensão do lado seccionado, e U_B a tensão de ignição do arco através do gap entre os contatos do seccionador. Ao iniciar o movimento de abertura da chave seccionadora, os contatos ainda estão próximos e a tensão U_B é baixa, propiciando uma série de reignições, sempre que o valor da diferença entre U_1 e U_2 for superior a U_B . Com o afastamento dos contatos, a tensão de reignição U_B aumenta, reduzindo as reignições, até que seu afastamento é suficiente para isolar a tensão $U_1 - U_2$

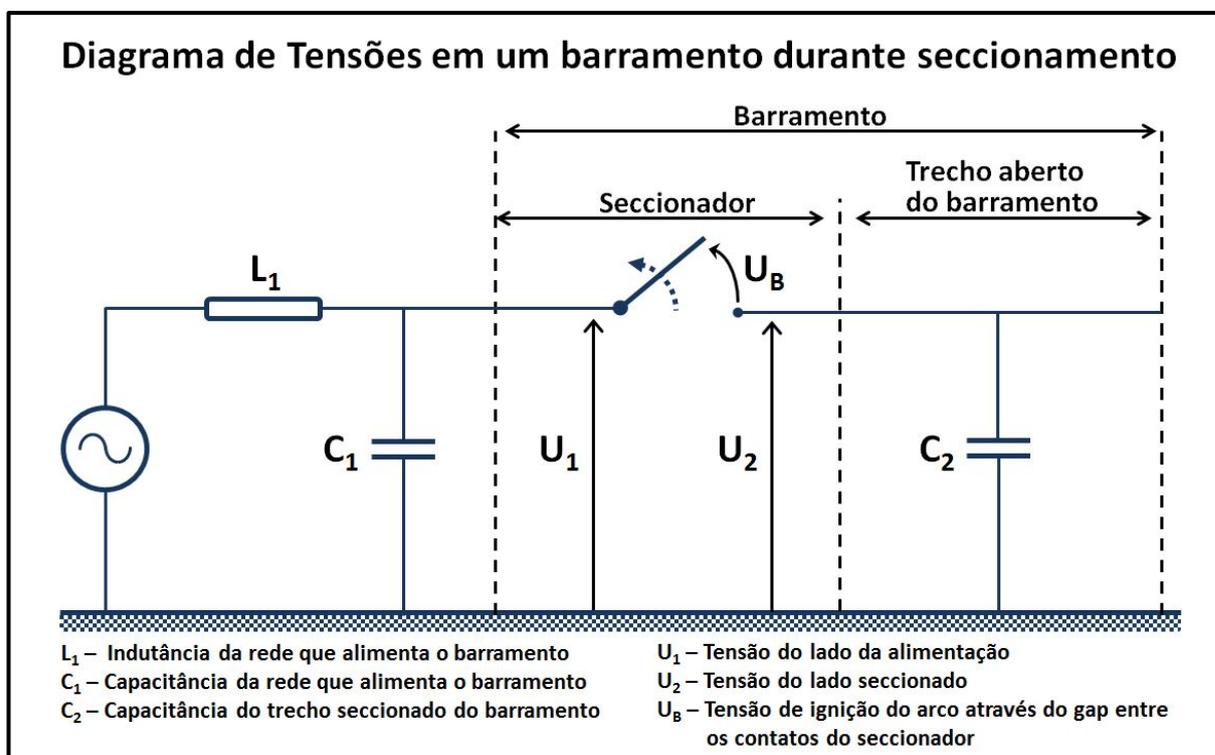


Figura 3 – Diagrama de Tensões em um barramento durante seccionamento

Fonte: O autor

Na Figura 4, Klaus Ragaller [5] mostra U_1 , U_2 e U_B em função do tempo, considerando t_0 o momento do início da separação dos contatos, e $t_0 + \Delta t$ o momento em que a separação atinge uma distância suficiente para isolar a tensão plena do sistema. Cada reignição que ocorre neste intervalo da origem a uma sobretensão transitória muito rápida.

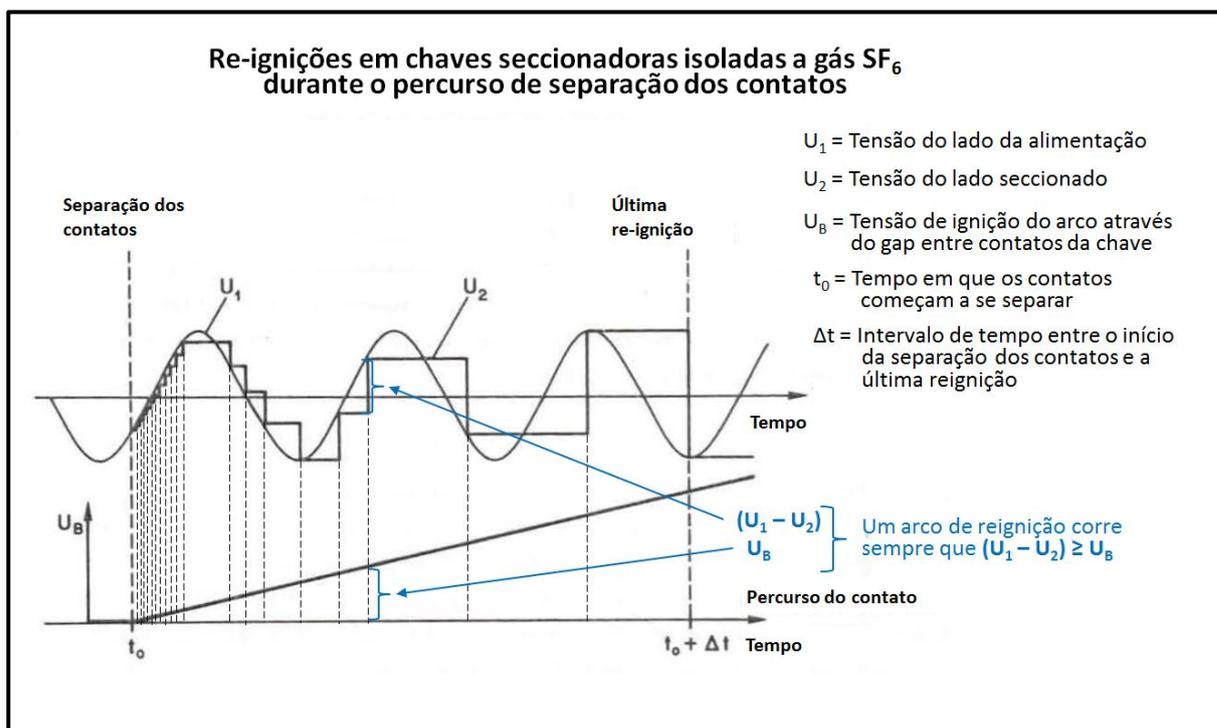


Figura 4 – Sequência de reignições durante a abertura de chave seccionadora.
Fonte: Adaptado de Klaus Ragaller [5].

Dos equipamentos instalados próximos aos disjuntores e chaves seccionadoras, os transformadores de potência [6] e [7] são os que mais vêm demonstrando terem seu dielétrico comprometido pelas repetidas solicitações impostas pelas sobretensões transitórias muito rápidas. A degradação e comprometimento do dielétrico são acelerados principalmente nos casos em que as sobretensões transitórias de frente muito rápida são capazes de excitar sobretensões ressonantes nos enrolamentos dos transformadores.

A curva de resposta em frequência mostrada na Figura 5 evidencia pontos de ressonância do enrolamento de alta, H1-H0, nos “Taps S 3/7”, onde para frequências acima de 100 kHz, a ressonância provoca o aparecimento de tensões da ordem de 60 vezes (100 kHz) a 180 vezes (400 kHz) a tensão normal de operação. Estas sobretensões embora de curta duração e baixa energia, superam em muito o valor do dielétrico utilizado, calculado para sobretensões de ordem de 6

pu, Figura 2, provocando acumulativamente a sua degradação, normalmente na forma de trilhamentos, até que ocorra o rompimento do isolamento sob tensão nominal.

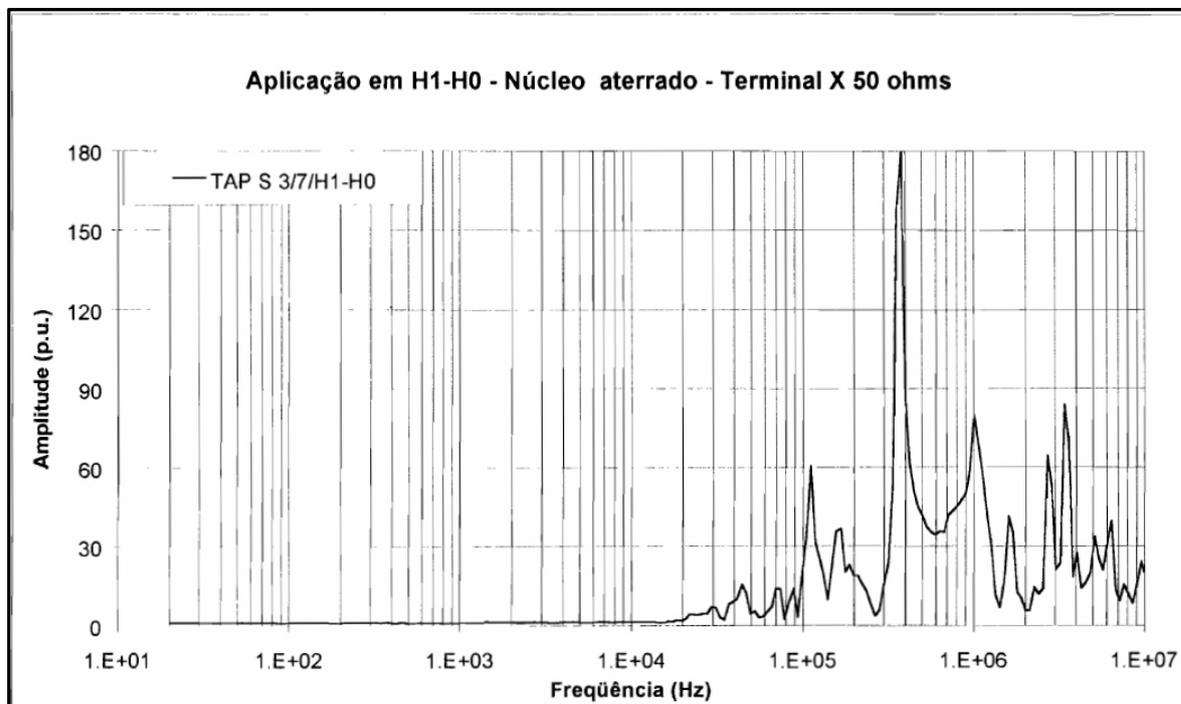


Figura 5 – Exemplo de Curva de Resposta em Frequência de um transformador de alta tensão mostrando ressonâncias e amplificação tensão em altas frequências.

Fonte: O autor - ensaios realizados pelo CEPEL.

Estudos recentes tanto em nível nacional realizado pelo “Grupo de Trabalho Conjunto JWG A2/C4-03” [6], CIGRÉ-Brasil, como em nível internacional, “Working Group A2/C4.39” [7], analisam o problema da interação entre transformadores e o sistema elétrico frente aos transitórios de alta frequência, apontando para a necessidade de adequações, por um lado, pelos fabricantes de transformadores, para um projeto compatível com estas solicitações, e de outro lado, pelos órgãos normatizadores, para o estabelecimento de parâmetros e limites que possam definir a compatibilidade dos equipamentos do sistema aos transitórios de frequência muito alta, assim como as procedimentos de ensaios para esta verificação.

Conforme apontado nos relatórios dos grupos do CIGRÉ [6] e [7], cada usuário vêm adotando soluções pontuais após falhas dos transformadores. Estas soluções podem ser a alteração da configuração do sistema para reduzir os níveis e quantidade de surtos por manobra ou a alteração do projeto do transformador para suportabilidade dos surtos sem que ocorram ressonâncias internas. Em ambos os

casos os custos são sempre muito elevados, pois envolvem o reposicionamento ou a substituição de equipamentos já em operação.

1.3 HIPÓTESE PARA SOLUÇÃO

Diante das dificuldades dos fabricantes dos equipamentos de manobra em eliminar a geração dos transitórios de frequência muito alta, assim como dos fabricantes de transformadores em oferecerem equipamentos a preços competitivos que suportem estes transitórios, e considerando ainda que os para-raios convencionais de ZnO não são capazes de drenar estes transitórios.

A proposta (*hipótese*) deste trabalho para solução é a inserção, entre o equipamento de manobra e o transformador, de um elemento passivo de baixo custo que atue como um “*Supressor de Transitórios de Alta Frequência*”, um filtro passa baixa, ou seja, de um elemento que apresente impedância desprezível na frequência industrial e que para frequências elevadas apresente impedância capaz de reduzir os transitórios a níveis compatíveis com a suportabilidade do transformador e dos demais equipamentos conectados.

O elemento passivo mais simples para atuar como filtro passa baixa é um indutor série. Porém a inserção de um indutor tradicional na forma circular formando uma bobina com múltiplas espiras junto a um disjuntor ou chave seccionadora de alta tensão, isolados a SF₆, precisaria de adaptações dimensionais para adequação do campo elétrico e estudos de suportabilidade de curto-circuito.

A proposta para se conseguir a funcionalidade de uma indutância sem a necessidade de implementar alterações dimensionais nos equipamentos é a utilização de toroides de material com alta permeabilidade magnética envolvendo o condutor de forma a aumentar a sua indutância por metro linear.

A existência no mercado de novos materiais magnéticos, tanto na linha de ferrites com adição de ligas metálicas como de materiais nanocristalinos (amorfo), com permeabilidades magnéticas relativas (μ_r) variando de 2.100 até 100.000, e a sua utilização já disseminada no uso de filtros de transitórios nas áreas de comunicação e eletrônica de potência, motivaram a proposta do estudo da utilização destes materiais para obtenção do aumento da indutância linear em trechos

específicos dos barramentos da uma subestação blindada a SF₆, sem a necessidade de alterações relevantes nos equipamentos em operação.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a análise e a caracterização das sobretensões transitórias muito rápidas, geradas a partir de manobras em disjuntores e chaves seccionadoras que tem como meio de extinção de arco o gás SF₆, e a sua potencial capacidade de degradar o isolamento de equipamentos, principalmente transformadores conectados próximos aos equipamentos de manobra.

Como objetivo específico o trabalho demonstra de forma teórica e prática a viabilidade de atenuar estas sobretensões para níveis compatíveis com o dielétrico dos equipamentos, através da inserção de componentes passivos interpostos entre o equipamento de manobra e o equipamento a ser protegido.

1.5 JUSTIFICATIVA

A proposta deste trabalho, de introduzir elementos passivos de baixo custo e fácil implementação, que atenuem as sobretensões transitórias de alta frequência, se justifica por oferecer uma solução eficiente e de rápida implementação, quando se configura no sistema a incompatibilidade de transitórios de manobra com a suportabilidade do dielétrico dos equipamentos instalados. Desta forma, evitando que alternativas mais caras e de longo tempo de implementação tenham que ser adotadas.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, referências, apêndice e anexo.

No primeiro capítulo é realizada a introdução com a contextualização, descrição do problema, hipótese para solução, e a descrição da estrutura de apresentação do trabalho.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte, relatando as principais ocorrências de falhas em transformadores do SEP do Brasil, e de outros países, assim como as opções que vêm sendo adotadas para mitigar o problema. Também no capítulo dois é apresentada a bibliografia que embasou o trabalho nas modelagens, nas medições em 500 kV e na opção pelos materiais magnéticos dos toroides.

No capítulo três são apresentados as metodologias e os resultados obtidos através da modelagem digital de um bay de transformador da SE blindada de Itaipu, assim como os resultados de medições realizadas em um modelo reduzido do mesmo bay.

No capítulo quatro são apresentados os resultados das medições obtidas em um trecho de subestação 500 kV isolada a gás, montado na sala de ensaios de alta tensão dos Institutos Lactec em Curitiba. O trecho montado, também reproduz um bay de transformador da SE blindada de Itaipu, sendo as sobretensões obtidas na forma real através da operação de uma chave seccionadora, com e sem o elemento indutivo passivo instalado no barramento blindado.

No capítulo cinco são apresentadas as conclusões, as recomendações e as sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

Mesmo existindo, desde a década de 1980, o conhecimento sobre as origens, as formas de propagação e demais características das sobretensões transitórias muito rápidas [5], [8] e [9], até o momento ainda não existe uma norma que parametrize e estabeleça critérios de teste e aceitação tanto para os elementos do SEP que dão origem a estes transitórios, como para os elementos que terão de suportá-las.

Um dos fatores de complexidade do tema reside no fato de que os elementos que são acoplados nas proximidades da origem dos transitórios podem assumir o papel de atenuadores ou de propagadores destas sobretensões. Tem-se a formação de um círculo vicioso em que o problema transcende às responsabilidades dos fabricantes dos equipamentos, e recai de alguma forma, aos projetistas dos sistemas. Mas estes por sua vez não têm parâmetros dos fabricantes para uma adequada simulação para validação dos projetos.

Na Tabela 1 tem-se o resumo das falhas em transformadores [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24] e [25], mostrando ocorrências no Brasil e exterior, atribuídas direta ou indiretamente às sobretensões transitórias de alta frequência, não significando, porém, serem estes valores absolutos, pois nem sempre as falhas em equipamentos, com suas causas prováveis, são divulgadas por seus responsáveis.

Tabela 1 – Exemplos de falhas em transformadores por VFTO.

Exemplos de falhas em transformadores relacionadas com sobretensões transitórias de alta frequência			
Brasil		Exterior	
Eletronorte (Tucuruí)	3	México	7
Copel (GBM)	3	UK	7
Chesf (C. Grande / L. Gonzaga)	3	USA	12
Cemig (S. Gotardo/Ipatinga/Três Marias)	5	Canada	2
Furnas (Grajaú)	6	Japão	2
CTEEP (Aparecida)	1		
Eletrosul (Siderópolis)	1		
Total	22		30

Fonte: O autor.

De maneira geral, depois de identificada a ocorrência de VFTO como causa maior para a falha, as providências comuns têm sido:

- 1) Recuperar os transformadores, introduzindo modificações nos enrolamentos buscando torna-los menos susceptíveis às sobretensões transitórias de alta frequência;
- 2) Alterar a configuração do sistema no entorno do transformador, buscando eliminar as condições de reflexões e propagação das sobretensões;
- 3) Limitar o número de manobras ou mesmo criar o impedimento de operação da chave seccionadora ou do disjuntor que está originando as sobretensões.

Tucuruí [10] adotou 1 e 3, com o impedimento da operação da chave seccionadora de bay de gerador enquanto houver tensão em um dos lados.

A Copel em GBM (Usina Governador Bento Munhoz – Foz do Areia) [11] também adotou 1 e 3, com restrições operativas na chaves seccionadoras da subestação blindada da usina e na SE de conexão com Furnas.

A Chesf na SE Campina Grande II [15] adotou 1 e 2, da mesma forma que a Cemig nas SE's São Gotardo, Ipatinga e da usina de Três Marias [6].

Furnas na SE Grajaú [13] adotou 1 e 3, e a Itaipu adotou 3, introduzindo a restrição operativa para a chave seccionadora do bay de máquina e realizou a substituição das buchas 500 kV SF₆/Óleo de todos os transformadores, por modelo de bucha com maior suportabilidade às sobretensões transitórias de alta frequência.

Na Tabela 2 tem-se o agrupamento destas alternativas adotadas de forma tabulada para melhor visualização.

Tabela 2 - Soluções de Mitigação adotadas por empresas do SEP-Brasil.

Soluções adotadas por empresas do SEP-Brasil para mitigar os efeitos das Sobretensões Transitórias Muito Rápidas em Transformadores			
Empresa	Solução		
	1 Modificar Trafo	2 Alterar Sistema	3 Limitar Manobras
Eletronorte (Tucuruí)	●		●
COPEL (Foz do Areia)	●		●
Furnas (Grajaú)	●		●
CHESF (Camp. Grande)	●	●	
CEMIG(S.Got/Ipat./Três Marias)	●	●	
Itaipu			●

Fonte: O autor.

Qualquer que seja a solução, ou conjunto de ações adotadas, o prejuízo causado pela perda de fornecimento de energia, e/ou os custos para reparar o transformador e/ou alterar as configurações do sistema, justificam investimentos no correto planejamento do sistema, na especificação, e na aquisição de equipamentos compatíveis com as solicitações.

Para embasamento teórico do trabalho, além da revisão bibliográfica sobre as falhas em transformadores devido às sobretensões transitórias de alta frequência, também foram pesquisadas as alternativas de modelos para os diversos componentes utilizados nas simulações computacionais. A principal referência é do “*IEEE Very Fast Transients Task Force*” [26], também cabendo citar as contribuições das referências [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34] e [35], conforme será visto no capítulo três.

Para a realização das medições no trecho de SE blindada de 500 kV, a referência adotada foi a IEC-TR-61321-1 [36], em conjunto com Boggs [37], Burch [38] e Meppelink [39], sendo também consultadas as referências [40], [41], [42], [43], [44], [45] e [46].

Para a escolha e dimensionamento dos materiais magnéticos dos toroides, foram consultados Fitzgerald [47] e Bozorth [48]. Também foram utilizados os catálogos e informações técnicas disponíveis nos sites [49] e [50], este último no Brasil, e cujo corpo técnico se habilitou a prestar importante apoio nas escolhas e fornecimento dos toroides utilizados.

Como considerações finais da revisão do estado da arte têm-se:

- 1) As sobretensões transitórias muito rápidas já são conhecidas e bem estudadas quanto a sua origem e forma de propagação;
- 2) Existem relacionamentos diretos atribuindo à sua ocorrência como a causa da falha em transformadores para determinadas instalações;
- 3) Não existem nas normas de fabricação dos equipamentos de manobra, ou de transformadores, quesitos de testes para a verificação quanto à sua ocorrência ou suportabilidade;
- 4) Uma vez identificada a incompatibilidade da sua ocorrência, quer seja em intensidade ou em quantidade, com o dielétrico de transformadores, as soluções adotadas tem sido alterar o isolamento dos transformadores, e/ou alterar a configuração da instalação, e/ou limitar manobras no equipamento que está dando origem às sobretensões.

3 MODELAGEM

3.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para modelagem computacional foi escolhido o trecho de 50 metros da subestação blindada 500 kV de Itaipu compreendido entre o bay de disjuntores de máquinas e o transformador elevador, destacado dentro do tracejado vermelho na Figura 6. Nas Figuras 149, 150 e 151 do anexo tem-se os diagramas unifilares e o dimensional completos da SE-60 Hz e da SE-50 Hz, destacado dentro do retângulo azul da Figura 149 o bay dos geradores 1 e 2, mostrado na Figura 5.

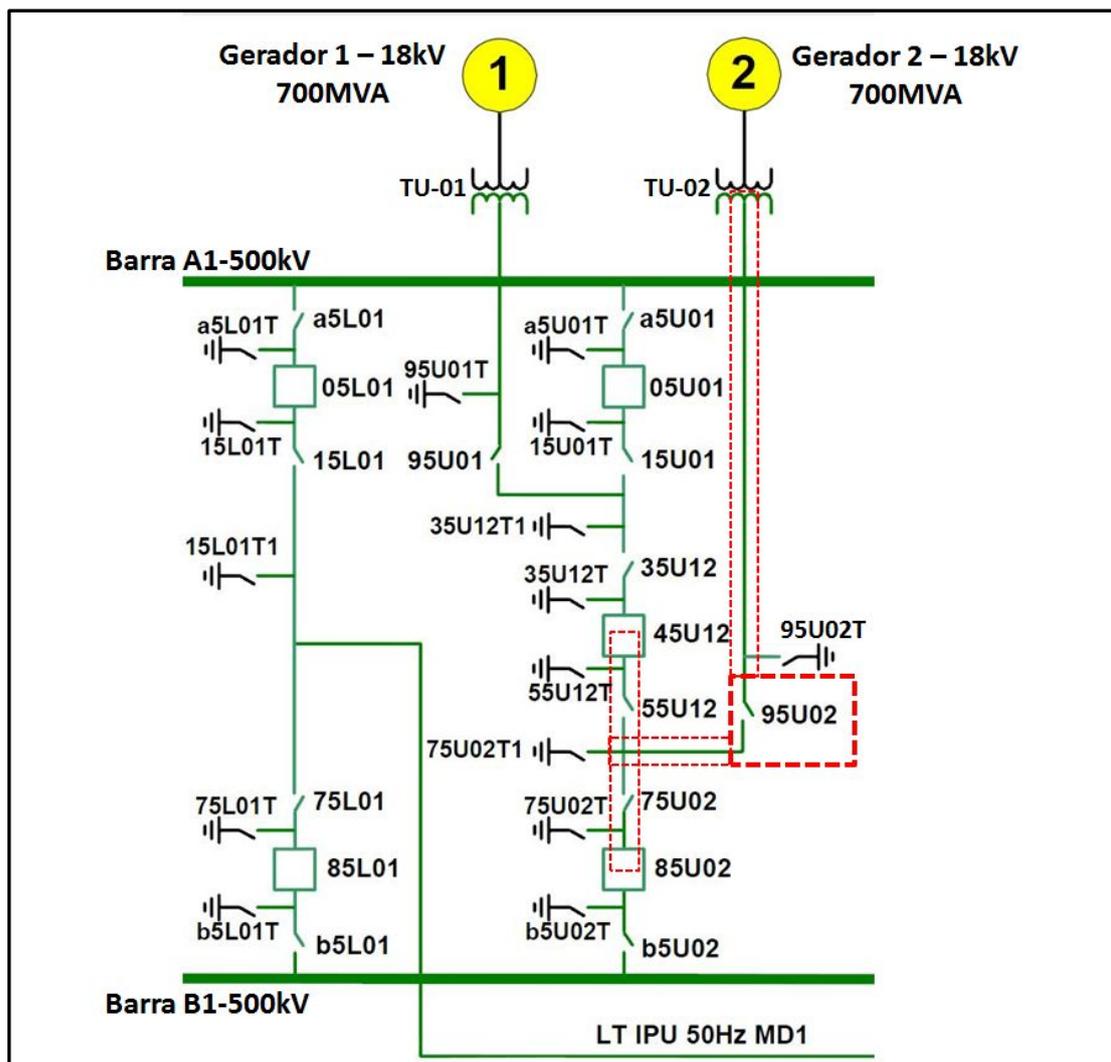


Figura 6 – Diagrama unifilar do bay dos geradores 1 e 2 de Itaipu (dentro do tracejado vermelho, o trecho modelado).

Fonte: Adaptado de Itaipu – Diagrama 6002-DU-18076-P R46.

A escolha deste trecho se fundamenta no histórico das chaves seccionadoras de máquina de Itaipu, em destaque na Figura 5 a chave 95U02. Estas 20 chaves, 95Uxx (xx de 01 a 09 e 9A) no lado de 50 Hz, e 96Uyy (yy de 11 a 18 e 8A) no lado de 60 Hz, após início de operação tiveram uma restrição operativa implementada devido a ocorrência de falhas.

A restrição implementada por Itaipu intertrava a liberação para operação destas chaves com o sistema de freio da máquina atuado. Assim fica garantido que na sequência de partida da unidade geradora a chave somente seja operada com a unidade parada e, na sequência inversa, para retirada da unidade geradora do sistema, a chave somente seja operada após a atuação do sistema de freios da unidade, o que ocorre quando a rotação do gerador está abaixo de 15% da rotação nominal e já sem corrente de excitação.

Na Figura 7, é mostrada uma vista em corte a disposição física dos equipamentos do trecho modelado.

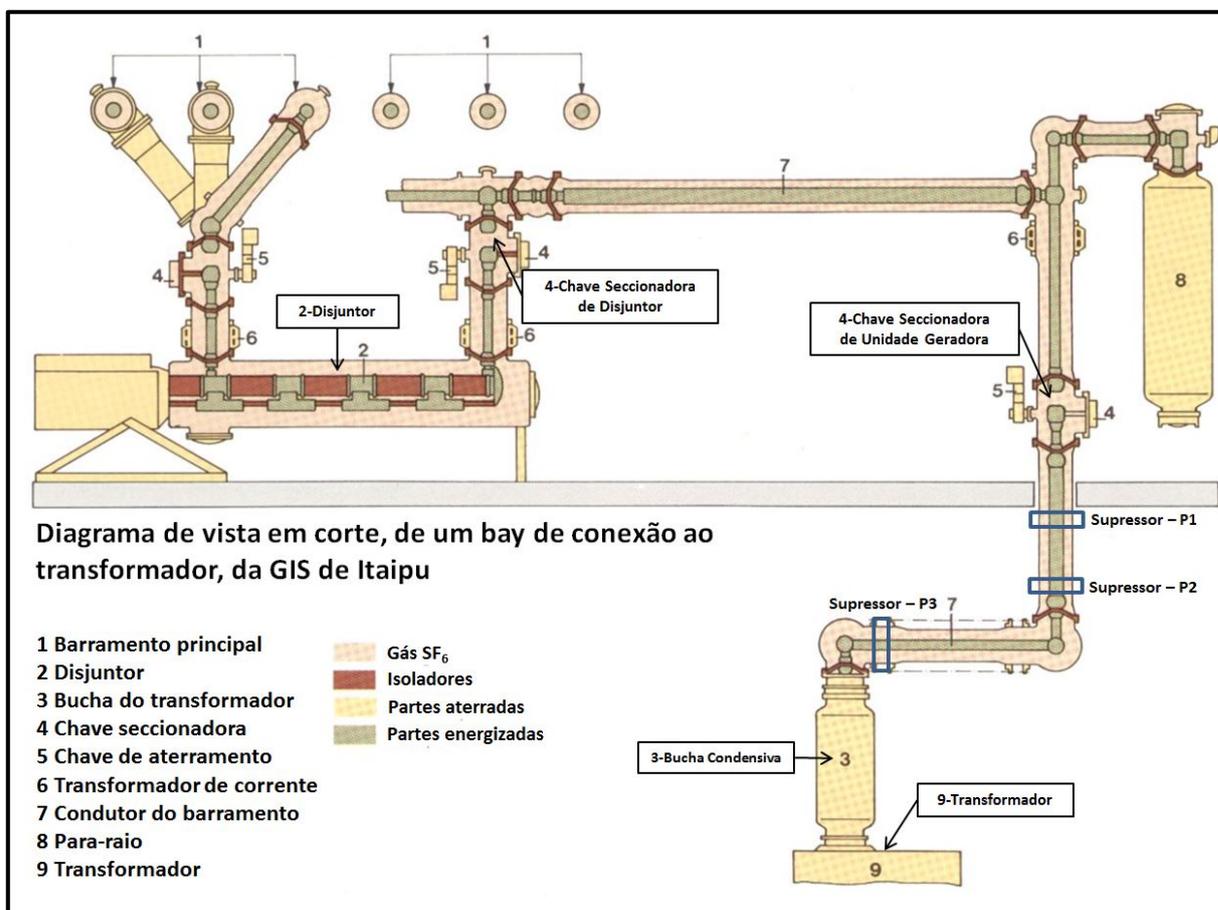


Figura 7 – Vista em corte do trecho da subestação blindada ABB-ELK 3. Detalhe da posição do disjuntor, da chave seccionadora, do transformador e das três posições sugeridas para instalação dos supressores de transitórios.

Fonte: Adaptado da publicação ABB No. CH-HS 1114 87 E

Na Figura 7 também estão identificadas as três posições que fisicamente são mais compatíveis para uma futura instalação de supressores.

Do desenho dimensional 6380-DF-76018, Figura 152 do Anexo, foram retiradas as distâncias para a modelagem. O ponto P1 fica 4,69 metros abaixo da Chave Seccionadora da Unidade Geradora, P2 fica 7,53 metros abaixo de P1, ainda no trecho vertical alinhado com a Seccionadora, e P3 fica no trecho horizontal do barramento, 4,65 metros depois de P2 e 1,79 metros antes da bucha condensiva SF₆/Óleo do enrolamento de 500 kV do transformador elevador da unidade geradora.

Também foram representados, por modelos descritos a seguir, os trechos de barramento nos seus respectivos comprimentos, o disjuntor na condição aberto, os isoladores suporte de barramento, a chave seccionadora e o transformador.

O barramento blindado em SF₆ é constituído por dois elementos cilíndricos concêntricos, onde o interno, de cobre ou alumínio, é o elemento condutor, que vai ao potencial, enquanto o elemento externo tem a função de invólucro, sendo normalmente de alumínio ou aço, é aterrado e tem por função dar estanqueidade ao gás que vai internamente sob pressão.

No caso da subestação de Itaipu, modelo ELK-3 da ABB-Suíça as dimensões de referência estão mostradas na Figura 8, sendo 186 mm o diâmetro externo do condutor, e 500 mm o diâmetro interno do invólucro, contendo SF₆ sob uma pressão de 480 kPa.

Segundo Ragaller [5], a impedância de surto para esta configuração de dois cilindros concêntricos é dada por:

$$Z_s = 60 * \ln \left(\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Ou seja, para as dimensões da Figura 7, o valor da impedância de surto, Z_s, é de 59,3 Ω.

Cada trecho do barramento será então representado no modelo computacional da ferramenta ATPDraw como um trecho de linha com o comprimento próprio e a impedância de surto Z_s acima definida.

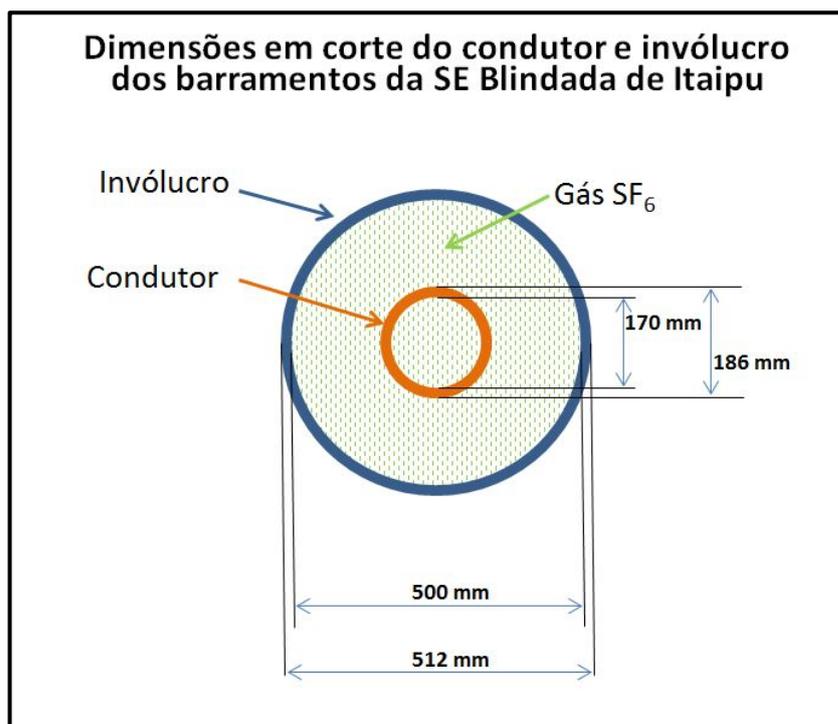


Figura 8 – Dimensões de referência do “condutor” e “invólucro” para SE-Blindada ABB-ELK3.

Para o modelo do disjuntor na condição aberto será utilizado o mesmo modelo do estudo de sobretensões realizado em conjunto por Furnas Centrais Elétricas e Itaipu em 1986 [28], Figura 9, consistindo dos valores de capacitância condutor invólucro (C_1 , C_2) e da capacitância série equivalente (C) dos capacitores de equalização das quatro câmaras de interrupção. O modelo de disjuntor utilizado na SE-Blindada de Itaipu é o ABB-ELK-SH3141, que possui quatro câmaras de extinção associadas em série, existindo entre cada câmara dois capacitores de 1200 pF em paralelo.

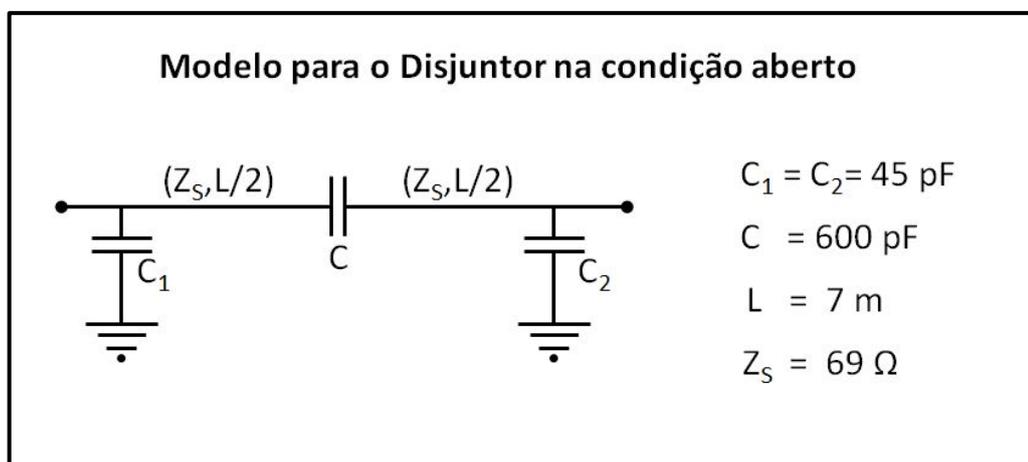


Figura 9 – Modelo da representação no ATPDraw para disjuntor aberto.
Fonte: Adaptado de [28].

Para representar os isoladores suporte dos trechos retos dos barramentos, também como utilizado no estudo Furnas/Itaipu de 1986 [28], foi utilizado o valor de uma capacitância de 20 pF.

Cabe observar que estes modelos são os mesmos ainda hoje utilizados na maioria das simulações no SEP (Sistema Elétrico de Potência) e pelo próprio fabricante, ABB-Suíça.

Para modelagem da ignição do arco em uma chave seccionadora, na condição “fechando” foi utilizado o modelo proposto por Ragaller [5] e “IEEE-Very Fast Transients Task Force” [26], mostrado na Figura 10. Neste é usada uma chave associada em série com resistores para representar a variação da resistência do arco no SF₆, sendo que $R=0,5\Omega$ representa o valor final da resistência do arco, e r representa o valor variável durante a ignição do arco conforme Equação 2:

$$r = 10^{12} \times e^{(-t/\tau)} \Omega \quad (\text{Equação 2})$$

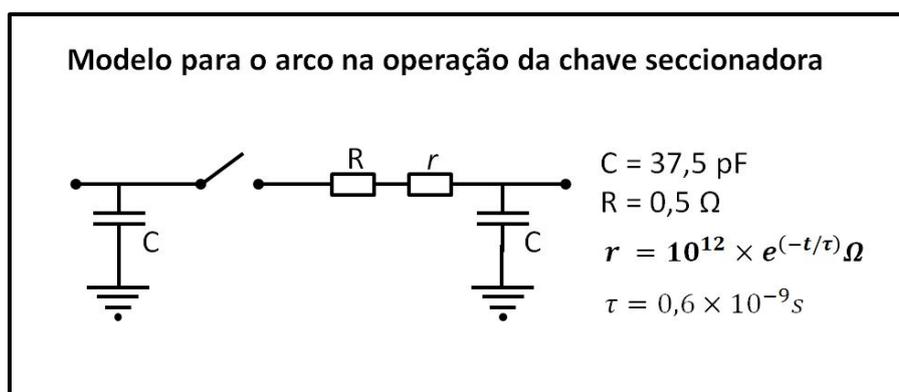


Figura 10 – Modelo para representar o arco durante a operação da chave seccionadora
Fonte: Adaptado de [5] e [26]

Para modelagem da chave seccionadora na condição fechada foi utilizado o modelo do estudo Furnas/Itaipu de 1986 [28], Figura 11, também coerente com as demais referências.

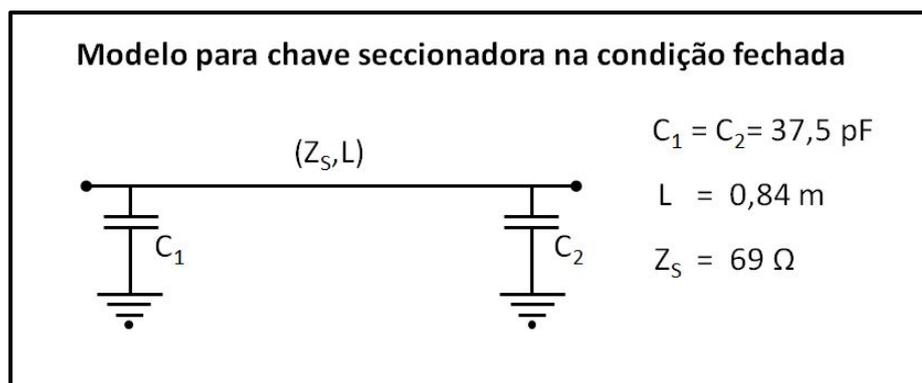


Figura 11 – Modelo para chave seccionadora fechada.
Fonte: Adaptado de [28].

Finalmente para o transformador foi utilizado um modelo contemplando a capacitância da bucha condensiva SF₆/Óleo ($C_B = 400$ pF), associada a um circuito RLC série para os enrolamentos, conforme Figura 12, também proposto pela “IEEE-*Very Fast Transients Task Force*” [26], e o mais utilizado por fabricantes na atualidade.

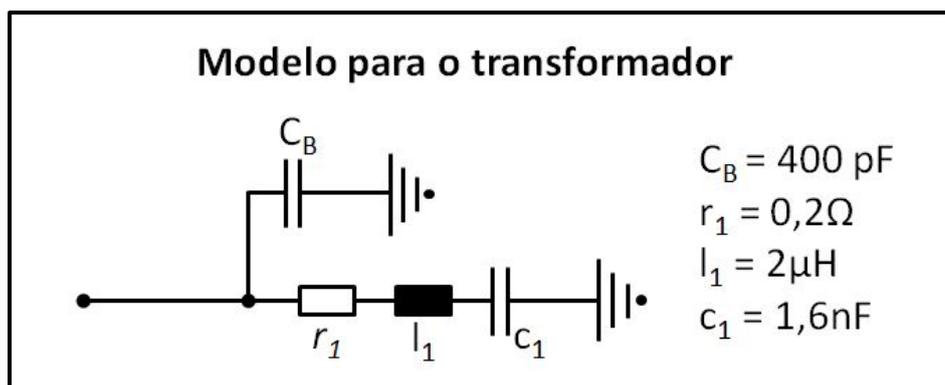


Figura 12 – Modelo para o transformador
 Fonte: adaptado de [26]

Utilizando a ferramenta de modelagem computacional ATPDrawTM, os elementos das figuras foram simulados para obter os oscilogramas das variações de tensão no transformador durante o fechamento da chave seccionadora. A seguir foram simuladas as mesmas condições, porém com a inserção de uma indutância de $5\mu\text{H}$ nas posições P1, P2 e P3 propostas, conforme circuito ATPDrawTM da Figura 49 do apêndice. Os resultados estão mostrados na Figura 13, onde se observa uma redução para 50% no valor da sobretensão com o uso dos supressores.

Observa-se também que para posições mais próximas a chave seccionadora o efeito da atenuação é mais eficiente. Em P1 a atenuação é maior que em P2 que por sua vez é maior que em P3.

Como na sucessão de reignições durante a abertura ou fechamento da chave pode ocorrer a reignição sobre uma carga residual do lado do transformador, foram também simulados os casos para uma carga armazenada para a pior hipótese, ou seja, uma carga residual de -1 p.u., circuito ATPDrawTM da Figura 51 do apêndice.

Observa-se, na Figura 14, que o efeito da carga armazenada faz a sobretensão sem supressor se elevar de um patamar de 750 kV para um patamar de 1100 kV, enquanto o efeito dos supressores mantém a redução para 50% .

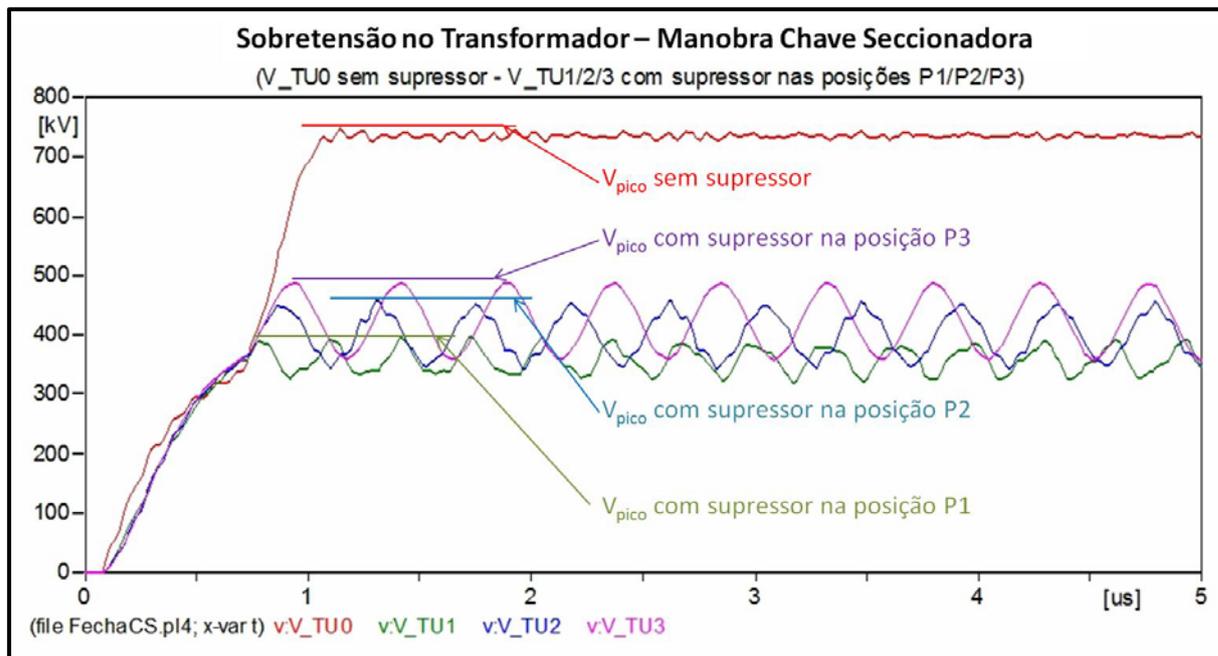


Figura 13 – Oscilograma da simulação comparativa da sobretensão de manobra da chave seccionadora com e sem o uso de supressores.

Fonte: o autor.

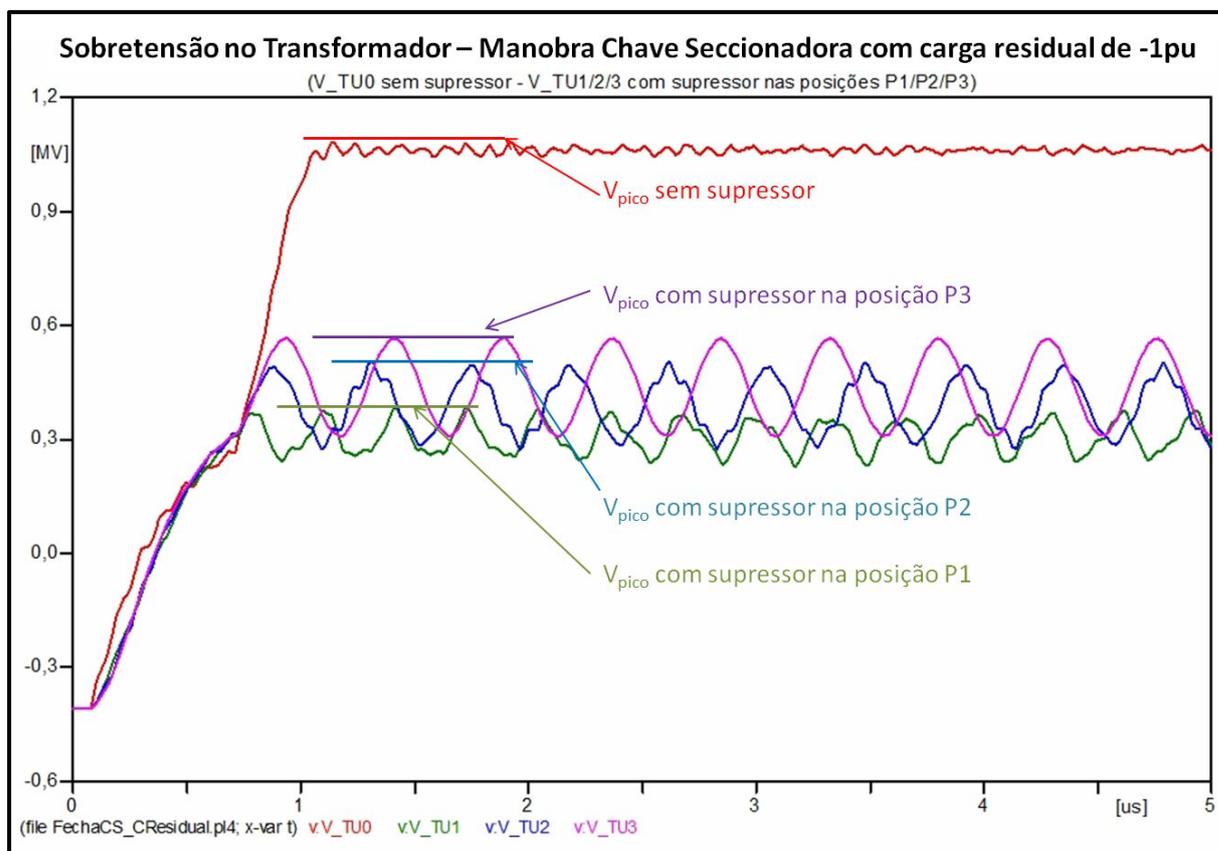


Figura 14 – Oscilograma da simulação comparativa da sobretensão de manobra da chave seccionadora, com carga residual de -1 p.u., com e sem o uso de supressores.

Fonte: o autor.

A seguir foi também realizada a simulação computacional para a injeção direta de um impulso na Chave seccionadora de Máquina, circuito ATPDrawTM da Figura 52 do apêndice.

Para esta simulação foi utilizado um circuito equivalente ao do modelo reduzido que será visto em 2.2, e um impulso também com características semelhantes ao obtido no modelo reduzido, tempo de subida de 1,14 ns por 50 ns de tempo até meia cauda.

Os resultados obtidos estão mostrados no oscilograma da Figura 15, onde também fica caracterizada a viabilidade dos supressores, apresentando uma atenuação similar às obtidas nos modelos simulados com todos os elementos do bay de máquina da subestação blindada.

De forma análoga, nesta simulação do modelo reduzido se observa a maior eficiência quando da instalação do supressor na posição P1 em relação à posição P2 e desta sobre a posição P3.

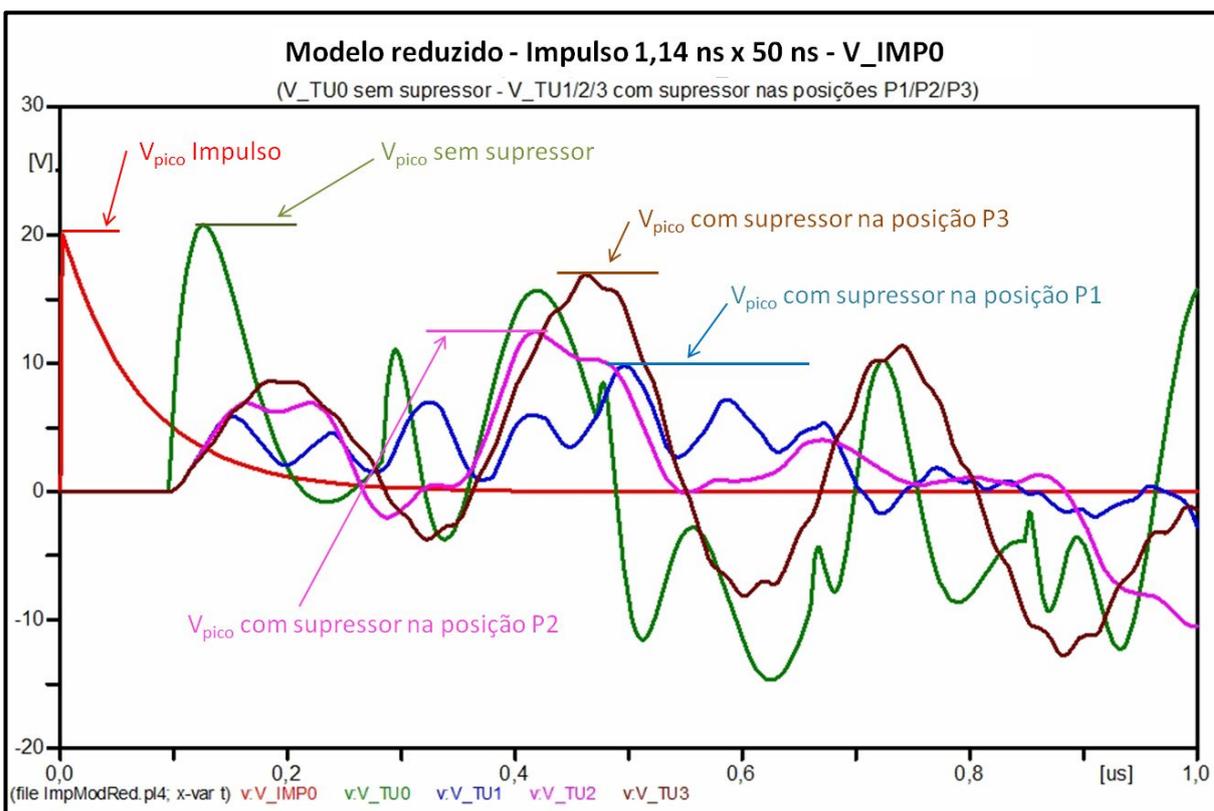


Figura 15 – Simulação da injeção de impulso, 1,14 x 50 ns, partindo da chave seccionadora em direção ao transformador.

Fonte: o autor.

3.2 MODELO REDUZIDO

O modelo reduzido apresentado a seguir tem por objetivo principal validar o comportamento dos materiais magnéticos disponíveis no mercado frente às solicitações de frequências dos transitórios de manobra em SF₆, que são da ordem de gigahertz (10⁹ Hz), enquanto estes materiais são normalmente utilizados para fins de eletrônica de potência e telecomunicação, com frequências na ordem de megahertz (10⁶ Hertz).

Os materiais magnéticos podem ser caracterizados pela sua principal propriedade, a permeabilidade magnética, “ μ ”. Normalmente ao invés de se trabalhar com o valor absoluto do valor da permeabilidade magnética “ μ ”, utiliza-se o valor relativo, “ μ_r ”, que representa a relação com a permeabilidade magnética do vácuo, “ μ_0 ”, cujo valor é $4\pi \times 10^{-7} H/m$.

Para aplicações de um material magnético em circuitos com corrente alternada, além do valor da permeabilidade magnética, também tem que ser considerada a perda pela circulação de correntes induzidas no próprio corpo do elemento magnético, as correntes de “*Foucault*”.

O valor da permeabilidade magnética dos materiais está sujeito a variações, normalmente no sentido de uma redução de valor, caso a aplicação se dê em faixas de densidade de fluxo magnético, frequência ou temperatura, fora dos limites característicos de cada material. Exemplos destas variações estão mostrados nos gráficos da Figura 16, para permeabilidade versus frequência do material em liga metálica “F60” (Fe/Si); e de permeabilidade versus frequência para o material o ferrite “MMT139” (Fe/Mn/Zn) na Figura 17. Observa-se que para o ferrite “MMT139” a permeabilidade se mantém estável até a faixa de megahertz, enquanto para a liga “F60” existe a redução da permeabilidade para altas frequências.

No gráfico da Figura 18 está o comportamento da permeabilidade em função da temperatura para o ferrite “MMT139”. No gráfico da Figura 19 estão os valores de perdas em mW/cm³ em função da frequência e da densidade de fluxo magnético para o material “F60”.

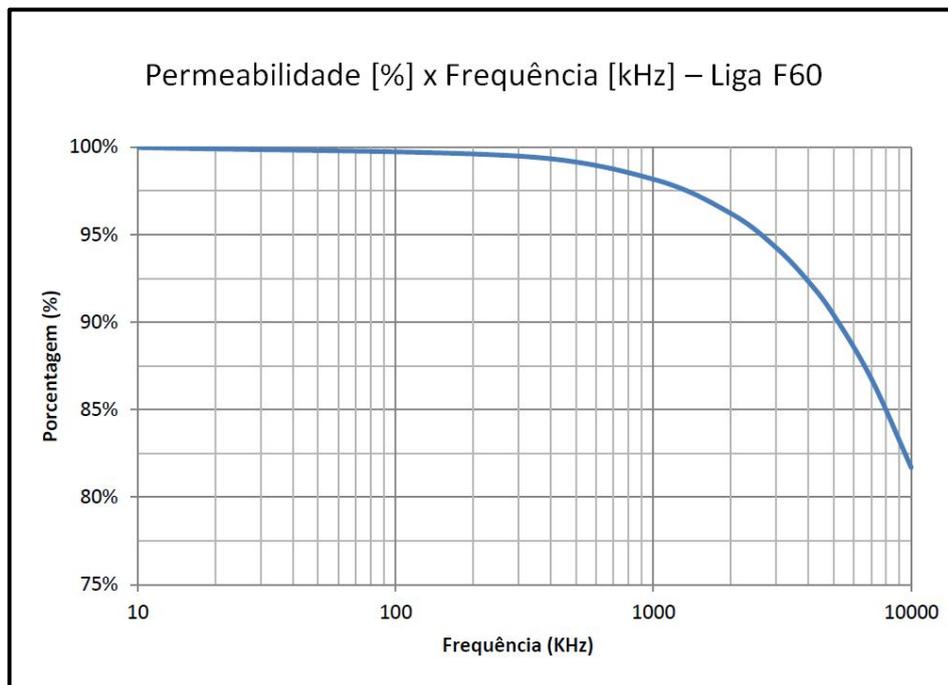


Figura 16 – Permeabilidade magnética versus frequência para liga metálica F60. Fonte: Magmattec [50].

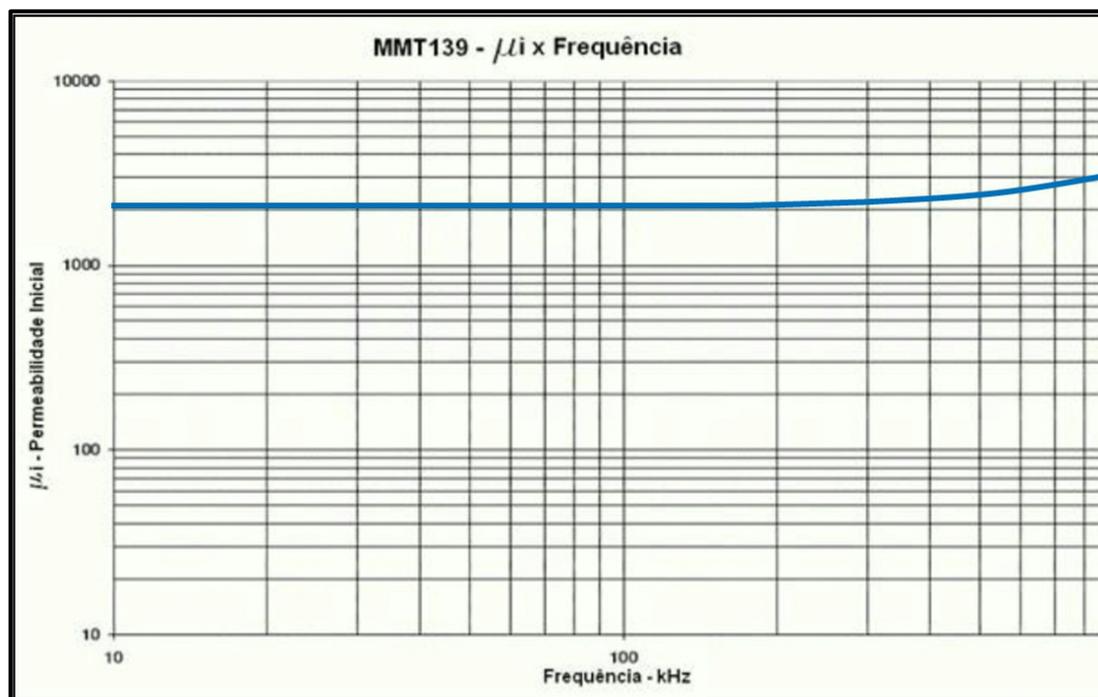


Figura 17 – Permeabilidade magnética versus frequência para o ferrite MMT139. Fonte: Magmattec [50].

Os materiais magnéticos com maior aplicação na área eletroeletrônica são os aços-silício de grão orientado e os ferrites. Os aços-silício disponíveis no mercado

apresentam permeabilidade relativa na faixa de 16000 a 23000, enquanto os ferrites estão na faixa de 2000 a 10000.

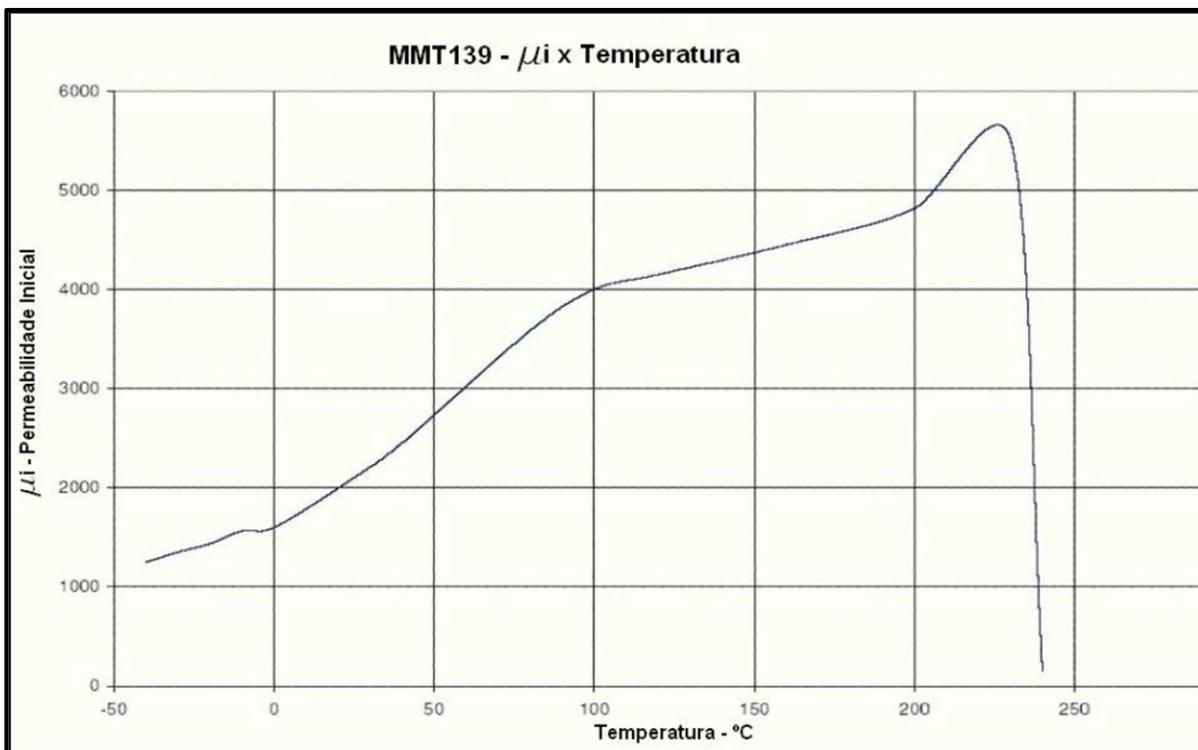


Figura 18 – Permeabilidade relativa versus temperatura para o ferrite MMT139.
Fonte: Magmattec [50].

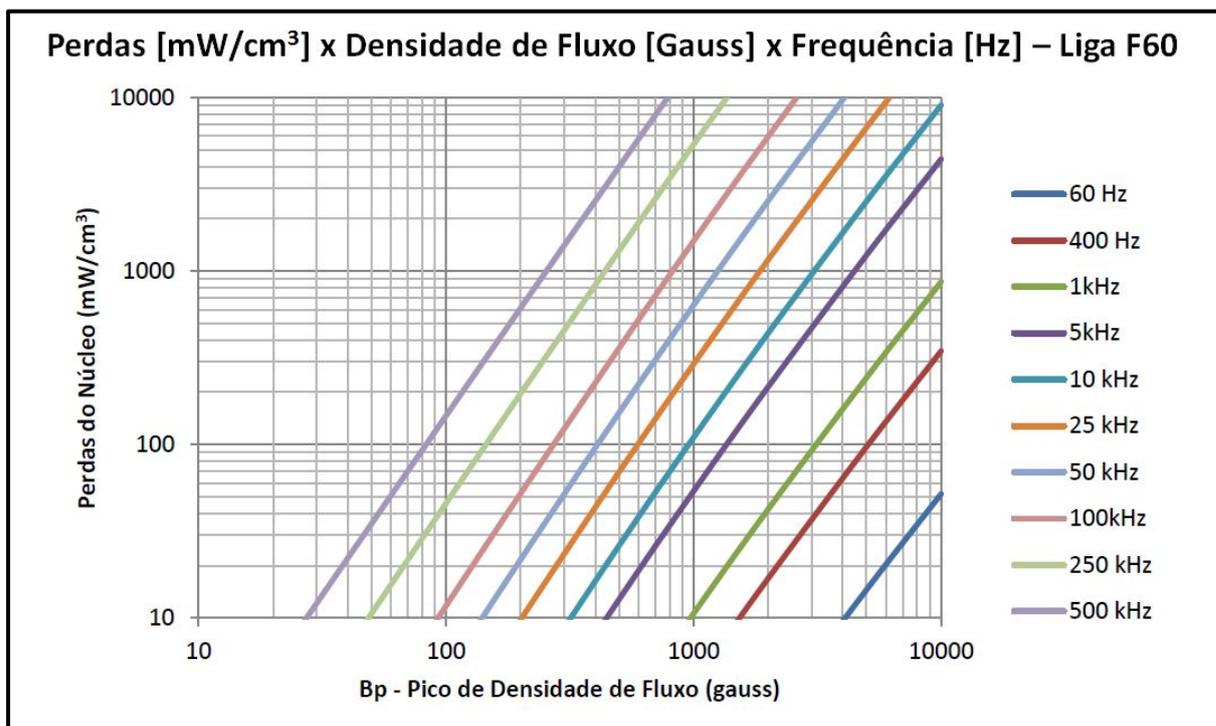


Figura 19 – Perdas versus densidade de fluxo versus frequência para liga F60.
Fonte: Magmattec [50].

Para utilização de um material magnético no formato de um toroide, envolvendo um trecho do barramento blindado, foi descartado o uso do aço-silício pelo fato de ter uma permeabilidade menor em altas frequências, e pelo fato de apresentar maior perda por circulação de correntes induzidas.

A pesquisa por toroides de materiais de alta permeabilidade magnética levou a um fornecedor brasileiro “Magmattec” [50], com disponibilidade para o fornecimento dos diversos elementos magnéticos de interesse, tanto na classe de ferrites como de material nanocristalino (metal amorfo).

A Tabela 3 mostra a relação dos cinco tipos de toroides escolhidos para serem testados como supressores de surtos, com as suas características dimensionais e referências do fabricante. Os materiais dos atenuadores A1, A3, A4 e A5 são ferrites com adição de diferentes ligas metálicas enquanto o atenuador A2 é fabricado com material nanocristalino.

Tabela 3 – Relação dos cinco tipos de atenuadores utilizados com respectivas referências do fabricante, permeabilidade relativa e demais características.

Atenuador	Ref. Fabricante	Permeabilidade magnética (μ_r)	Dimensões por toroide [mm]				μH por Toroide	Nº de Toroides	μH Total
			Φ_{ext}	Φ_{int}	h	S[mm ²]			
A1	MMT140T1006	2.300	10,0	5,5	4,5	10,1	1,4	4	5,6
A2	MMT520T1713	100.000	16,0	10,5	12,0	33,0	50	3	150
A3	MMT110T1306	10.000	12,7	7,95	6,35	15,1	5,5	3	16,5
A4	MMT110T1608	10.000	16,0	9,6	8,0	25,6	7,35	3	22,05
A5	MMT139T1608	2.100	16,0	9,6	8,0	25,6	1,7	3	5,1

Fonte: Adaptado de Magmattec [50].

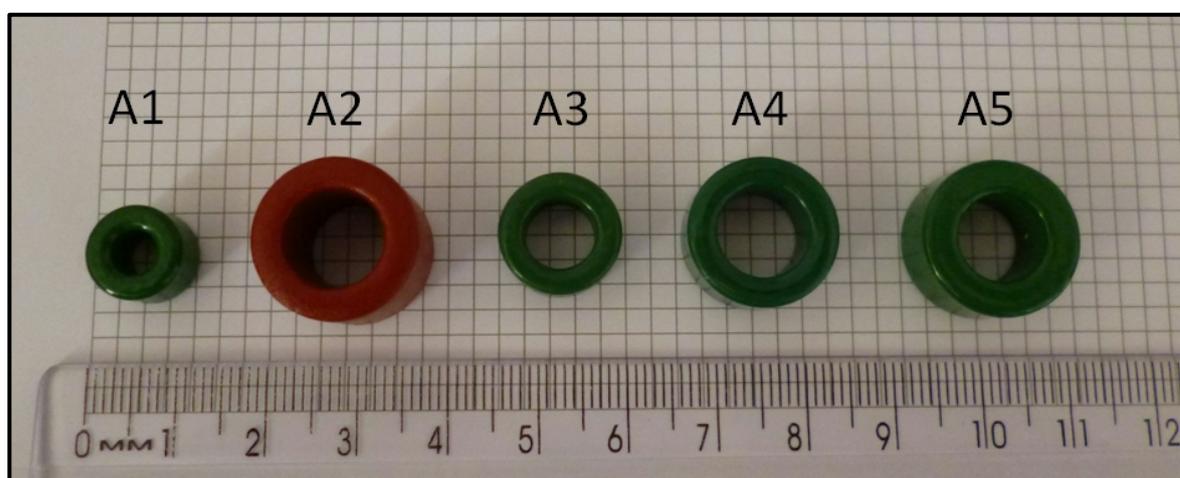


Figura 20 – Vista dos cinco tipos de toroides utilizados para montagem dos atenuadores.
Fonte: O autor.

A Figura 20 mostra em detalhe os cinco tipos de toroides que foram utilizados para montagem dos atenuadores no modelo reduzido. Cabe observar que conforme coluna “Nº de Toroides” da Tabela 3, em cada atenuador foram utilizados conjuntos de três ou quatro toroides do mesmo tipo.

Para montagem do modelo reduzido, utilizou-se cabo coaxial do tipo RG-58, com impedância de surto de 50Ω (dados fabricante na Figura 152 do Anexo), nos mesmos comprimentos que os trechos da subestação entre a chave seccionadora e o transformador.

Da mesma forma que na modelagem computacional, na montagem do modelo com elementos reduzidos foram consideradas as alternativas de instalação dos supressores em três posições, indicadas como P1, P2 e P3 na Figura 7.

Observando ainda as Figuras 7 e 8, tem-se como alternativas de montagem em relação aos diâmetros do condutor e do invólucro, instalar os toroides sobre a superfície externa do cilindro interno, condutor, ficando o supressor próximo ao potencial de fase e dentro do ambiente pressurizado com SF₆, ou instalar os toroides sobre a superfície externa do cilindro externo, invólucro, ficando o supressor próximo ao potencial de terra.

Para esta última opção, montagem externa ao invólucro, existem ainda duas alternativas a se considerar, uma com interrupção da continuidade elétrica do invólucro e outra sem interrupção da continuidade elétrica do invólucro.

Desta forma são três as opções de montagem dos supressores quanto ao diâmetro, que ficaram como a seguir nos elementos reduzidos:

- 1) Montagem externa ao cilindro interno (condutor), mas permanecendo interna ao cilindro externo (invólucro), Figura 21;
- 2) Montagem externa ao cilindro externo (invólucro), sem interrupção da continuidade do cilindro externo, Figura 22;
- 3) Montagem externa ao cilindro externo (invólucro), como em 2), porém com interrupção da continuidade do cilindro externo, e montagem de links de condutores sobre os toroides para dar continuidade ao cilindro externo, Figura 23.

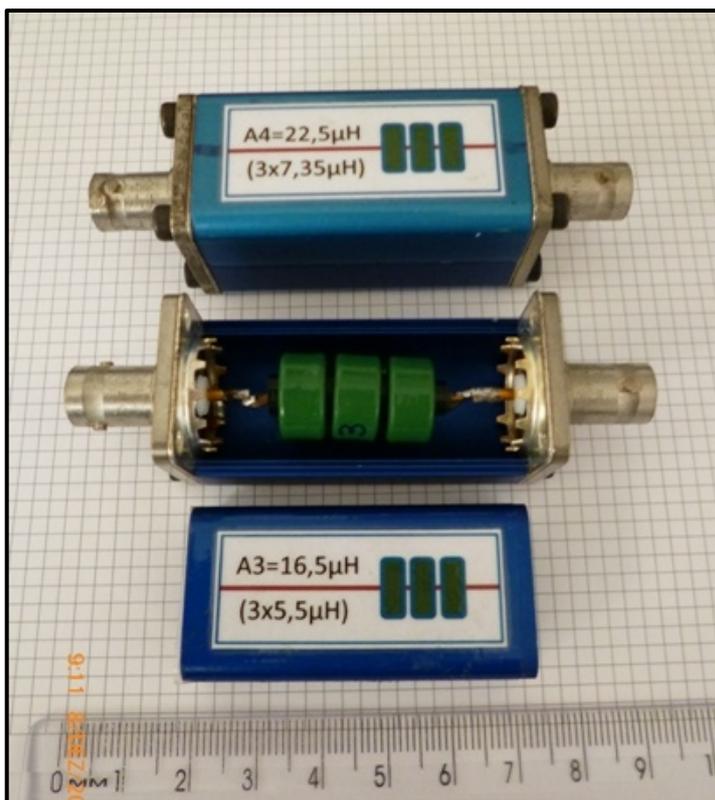


Figura 21 – Supressor com montagem interna do toroide junto ao condutor.

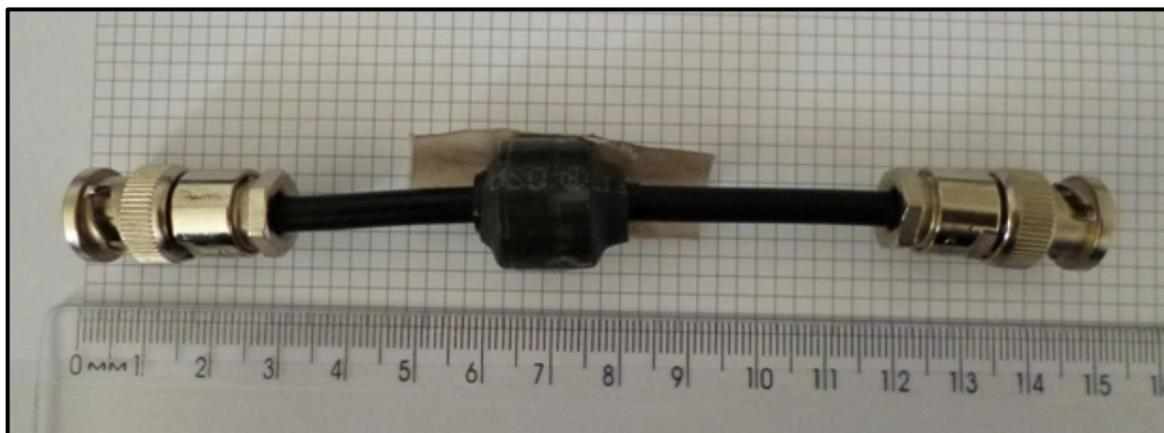


Figura 22 – Supressor com montagem do toroide externo ao invólucro e sem interrupção de continuidade do invólucro.

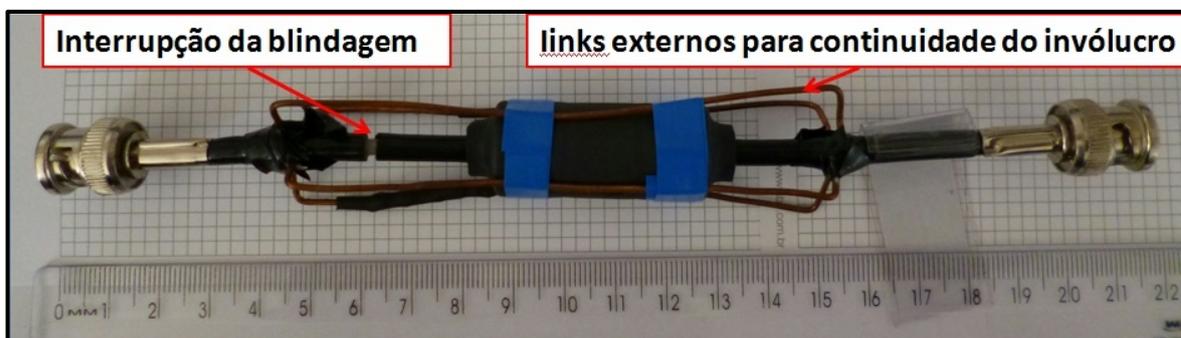


Figura 23 – Supressor com montagem do toroide externo ao invólucro, com interrupção do da blindagem e links externos para continuidade do invólucro.

Como modelo do transformador foram utilizadas duas opções sugeridas em [26] e pelo fabricante, ABB, para estudos de coordenação de isolamento. Um mais simples considerando apenas o acoplamento capacitivo (400 pF) da bucha condensiva de interligação do transformador com o barramento isolado a SF₆. Outro considerando da mesma forma o valor da capacitância da bucha e adicionando um segundo caminho com a associação em série RLC, Figura 12. Os valores sugeridos conforme modelo da Figura 12 são, C_B 400 pF, R₁ 0,2 Ω, L₁ 2 μH e C₁ 1,6 nF. Os valores utilizados por padrão de componentes do mercado foram C_B 470 pF, R₁ 0,47 Ω, L₁ 4,2 μH e C₁ 1,7 nF, conforme mostrado na Figura 24.

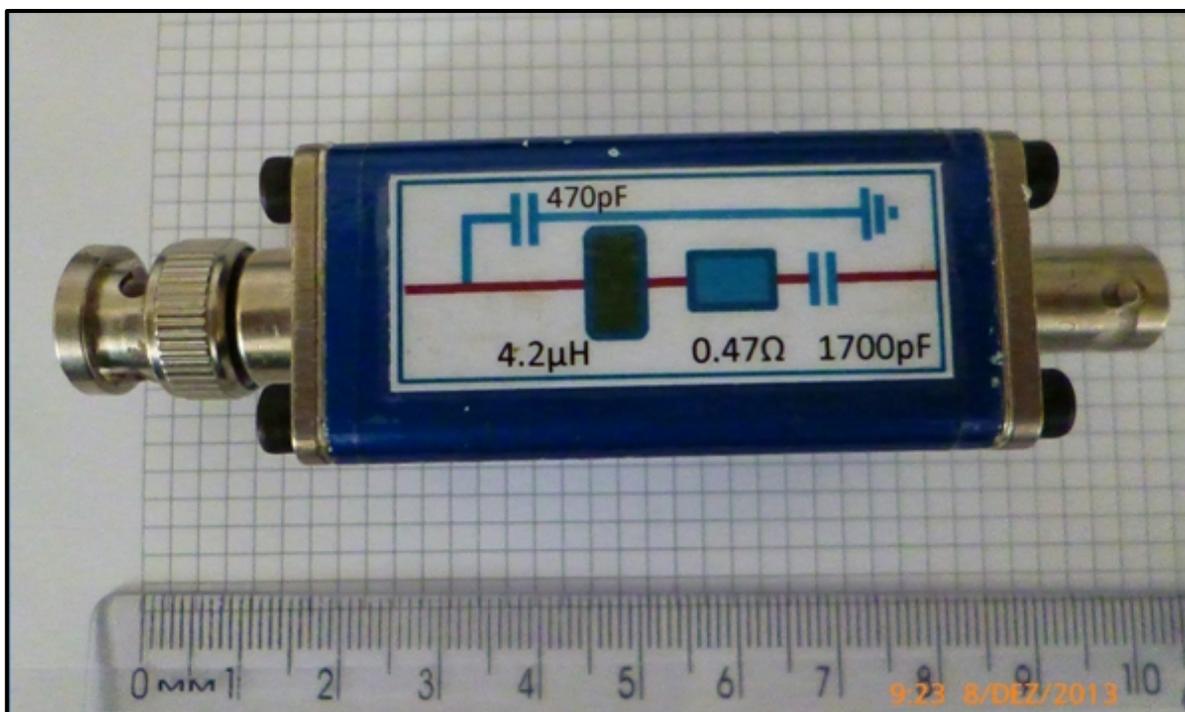


Figura 24 – Modelo reduzido utilizado para representar o transformador

Como fonte de surto de tensão para o modelo com elementos reduzidos foi utilizado um gerador de pulsos repetitivos, Figura 25, capaz de gerar um pulso positivo da ordem de 20 Volts com tempo de subida de 1,14 nanosegundos, conforme oscilograma mostrado na Figura 26.



Figura 25 – Gerador de pulsos repetitivos com 1,14 nanosegundos tempo de subida.

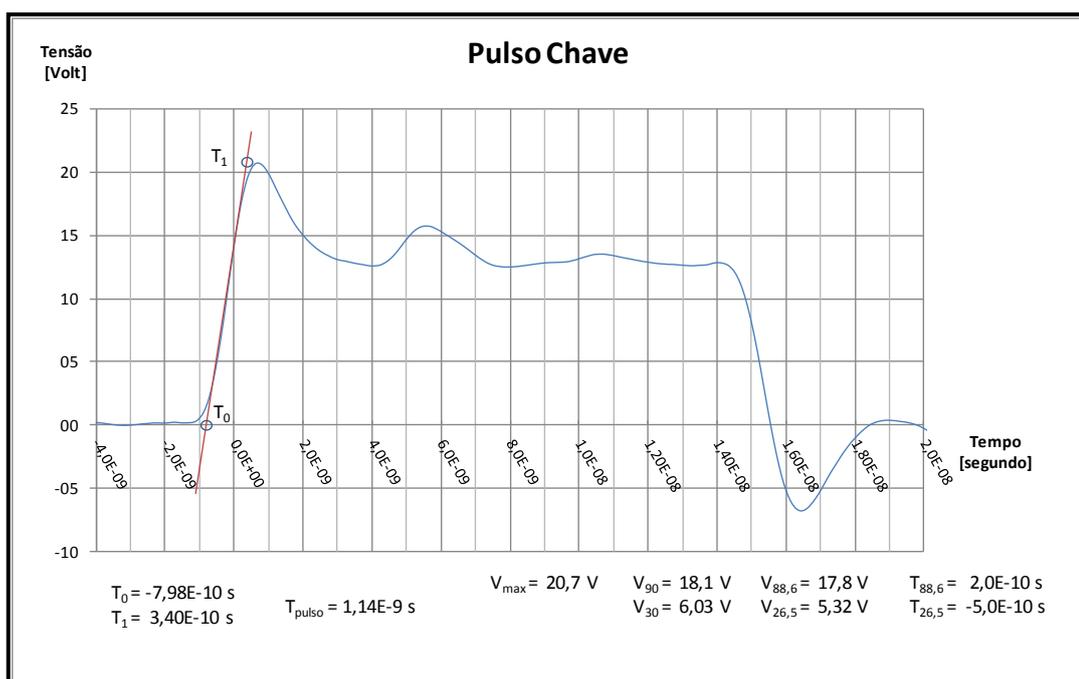


Figura 26 – Oscilograma do pulso gerado no modelo reduzido.

Para verificação da capacidade de cada modelo de supressor de atenuar o pico da sobretensão transitória muito rápida (VFTO), que atinge o transformador, após sua geração por reignições na chave seccionadora, foi montado um circuito

equivalente, utilizando cabos coaxiais RG-58, Figura 152 do anexo, nos comprimentos de:

- 1) 4,69 m entre Chave Seccionadora e Posição 1;
- 2) 7,53 m entre Posição 1 e Posição 2;
- 3) 4,65 m entre Posição 2 e Posição 3;
- 4) 1,79 m entre Posição 3 e bucha do Transformador.

O comprimento total do circuito entre a chave seccionadora e o transformador é de 18,66 m, o tempo de propagação medido foi de $9,48 \times 10^{-8}$ s, o que resulta em uma velocidade de propagação de $1,97 \times 10^8$ m/s, correspondente a 65,6 % da velocidade da luz, em conformidade com o valor de 65 % informado pelo fabricante do cabo, Figura 153.

Neste circuito, os supressores foram montados um por vez em cada uma das três posições (P1/P2/P3), tendo ainda sido realizadas medições com os dois modelos de transformador “T_Cap” (só ramo Capacitivo 470 pF) e “T_Cap+Ind” (ramo Capacitivo 470 pF em paralelo com ramo RLC), Figura 12.

Quanto à montagem, localização física do toroide sobre o condutor ou sobre o invólucro, foram construídos doze elementos supressores, contemplando as seguintes alternativas:

- 1) Cinco supressores com montagem externa ao cilindro interno (condutor), mas permanecendo interna ao cilindro externo (invólucro), Figura 21. Foram identificados como A1-I, A2-I, A3-I, A4-I e A5-I, sendo A1, A2, A3, A4 e A5 referência aos atenuadores da Tabela 1, e “I” para identificar montagem Interna a invólucro;
- 2) Dois supressores com montagem externa ao cilindro externo (invólucro), sem interrupção da continuidade do cilindro externo, Figura 22. Foram identificados como A1-E e A2-E, sendo A1 e A2 referência aos atenuadores da Tabela 1, e “E” para identificar montagem Externa ao invólucro;
- 3) Cinco supressores com montagem externa ao cilindro externo (invólucro), idem ao anterior, porém com interrupção da continuidade do cilindro externo, e montagem de links de condutores sobre os toroides para dar continuidade ao cilindro externo, Figura 23. Foram identificados como A1-

G, A2-G, A3-G, A4-G e A5-G, sendo A1, A2, A3, A4 e A5 referência aos atenuadores da Tabela 1, e "G" para identificar montagem com Gap no invólucro.

Para comparação foram realizados 72 registros oscilográficos nas condições obtidas pelos 12 supressores em três posições para dois modelos de transformador ($12 \times 3 \times 2 = 72$), Figuras 63 a Figura 134 do apêndice, utilizando-se um osciloscópio da Agilent Technologies, modelo MSO6104A 1GHz – 4 GS/s.

Como procedimento para normalizar os valores de tensão transitória que atingiram o transformador e permitir a comparação da eficiência de forma direta, foram calculados dois valores de percentuais da tensão no transformador com o uso de supressores em relação à tensão sem o uso de supressores, para cada uma das 72 condições.

O primeiro, Equação 2, T_{PR} (Tensão Percentual Relativa), como a relação entre o pico máximo de tensão que aparece junto ao transformador com o supressor inserido no circuito, pelo valor do pico máximo de tensão junto ao transformador sem o supressor inserido no circuito, multiplicada por 100:

$$T_{PR} [\%] = \frac{Vt_{(max\ com\ supressor)}}{Vt_{(max\ sem\ supressor)}} \times 100 [\%] \quad (\text{Equação 2})$$

$Vt_{(max\ com\ supressor)}$ = Pico máximo de tensão no transformador com uso do supressor

$Vt_{(max\ sem\ supressor)}$ = Pico máximo de tensão no transformador sem uso do supressor

O segundo, Equação 3, T_{PRP} (Tensão Percentual Relativa Ponderada), como a relação anterior, ponderada pelo valor da tensão do pulso gerado pela chave em cada ensaio.

$$T_{PRP} [\%] = \frac{Vt_{(max\ com\ supressor)} / Vc_{(max\ com\ supressor)}}{Vt_{(max\ sem\ supressor)} / Vc_{(max\ sem\ supressor)}} \times 100 [\%] \quad (\text{Equação 3})$$

$Vt_{(max\ com\ supressor)}$ = Pico máximo de tensão no transformador com uso do supressor

$Vc_{(max\ com\ supressor)}$ = Pico máximo de tensão na chave com o uso do supressor

$Vt_{(max\ sem\ supressor)}$ = Pico máximo de tensão no transformador sem o uso do supressor

$Vc_{(max\ sem\ supressor)}$ = Pico máximo de tensão na chave sem o uso do supressor

Os valores obtidos pela Equação 3 tornam-se os mesmos obtidos pela Equação 2 nos casos em que os valores de " $V_{C(max\ com\ supressor)}$ " sejam idênticos aos valores de " $V_{C(max\ sem\ supressor)}$ ". Como são dois ensaios distintos, e poderia haver uma variação no valor do impulso aplicado em cada ensaio, para efeito da análise final foram considerados apenas os valores calculados pela Equação 3, onde esta possível variação é compensada.

Cabe observar que o uso da Equação 2 seria perfeitamente aceitável uma vez que valores dos impulsos gerados pela chave, assim como os valores de tensão no transformador mostraram ter boa repetibilidade.

Para verificação da repetibilidade foram realizados dez impulsos subsequentes na mesma condição sem supressor, Figura 57 do apêndice, dez impulsos subsequentes na condição "A2-I-P1 T_Cap" (Atenuador A2, montagem Interna, na posição P1, com modelo de transformador Capacitivo), Figura 58 do apêndice, e mais nove impulsos subsequentes na condição "A1-I-P1 T_Cap" (Atenuador A1, montagem Interna, na posição P1, com modelo de transformador Capacitivo), Figura 58 do apêndice. Para cada condição foram calculadas as médias o desvio padrão, este último como medida de dispersão. Os valores calculados de desvio padrão para as três condições ficaram entre 1,19% e 3,26% das médias, comprovando assim a boa repetibilidade nos valores da tensão sob as diferentes condições.

Como valor de referência na condição sem supressor foram utilizados os valores de " $V_{c_max(sem\ supressor)}$ ", Pico máximo de tensão na Chave seccionadora sem uso do supressor, e de " $V_{t_max(sem\ supressor)}$ ", Pico máximo de tensão no transformador sem uso do supressor, mostrados nos oscilogramas das Figuras 52 e 53 do apêndice, respectivamente para os modelos "T_Cap" (Transformador representado apenas pela capacitância da bucha) e "T_Cap+Ind" (Transformador representado pela capacitância da bucha e por um ramo RLC).

Para melhor entendimento do comportamento e características dos atenuadores na frequência industrial e sob condições de surto de frente muito rápida, foram realizados também levantamento da curva de saturação em 50 Hz, resposta em frequência com o instrumento FRAnalyzer da Omicron e resposta a impulso.

Na Figura 27 observam-se detalhes da montagem para levantamento das curvas de saturação e os resultados conforme gráfico da Figura 60 do apêndice.

Pelo gráfico comparativo das curvas de saturação verifica-se que na condição de frequência industrial, manifesta-se a clara superioridade do material nanocristalino do supressor A2, atingindo maior densidade de fluxo e requerendo menor corrente de magnetização.



Figura 27 – Montagem para levantamento da curva de saturação dos cinco atenuadores.

No levantamento da curva de resposta em frequência, Figura 61 do apêndice, todos os atenuadores apresentaram resposta plana até 1,0 MHz, decaindo a partir deste valor. Observa-se que o atenuador A3 apresentou uma ressonância pouco acima da frequência de 1,0 MHz, mas continuou com característica semelhante aos demais até 10 MHz. Esta ressonância não deve em princípio ser característica do núcleo e sim uma ressonância devido à indutância pelo número de espiras utilizado no enrolamento para ensaio e capacitâncias de acoplamento.

Na resposta ao impulso, Figura 62 do apêndice, observa-se também semelhança nas respostas entre os cinco núcleos toroidais; novamente com melhor resposta do núcleo de material nanocristalino, o atenuador A2.

Os valores das atenuações obtidas pelos 12 supressores, nas três posições, com os dois modelos de transformador, referentes aos 72 oscilogramas, calculados segundo as Equações 2 e 3, estão mostrados na Tabela 3.

Na Figura 28 estão apresentados na forma de gráfico de barras os valores da Tabela 3 referentes aos valores de T_{PRP} [%], Equação 3.

Para uma interpretação visual melhor, os valores foram agrupados em barras duplas por modelo de transformador (T_Cap / T_Cap + Ind). Do lado esquerdo do gráfico foram colocados os resultados obtidos pelos dois tipos de supressores com montagem do toroide externa ao invólucro sem interrupção da blindagem (A1-E / A2-E), que, como esperado não apresentaram redução significativa da T_{PRP} [%], uma vez que a blindagem não interrompida do cabo funciona como barreira neutralizadora à atuação do campo eletromagnético. Na sequência estão os demais supressores por modelo de supressor, e ainda em cada modelo por posição (P1/P2/P3).

A Figura 28 mostra que não há diferença significativa entre os resultados apresentados com o uso dos dois modelos de transformador (cada lateral da barra dupla), considerando ou não a parte indutiva, indicando que para frequências da ordem de megahertz, prevalece a influência da parte capacitiva da bucha do transformador.

Ainda na Figura 28 tem-se que os supressores com melhor desempenho foram o “A2-I” e o “A2-G” com uma redução da sobretensão com uso de supressor para em torno de **56%** do valor da sobretensão sem o uso de supressor. Os dois supressores são do mesmo material, nanocristalino, e mostraram também não existir, em princípio diferença pela montagem Interna sobre o condutor (I), ou externa sobre o invólucro, deste que o invólucro seja interrompido por um Gap (G).

Foram identificados dois fatos novos, para um melhor entendimento e subsidio para projetos futuros:

- 1) A não correspondência linear entre os valores das indutâncias nominais dos supressores em baixa frequência e os valores de redução nas sobretensões obtidas em alta frequência. O supressor A1 (5,6 μ H) obteve desempenho semelhante ao supressor A2 (150 μ H), 59% e 56% respectivamente, sendo que

o supressor A2 tem indutância nominal quase 27 vezes superior ao supressor A1 na frequência industrial;

- 2) Forte influência da geometria, o supressor A1 (5,6 μH) e o supressor A5 (5,1 μH), são praticamente de mesmo material e mesmos valores de indutância nominal, porém tiveram desempenhos diferenciados, 59% e 70% respectivamente, indicando melhor eficiência para o toroide de menor diâmetro.

Como conclusão deste capítulo tem-se que os resultados apresentados pelo modelo reduzido validam de forma clara, e coerente com a modelagem digital, a hipótese formulada de que é possível conseguir a atenuação do valor de “**Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTO)**” utilizando elementos passivos de baixo custo.

Tabela 4 – Valores de T_{PR} [%], (Equação 2), e T_{PRP} [%], (Equação 3), medidos no modelo reduzido

Supressor	Posição	Tensão Percentual Relativa Ponderada T_{PRP} [%]		Tensão Percentual Relativa T_{PR} [%]	
		T_Cap	T_cap+Ind	T_Cap	T_cap+Ind
A1_E	P1	96,7	99,4	96,6	99,6
	P2	97,4	100,1	97,9	99,4
	P3	98,9	96,3	98,5	95,6
A2_E	P1	98,0	97,8	99,7	97,9
	P2	99,2	101,1	98,6	99,8
	P3	100,1	101,5	100,2	100,4
A1_I	P1	61,7	58,2	61,2	58,1
	P2	60,4	58,5	60,3	57,4
	P3	59,8	58,4	59,8	58,3
A1_G	P1	57,9	59,9	58,3	59,3
	P2	57,8	58,4	58,1	57,6
	P3	59,4	58,5	59,6	57,4
A2_I	P1	54,0	56,0	57,1	55,5
	P2	57,6	52,3	57,6	52,6
	P3	56,7	59,0	57,2	57,6
A2_G	P1	58,3	55,1	58,4	54,3
	P2	56,6	55,5	56,7	55,5
	P3	57,8	56,2	57,6	55,5
A3_I	P1	73,5	75,9	73,7	74,3
	P2	72,3	73,9	71,3	74,1
	P3	75,0	76,8	75,3	75,8
A3_G	P1	72,9	71,8	73,5	71,0
	P2	72,3	74,2	73,0	74,1
	P3	75,5	76,3	76,0	76,0
A4_I	P1	74,4	71,2	73,5	71,2
	P2	73,7	73,3	74,1	72,9
	P3	73,3	76,4	73,7	75,0
A4_G	P1	70,6	73,7	70,8	72,7
	P2	72,2	74,3	72,0	73,7
	P3	69,5	72,3	70,6	71,0
A5_I	P1	70,5	75,5	70,8	75,0
	P2	73,0	71,8	73,2	70,4
	P3	72,4	70,5	71,8	69,1
A5_G	P1	67,6	71,1	68,7	70,4
	P2	71,1	70,6	71,3	70,6
	P3	70,2	71,8	71,0	70,2

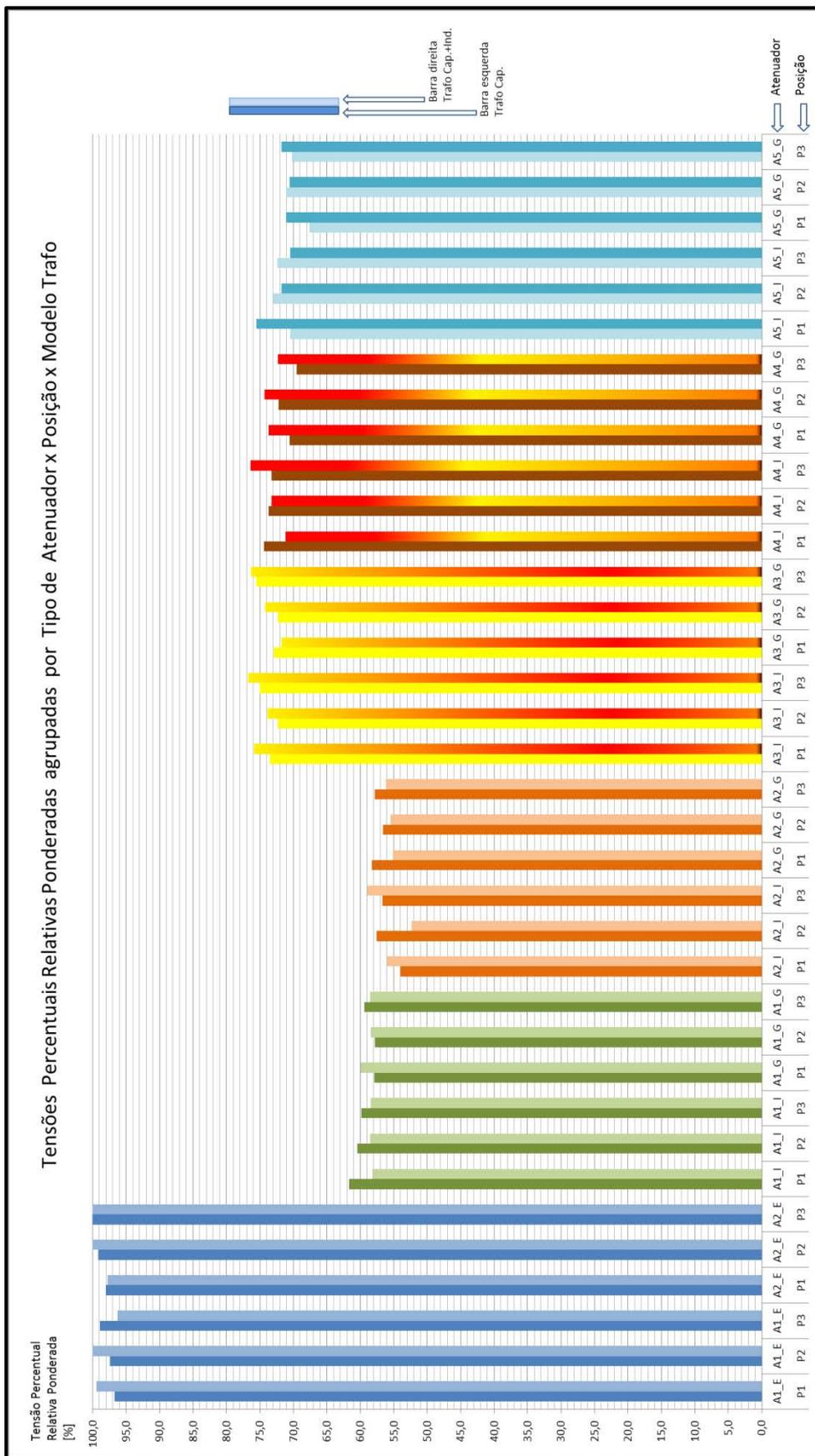


Figura 28- Gráfico de barras para os valores T_{PRP} [%] da Tabela 2

4 MEDIÇÕES EM UM TRECHO DE SE BLINDADA 500 kV

Inicialmente, estava previsto para a conclusão desta pesquisa, a montagem nas instalações da Itaipu Binacional de um pequeno trecho de barramento blindado com módulos reserva da subestação de 500 kV e a aplicação de impulsos de VFTO. Os impulsos de VFTO seriam obtidos através da aplicação de impulsos de onda cortada, através de eletrodos de corte em ambiente com SF₆, para conseguir tempos de corte semelhantes aos da operação de chaves seccionadoras e de disjuntores da SE Blindada.

Neste período surgiu a oportunidade de conciliar com as necessidades do Laboratório de Alta Tensão dos Institutos Lactec em Curitiba (www.institutoslactec.org.br) uma parceria para montagem de um trecho maior de barramentos blindados a SF₆ na sala de Ensaios de Alta Tensão dos Institutos Lactec.

Esta montagem incluiu uma bucha Ar/SF₆ de 500 kV do próprio Laboratório de Alta Tensão e um conjunto de barramentos reservas da SE Blindada de Itaipu, onde foram instalados uma chave seccionadora e 24,48 metros de barramentos conforme diagrama da Figura 29.

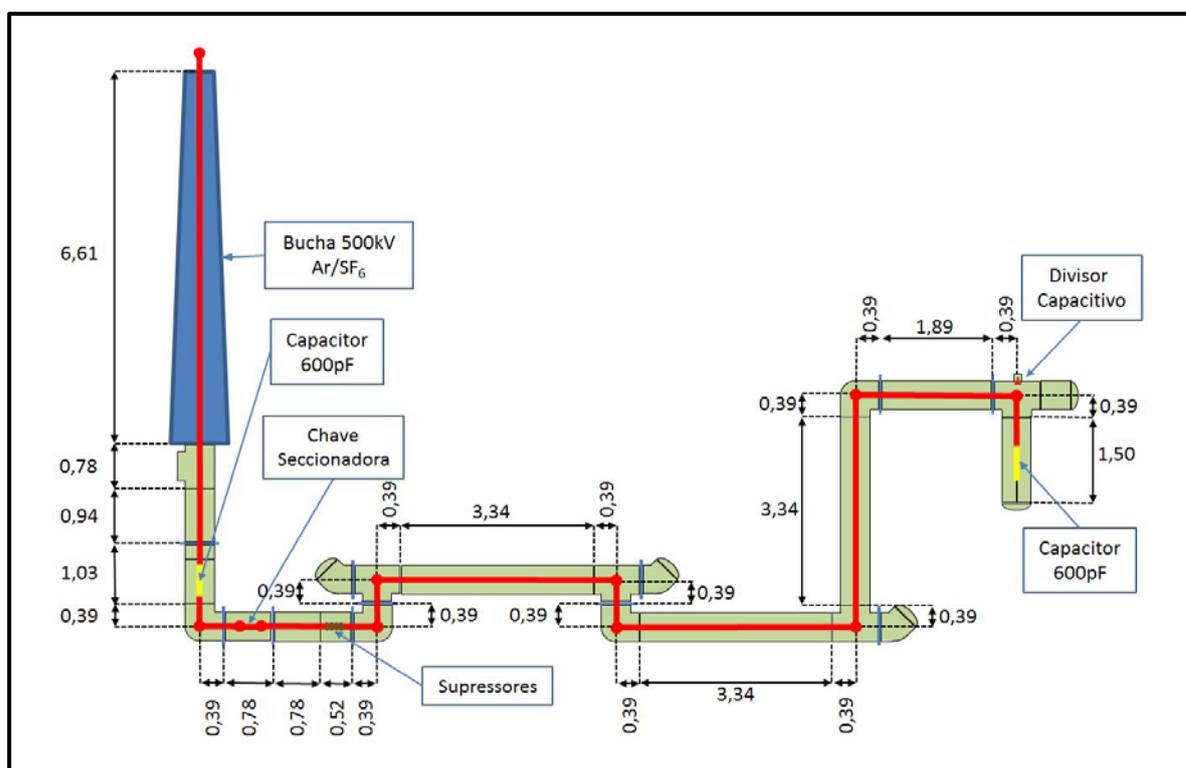


Figura 29 – Diagrama do conjunto de barramentos montados no Laboratório de Alta Tensão
Fonte: O autor

Foram também incluídos na montagem vários compartimentos com flanges de acesso de forma que pudessem ser testados equipamentos como para-raios, simuladas contaminações por partículas para ensaios de descargas parciais, assim como a instalação de capacitores para simular tanto a capacitância da bucha do transformador como a capacitância das câmaras de extinção dos disjuntores da subestação de Itaipu.

Na Figura 30 vê-se a montagem realizada no Laboratório de Alta Tensão dos Institutos Lactec, onde tem-se em primeiro plano o divisor de tensão capacitivo e o conjunto capacitor indutor do equipamento ressonante Hipotronics, e em segundo plano o conjunto de barramentos blindados, em destaque as conexões e anéis anti-corona para conexão externa em 500 kV.



Figura 30 – Vista da montagem do trecho de subestação de 500 kV na sala de ensaios do Laboratório de Alta Tensão dos Institutos Lactec.

As capacitâncias de 600 pF representadas no diagrama da Figura 29 para simular a capacitância das câmaras de extinção do disjuntor e a capacitância da bucha do transformador foram obtidas pela montagem dos capacitores de 1200 pF x 100 kV, Figura 31, originais da câmara de extinção do disjuntor da subestação de Itaipu.



Figura 31 – Capacitor 1200 pF x 100 kV, original da câmara de extinção do disjuntor.

Como a montagem de capacitores nestas posições não fazem parte do projeto dos barramentos blindados da SE, foi necessário a usinagem de flanges e anéis anti-corona especiais, respeitando sempre os diâmetros e distâncias de componentes semelhantes de outras conexões.

Na Figura 32 tem-se em detalhe a montagem dos capacitores que vão ao final do barramento, na posição equivalente do transformador elevador.

Na Figura 33 é mostrada a montagem dos capacitores na posição equivalente do disjuntor, antes e após a montagem do anel anti-corona sobre o acoplamento dos dois capacitores.



Figura 32 – Detalhe da montagem de capacitores na posição do transformador.

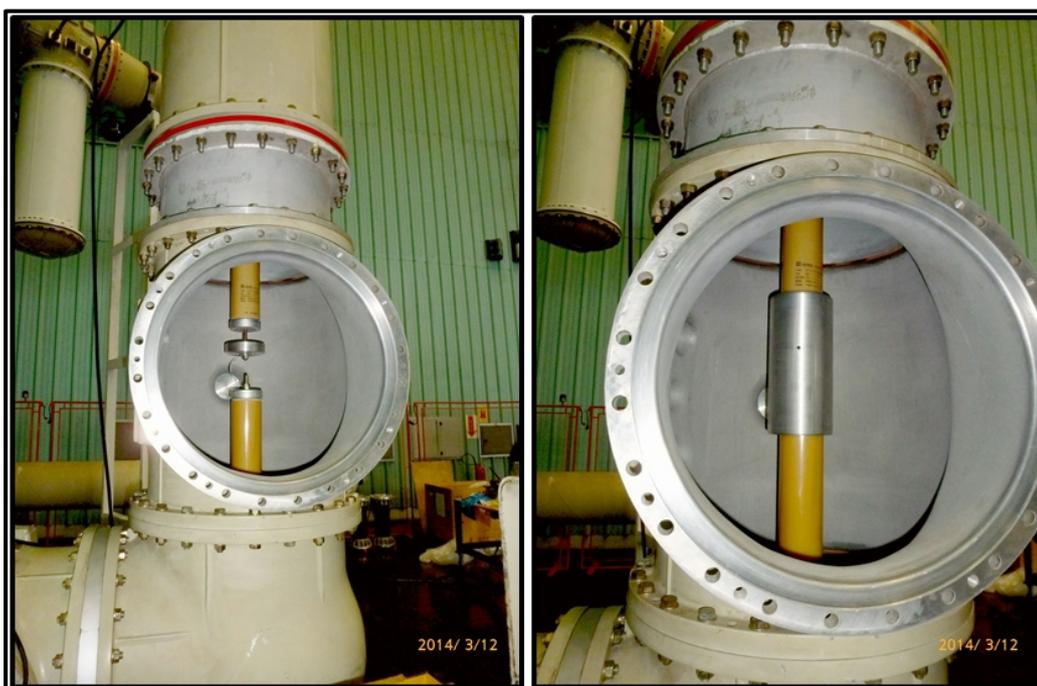


Figura 33 – Detalhe da montagem de capacitores na posição do disjuntor, à esquerda antes e à direita depois da montagem do anel anti-corona.

Como supressores foram testados três tipos de materiais magnéticos, dois ferrites e um metal amorfo nanocristalino, cujas principais características estão mostradas na Tabela 5

Tabela 5 – Características dos materiais magnéticos utilizados nos três tipos de supressores testados. Adaptado de Magmattec [50].

Supressor	Ref. Fabricante	Permeabilidade magnética- 10kHz [μ r]	Densidade de saturação a 10kHz 25° [mT]	Temperatura Curie [°C]	Resistividade [Ω .m]	Densidade [g/cm ³]
S_139	CF139	2.300	490	> 210	8	4,8
S_190	CF190	6.000	400	> 120	0,5	4,8
S_Nano	MMT520	100.000	1.200	>120	0,01	7,4

Na Figura 34, imagens dos três toroides, com diâmetro interno de 100 mm, diâmetro externo de 150 mm e uma seção quadrada de 25 mm x 25 mm.



Figura 34 – Toroides utilizados, à esquerda S_139, ao centro S_190 e à direita S_Nano.

Para montagem dos toroides sobre o condutor sem alteração das distâncias de isolamento, a seção do condutor foi reduzida de forma que os toroides pudessem ser montados sobre seu diâmetro externo e que o diâmetro externo do toroide mantivesse do diâmetro interno do invólucro uma distância ainda maior que a do condutor original.

Pode-se observar na Figura 35 que com a redução do diâmetro do condutor, o conjunto de quatro toroides pôde ser montado mantendo-se as distâncias de isolamento.



Figura 35 – Vista da parte interna do barramento blindado mostrando os toroides montados sobre trecho do condutor com diâmetro reduzido.

Para medição dos transitórios durante a operação da chave seccionadora foi utilizado como sensor um divisor capacitivo [38], especialmente desenvolvido por Meppelink [39], para medições em Itaipu em 1987. Este sensor tem como característica principal uma resposta plana desde a frequência industrial até 1,0 Giga-Hertz, respondendo a impulsos da ordem de 0,3 nanosegundos.

Para a verificação da resposta em frequência deste sensor, uma célula de teste foi especialmente construída, Figura 36, seguindo os critérios da IEC TS 61321-1 [36], recomendações da Ontario Hydro [42] e Boggs [37].

Uma vez instalado o sensor na célula de teste foram aplicadas as formas de onda conforme Tabela 6 e calculados os respectivos fatores de escala, o seu valor médio, e verificado o desvio de sua linearidade, que estava dentro uma faixa aceitável de $\pm 2,5\%$.

Além da verificação da linearidade, a célula de testes serviu também para verificar, através dos registros oscilográficos, que o sistema de medição, sensor

mais cabos e conexões não estava introduzindo oscilações ou qualquer outro tipo de ruído indesejável nas medições.

Tabela 6 – Formas de onda aplicada ao sensor e Fatores de Escala obtidos.

Forma de onda aplicada	V _{Entrada} [Volt]	V _{Saída} [Volt]	Fator de Escala V _{Entrada} / V _{Saída}	¹ Lin %
Tensão AC 60 Hz (t=16,67 s)	1000	0,0154	6,49E+04	1,22
Impulso de manobra (20 μs x 4000 μs)	1600	0,0250	6,40E+04	-0,23
Impulso atmosférico (0,84 μs x 60 μs)	1600	0,0247	6,48E+04	0,98
Impulso atmosférico cortado na frente (0,5 μs)	1250	0,0199	6,28E+04	-2,08
Impulso de VFT (890 ps x 400 ns)	3500	0,0545	6,42E+04	0,11
Valor médio do Fator de Escala			6,41E+04	

$${}^1\text{Lin \%} = \frac{(\text{Fator de Escala} - \text{Valor médio do Fator de Escala}) \times 100}{\text{Valor médio do Fator de Escala}}$$



Figura 36 – Célula de teste montada para validação da resposta em frequência do sensor.

O divisor foi instalado próximo à extremidade oposta à bucha Ar/SF₆, conforme diagrama da Figura 29, permitindo coletar oscilogramas das sobretensões no ponto equivalente ao topo da bucha SF₆/Óleo na interface da subestação blindada com o transformador elevador.

O desenvolvimento e fabricação de mais unidades deste tipo de divisor está sendo objeto de P&D dos Institutos Lactec/Copel. No momento, porém, diante da não disponibilidade de um segundo divisor com as mesmas características, para análise do desempenho do supressor através da comparação direta de duas tensões, da mesma forma como se procedeu na simulação digital e por modelo reduzido, foi adotada como forma de análise, a comparação estatística de registros de sobretensões sem a montagem dos supressores relativamente a de registros de

sobretensões com a montagem dos supressores. Foram realizadas 120 manobras da chave seccionadora, sendo 30 na condição sem supressor, 30 utilizando quatro toroides do supressor S_139, 30 utilizando quatro toroides do supressor S_190 e 30 utilizando quatro toroides do tipo S_Nano.

Ainda como diferença em relação aos modelos computacional e reduzido, tem-se que nestes a simulação é de apenas uma reignição e existe excelente repetibilidade, enquanto no ensaio na subestação de 500 kV, com a abertura ou fechamento da chave seccionadora, ocorrem uma série de reignições sucessivas, sem apresentarem repetibilidade quanto ao valor de pico das sobretensões e do número de reignições.

Antes de passar à análise dos 120 oscilogramas obtidos, cabe ressaltar o empenho das equipes dos Institutos Lactec e de Itaipu, tanto na fase de montagem do conjunto de equipamentos que envolveram todos os ensaios, como principalmente pela pró-atividade e criatividade nos momentos em que os imprevistos ocorreram, ainda mais sendo a primeira vez que este tipo de ensaio se realizou em sala de testes no Brasil. As sobretensões no sistema de aterramento levaram à necessidade de aterrar em mais pontos o invólucro dos barramentos, reforçar a blindagem dos cabos de comando/alimentação da chave seccionadora Figura 36, aumentar o nível de tensão dos retificadores de alimentação do motor de acionamento da chave seccionadora. O osciloscópio como teria que ficar próximo ao sensor, por limitação em menos de 10 metros do comprimento do cabo de conexão ao sensor, para manter a resposta plana em toda a faixa de frequências [39], foi montado em uma cabine com dupla blindagem eletromagnética, Figura 37.

A própria fonte para energização em 500 kV, fonte ressonante Hipotronics, inicialmente utilizada nos ensaios para medição de ruído de fundo, ensaios de descargas parciais em dois para-raios de Itaipu e ensaios para os Institutos Lactec/Copel, quando da operação de abertura ou fechamento da chave seccionadora apresentou atuação da proteção, levando a necessidade do uso de uma fonte com maior potência, requerendo a alimentação em 500 kV através de um transformador elevador de 2,0 MVA (500 kV x 6,9 kV), alimentado por um grupo motor-gerador com saída em 6,9 kV. A configuração com alimentação através do transformador elevador é mostrada na Figura 38.



Figura 37 – Detalhes dos aterramentos e blindagens adicionais, à esquerda malha de terra e cabearmentos, à direita caixa com dupla blindagem para montagem do osciloscópio.



Figura 38 – Conexões externas em 500 kV, do transformador elevador ao divisor capacitivo e deste até a bucha Ar/SF₆, interface para energização dos barramentos isolados em SF₆.

Iniciados os ensaios, verificou-se que o nível de sobretensões nas reignições atingia os patamares de 2,5 p.u. a 3,0 p.u.. Por questões da preservação dos equipamentos dos Institutos Lactec, e dos equipamentos de 500 kV da Itaipu, uma vez que seriam realizadas mais de cem manobras, optou-se por utilizar uma tensão que produzisse como sobretensão o valor nominal de projeto dos equipamentos, 500 kV. Desta forma os ensaios foram realizados com uma tensão fase neutro de 100 kV o que equivale a uma tensão fase-fase de 173,2 kV na SE blindada, chegando as sobretensões a 519 kV ($3,0 \times 100 \text{ kV} \times \sqrt{3}$) referidas à tensão fase-fase.

Os 120 registros oscilográficos, foram gravados com um osciloscópio Tektronix, modelo DPO 5104 – 1 GHz - 10 GS/s, registrando durante um período de 100 ms com um intervalo entre amostras de $1,0 \times 10^{-8}$ s. O tempo de pré-trigger foi de dois ciclos, 33 ms, e o trigger foi ajustado para duas vezes o valor da tensão aplicada pela fonte. Desta forma foram registradas todas as reignições durante cada manobra, assim como um trecho representativo da tensão antes e depois de cada chaveamento.

Na Figura 39 é mostrado o trecho de um oscilograma durante a abertura da chave seccionadora, onde se observa uma sequência de reignições com aumento de intensidade assim como do intervalo entre reignições, à medida que os contatos se afastam, de forma análoga ao exemplificado na Figura 4.

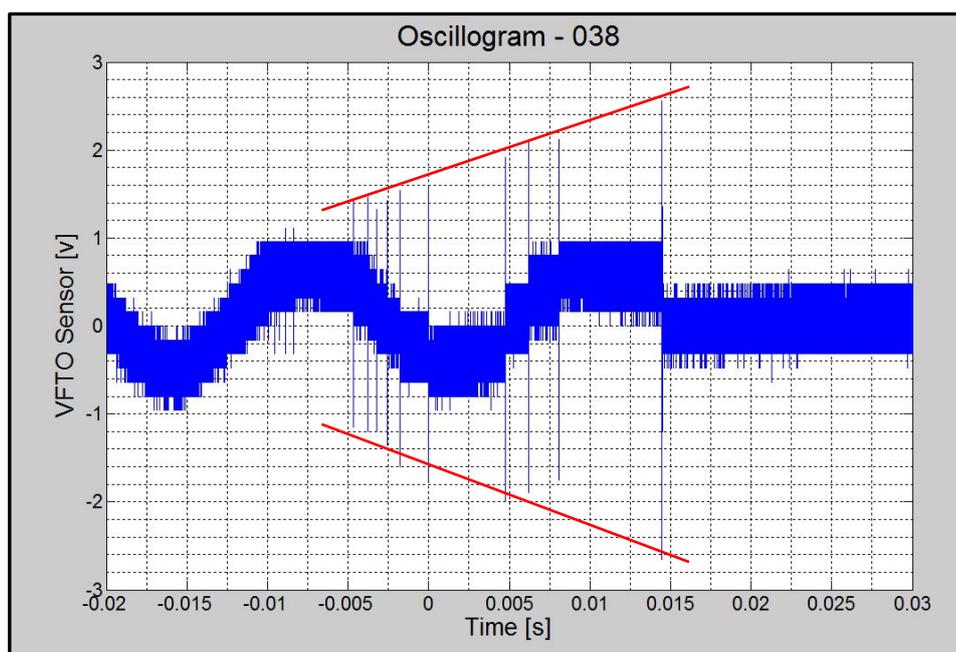


Figura 39 – Trecho de um oscilograma de abertura da chave seccionadora mostrando a sequência de reignições.

Na Figura 40, tem-se o trecho de um oscilograma durante o fechamento da chave seccionadora, onde, de forma inversa da abertura, observa-se uma sequência de reignições com redução da intensidade e do intervalo entre reignições à medida que os contatos se aproximam.

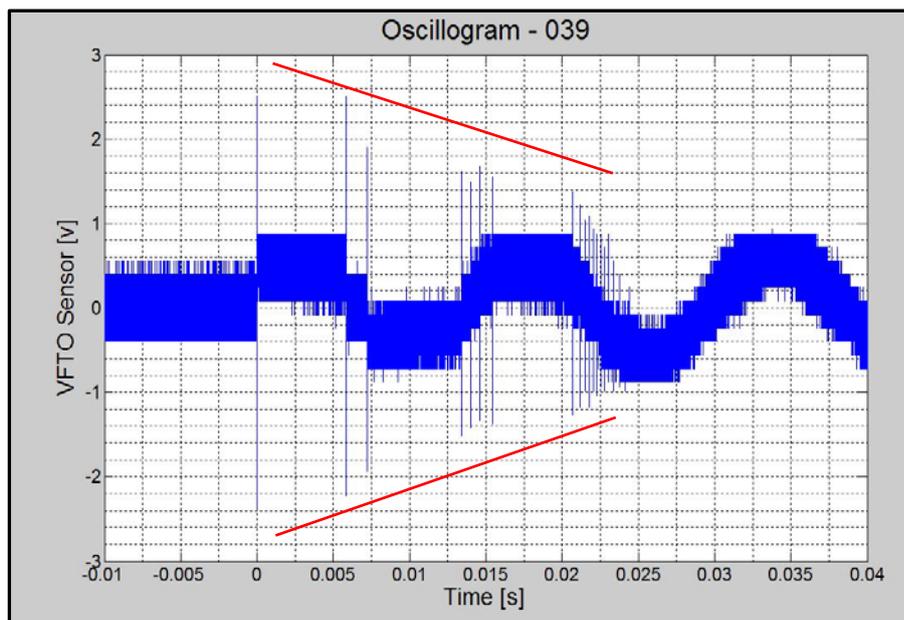


Figura 40 – Trecho de um oscilograma de fechamento da chave seccionadora mostrando a sequência de reignições.

Cada registro contém 10 milhões de pontos, o que embora tenha exigido um maior esforço computacional para abertura e manuseio de cada arquivo, permitiu o registro com boa resolução de todas as reignições de cada manobra. Observa-se que, em passado recente, este tipo de aquisição não seria possível, tendo-se que optar pela aquisição com boa resolução de apenas uma reignição ou abrir mão da resolução para conseguir registrar todas as reignições.

Além dos 120 registros oscilografando todas as reignições de cada manobra, também foram gravados oscilogramas com a resolução máxima do osciloscópio, 10 GS/s ($1,0 \times 10^{-10}$ s ou 0,1 nanosegundos entre amostras) de somente uma das reignições de abertura assim como somente uma das reignições de fechamento, Figura 41. Na análise destas reignições é possível identificar os parâmetros definidos pela IEC 60071-1 [2] e IEC TR 60071-4 [4] T_f , f_1 e f_2 , Figura 42.

Na Figura 42 tem-se em detalhe as identificações do tempo de subida de um transitório (T_f), 14 nanosegundos, da frequência das oscilações internas (f_1), 50 megahertz, e da frequência da envoltória das oscilações (f_2), 5,2 megahertz.

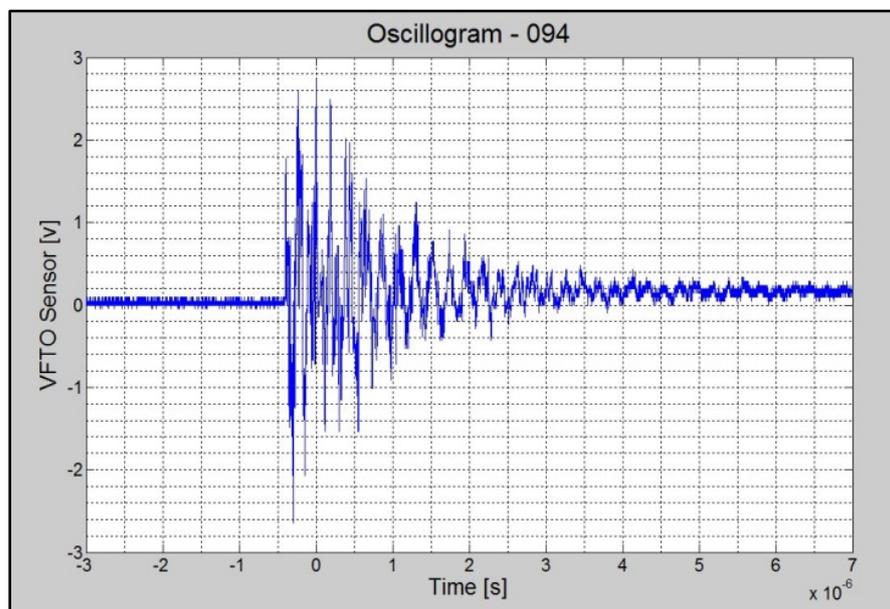


Figura 41 - Oscilograma de uma reignição gravado com resolução de $1,0 \times 10^{-10}$ s.

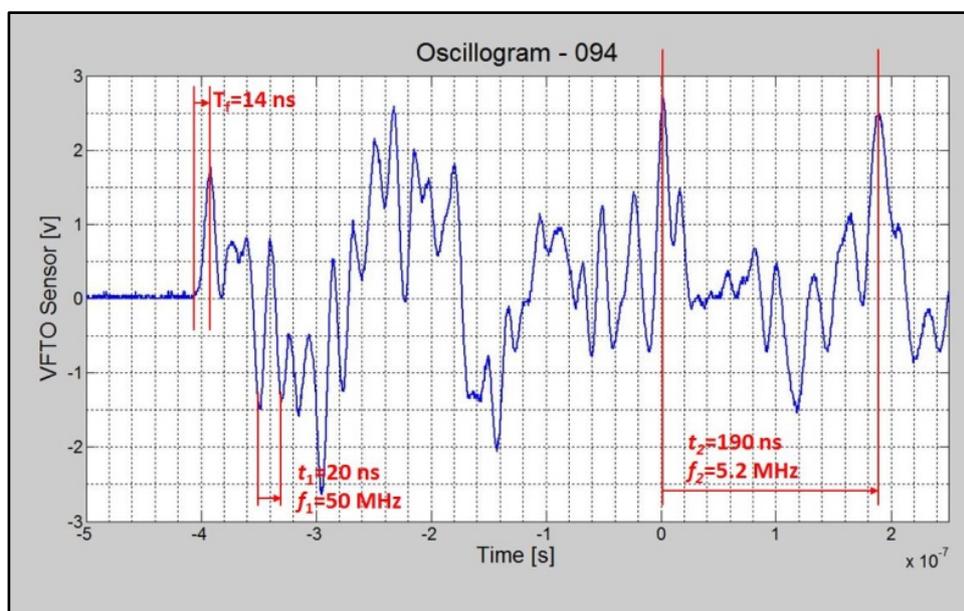


Figura 42 - Detalhe do início do transitório de uma reignição com identificação dos parâmetros definidos pela IEC 60071-1 (T_f , f_1 e f_2).

Os valores encontrados para T_f e f_1 estão em conformidade com as faixas previstas na IEC 60071-1 [2] e IEC TR 60071-4 [4], Figura 1, que são respectivamente, $T_f \leq 100$ nanosegundos, e $0,3$ mega-hertz $\leq f_1 \leq 100$ megahertz.

Já o valor encontrado para a frequência das oscilações da envoltória, f_2 , é da ordem de dez vezes o valor superior da faixa prevista pela IEC, que é $30 \text{ kHz} \leq f_2 \leq 300 \text{ kHz}$.

A identificação da existência de frequências acima da faixa estipulada pela IEC é um fato relevante, motivando a publicação pelo autor de artigo no IEEE-Electrical Insulation Magazine [51] e será considerado nas conclusões para que sirva de recomendação não só de estudos posteriores, mas aos fabricantes de transformadores e entidades normatizadoras. Estas frequências devem ser consideradas principalmente pela possibilidade de excitação de ressonâncias internas nos enrolamentos dos transformadores [7], cuja suportabilidade deve ser estendida até os valores encontrados.

Para extrair dos registros algumas variáveis que servissem de parâmetro de comparação estatística quanto à eficiência dos supressores, foram tabulados para os 120 registros os valores de pico positivo e pico negativo para as quatro maiores reignições (1ºP+, 1ºP-, 2ºP+, 2ºP-, 3ºP+, 3ºP-, 4ºP+, 4ºP-) e do total de reignições (Tot_Reig) com valor superior ao 1 p.u. da tensão aplicada.

Na Figura 43 estão representados os parâmetros de comparação e nas Tabelas 7, 8, 9 e 10, os valores obtidos.

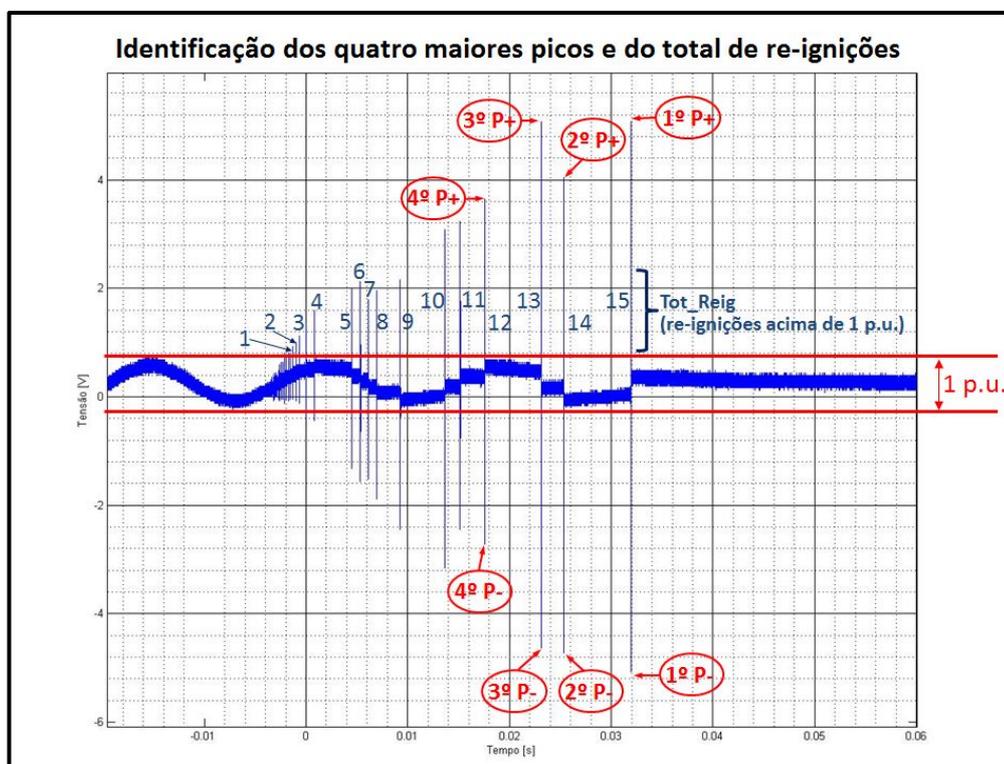


Figura 43 – Caracterização dos parâmetros 1ºP+, 1ºP-, 2ºP+, 2ºP-, 3ºP+, 3ºP-, 4ºP+, 4ºP e Tot_Reig.

Destes valores tabulados, foram extraídos para cada registro, o valor máximo de sobretensão pico a pico (V_{pp_max}), o valor máximo de pico de sobretensão, positiva ou negativa (V_{p_max}) e, respectivamente, os valores médios também para as sobretensões pico a pico (V_{pp_med}) e de pico (V_{p_med}).

Os registros foram agrupados pelo tipo de supressor em um primeiro nível e na sequência pelo tipo de operação, abertura ou fechamento, sendo calculados a média e o desvio padrão para cada subgrupo.

Das médias de cada subgrupo das manobras de abertura e fechamento foram extraídos os gráficos, Figura 44 e Figura 45, considerando os valores relativos entre os valores calculados para as variáveis Tot_Reig , V_{pp_max} , V_{p_max} , V_{pp_med} e V_{p_med} entre a condição sem supressor, tomada como referência, para as condições com supressor S_{190} , com supressor S_{Nano} , e com supressor S_{139} .

Embora com uma dispersão significativa nos resultados, o que levará mais a frente à realização de um tratamento estatístico com “Teste de Hipótese” e “Inferência Estatística para Duas Amostras” [51], a inspeção visual dos gráficos das Figuras 44 e 45 permite inferir que:

- 1) **Tot_Reig** – Foi a variável que apresentou maior redução com o uso dos supressores, ficando por exemplo o valor relativo do supressor S_{Nano} com 0,80 na abertura e 0,78 no fechamento, redução de cerca de 20 %;
- 2) **Vpp_max** – Houve redução, embora não tão significativa quanto para Tot_Reig , ficando por exemplo o valor relativo do supressor S_{Nano} com 0,92 na abertura e 0,95 no fechamento, redução de cerca de 6 %;
- 3) **Vp_max** – Houve redução semelhante a II), ficando por exemplo o valor relativo para o supressor S_{Nano} com 0,94 na abertura e 0,95 no fechamento, redução de cerca de 6 %;
- 4) **Vpp_med** – Houve redução semelhante a II) e III), ficando por exemplo o valor relativo do supressor S_{Nano} com 0,93 tanto na abertura como no fechamento, redução de cerca de 7 %;
- 5) **Vp_med** – Houve redução também semelhante a II) III) e IV), ficando por exemplo o valor relativo do sensor S_{Nano} com 0,93 tanto na abertura como no fechamento, redução de cerca de 7 %.

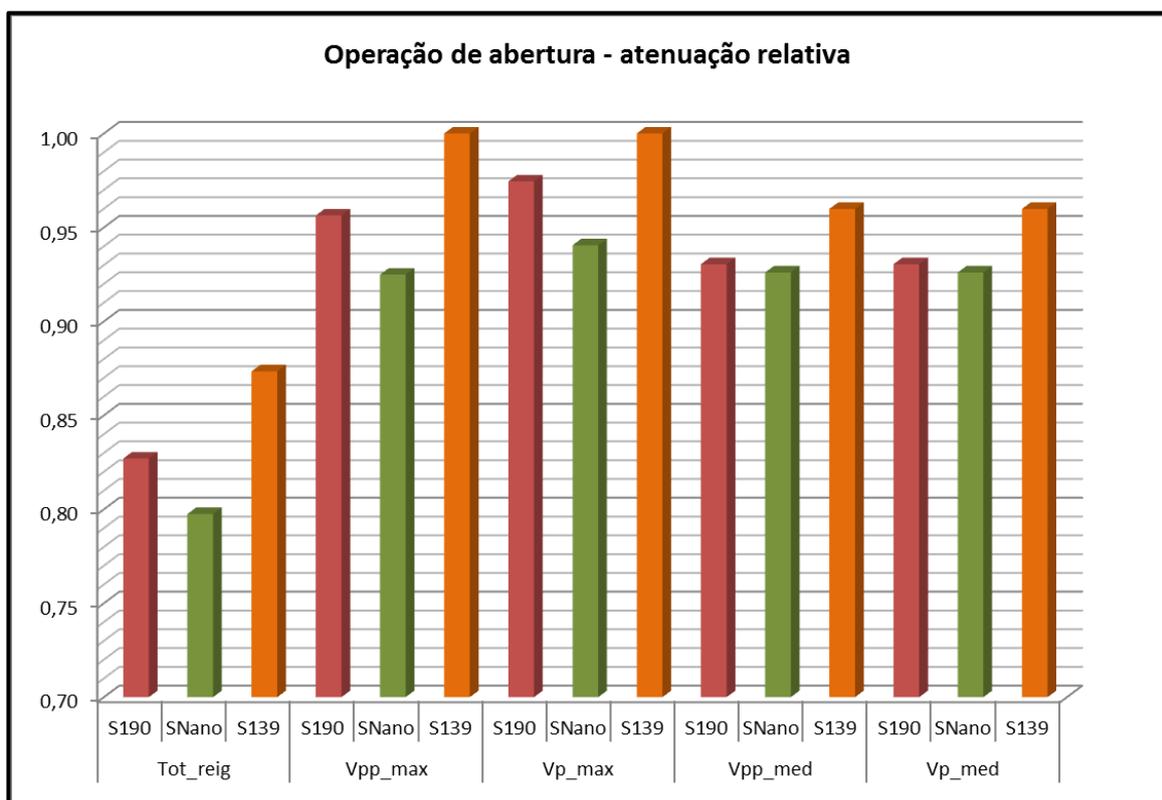


Figura 44 – Gráfico mostrando valores relativos das variáveis Tot_Reig, Vpp_max, Vp_max, Vpp_med, e Vp_med durante operação de abertura da chave seccionadora.

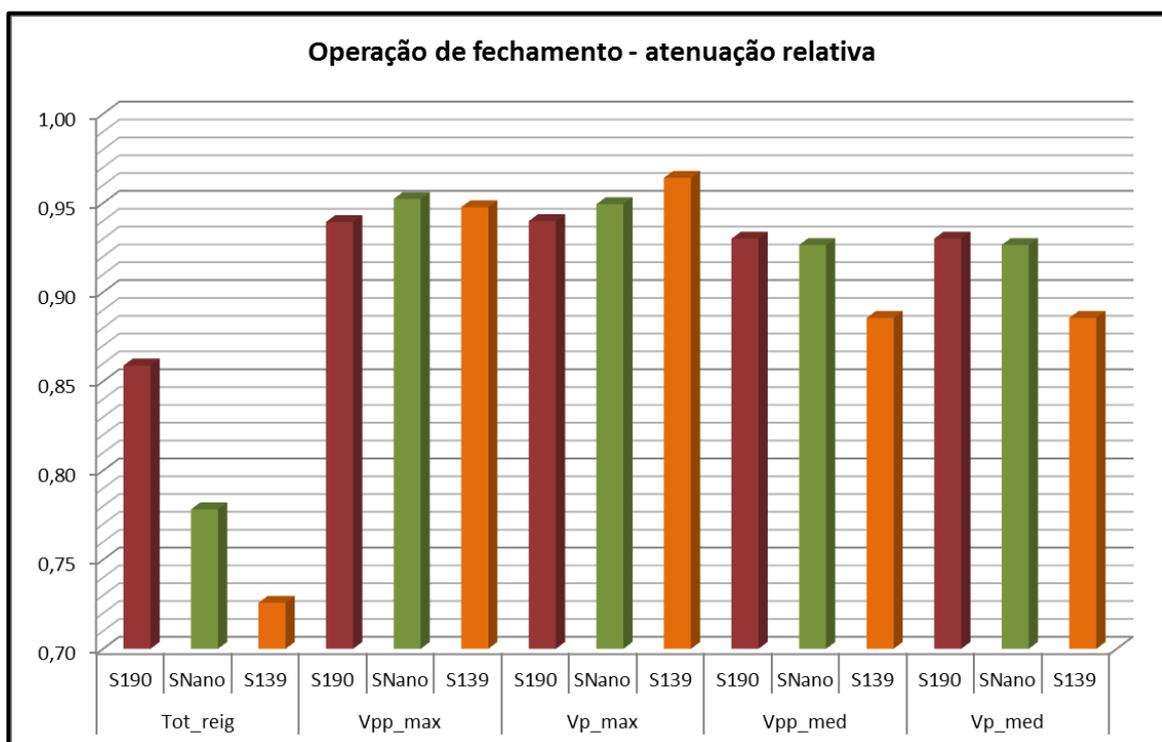


Figura 45 - Gráfico mostrando valores relativos das variáveis Tot_Reig, Vpp_max, Vp_max, Vpp_med, e Vp_med durante operação de fechamento da chave seccionadora.

Mesmo as 120 amostras tendo sido coletadas em condições o mais similares possível quanto às condições externas como tensão aplicada e acionamento da chave seccionadora, observa-se uma grande dispersão nos valores das sobretensões. Tecnicamente isto se deve, principalmente, aos diferentes ângulos de fase da tensão em que ocorre separação dos contatos e na sequência de condições termodinâmicas que se estabelecem as reignições do arco elétrico. As, as amostras coletadas então podem não refletir as características que seriam obtidas com um número muito maior de operações.

Estatisticamente, busca-se ter os valores da média, “ μ ” e do desvio padrão “ σ ” da “população”, mas o que se tem são os valores da média “ \bar{X} ” e do desvio padrão “ S ” das amostras, sujeitos, portanto a uma probabilidade de apresentarem um erro entre os valores obtidos nas amostragens em relação aos valores da população.

Como forma de visualizar a probabilidade de erro nas conclusões a partir das amostras analisadas, mostram-se as curvas de distribuição de probabilidade para as médias amostrais de Tot_Reig na abertura sem supressor, Tabela 7, e na abertura com supressor S_Nano, Tabela 9, considerando os valores de “ μ ” e “ σ ”, como os valores encontrados para “ \bar{X} ” e “ S ”, Figura 46, obtidas pela aplicação do “Teorema do Valor Central do Limite” com número de amostras, $n = 15$, Equação 4 [51].

O teorema do valor central do limite é enunciado como:

Se estivermos amostrando de uma população que tenha uma distribuição desconhecida de probabilidades, a distribuição amostral da média da amostra será aproximadamente normal, com média “ μ ” e variância “ σ^2/n ”, se n da amostra for grande [51].

e representado como na Equação 4.

$$\bar{X}: N\left(\mu; \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right) \quad (\text{Equação 4})$$

$$\bar{X}_{Tot_Reig_SemSupressor} = N\left(15,8; \frac{3,69}{\sqrt{15}}\right) = N(15,8; 0,95)$$

$$\bar{X}_{Tot_Reig_Supressor_S_Nano} = N\left(12,6; \frac{2,44}{\sqrt{15}}\right) = N(12,6; 0,63)$$

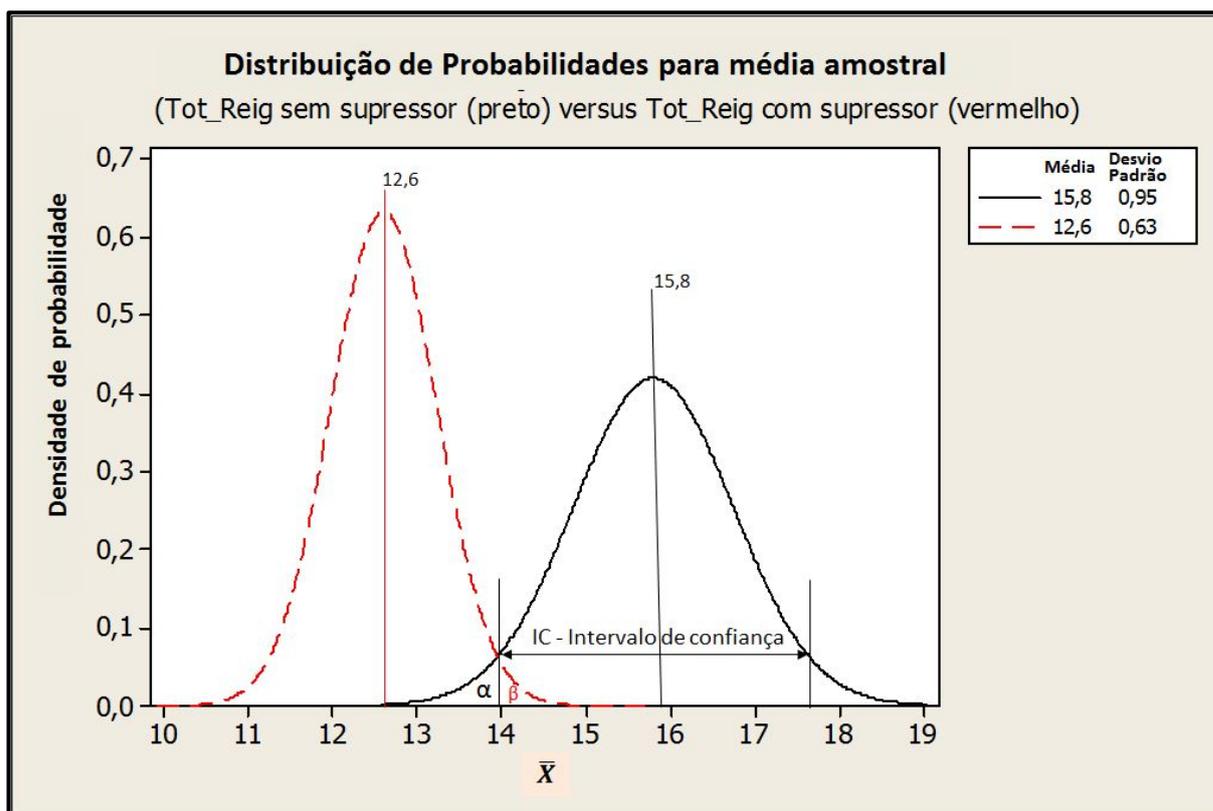


Figura 46 – Distribuição de probabilidades para médias amostrais de Tot_Reig sem supressor e Tot_Reig com supressor S_Nano.

Ainda na Figura 46, considerando um intervalo de confiança, IC, de 3,6 ($\pm 1,8$) para a média amostral de Tot_Reig sem supressor, tem-se uma probabilidade “ α ” de que mesmo sendo uma abertura sem supressor a média amostral fique fora do intervalo de confiança. Assim como se observa existir uma probabilidade “ β ” de que mesmo sendo uma abertura com supressor S_Nano, tenha-se uma média de abertura dentro do intervalo de confiança das médias sem supressor.

Estas duas probabilidades de erro, “ α ” e “ β ” ocorrem somente quando as distribuições têm valores em comum, ou seja, as caudas se sobrepõem, como ocorrem nos casos tanto das quantidades de reignições quanto nos dos valores das sobretensões durante as reignições.

No “Teste de Hipóteses” [51] e [52], estas probabilidades são também citadas como “Erro Tipo I” (α) e “Erro Tipo II” (β). A Figura 47 apresenta uma visão gráfica das quatro opções de conclusão a que podemos chegar em um teste de hipóteses, sendo duas corretas ou verdadeiras, e duas incorretas ou falsas.

- Sendo H_0 verdadeira, aceitá-la, correto;
- Sendo H_0 verdadeira, rejeitá-la, aceitando H_1 , incorreto, Erro Tipo I (α);

- Sendo H_1 verdadeira, rejeitá-la, aceitando H_0 , incorreto, Erro Tipo II (β);
- Sendo H_1 verdadeira, aceita-la, rejeitando H_0 , correto.

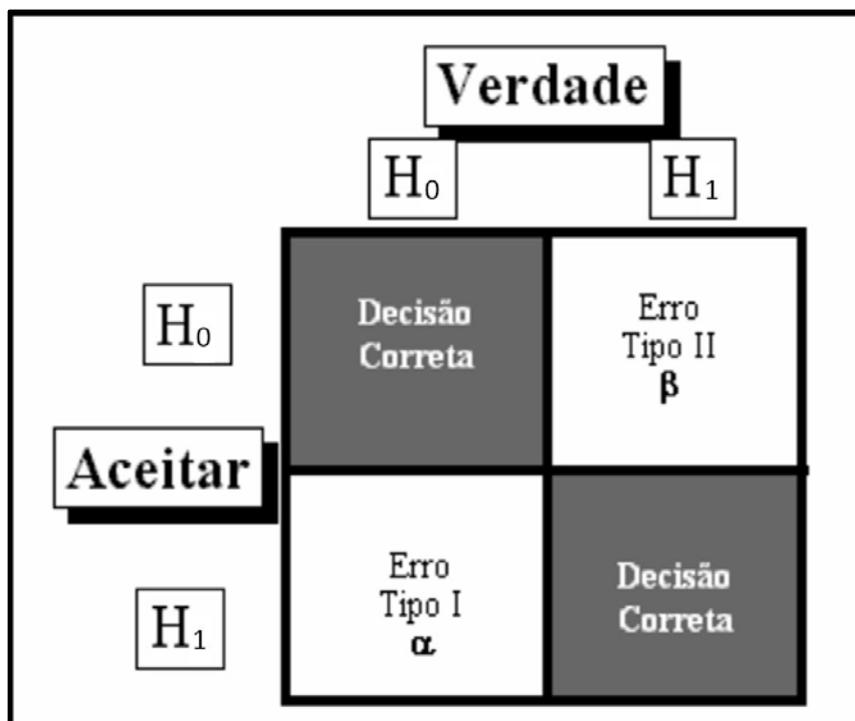


Figura 47 – Possibilidades de conclusão em um teste de hipóteses.
Fonte: [52]

No teste de hipóteses, a análise das amostras deve permitir que se chegue à opção por uma das duas hipóteses, uma vez que as mesmas devem ser elaboradas de forma a serem mutuamente excludentes, e informar também qual seria a possibilidade de se cometer os erros tipo I (α), ou tipo II (β). O balanço entre os erros tipo I (α), ou tipo II (β) esta relacionado ao intervalo de confiança.

Segundo Montgomery [51] e Balestrassi [52], um intervalo de confiança de 95 %, deixando a probabilidade do erro tipo I (α) em 5%, é uma boa estimativa para a maioria dos processos de decisão.

Por facilidade e padronização foi utilizada a ferramenta do software de estatística “Minitab®”, com o aplicativo “Two-Sample t ”, que a partir da amostra de dois testes independentes, fornece o valor “P” (“ P -value”), definido por Montgomery [51] como:

“O valor de P é o menor valor de α que conduz à rejeição da hipótese nula H_0 , com os dados fornecidos.”

A forma gráfica apresentada pelo Minitab é a notação “*Boxplot*”, ou diagrama de caixa [51], Figura 48, que apresenta simultaneamente várias características da amostra como a mediana, a média, a dispersão, os desvios de simetria e uma notação não usual que são os “*outliers*”, ou seja, pontos que estão distantes mais do que 1,5 vezes a distância IQR, interquartil ($q_3 - q_1$) abaixo de q_1 ou acima de q_3 .

Será apresentada como hipótese nula, H_0 , que os supressores não são efetivos, ou seja, não produzem atenuação e, portanto a diferença das médias para as variáveis testadas sem e com supressor deve ser zero, ($\mu_0 - \mu_1 = 0$), enquanto que a hipótese alternativa H_1 , será de que os supressores são efetivos e, portanto a diferença das médias deve ser diferente de zero e unilateral, sendo que os valores sem supressor devem ser sempre maiores do que os valores com supressor ($\mu_0 > \mu_1$).

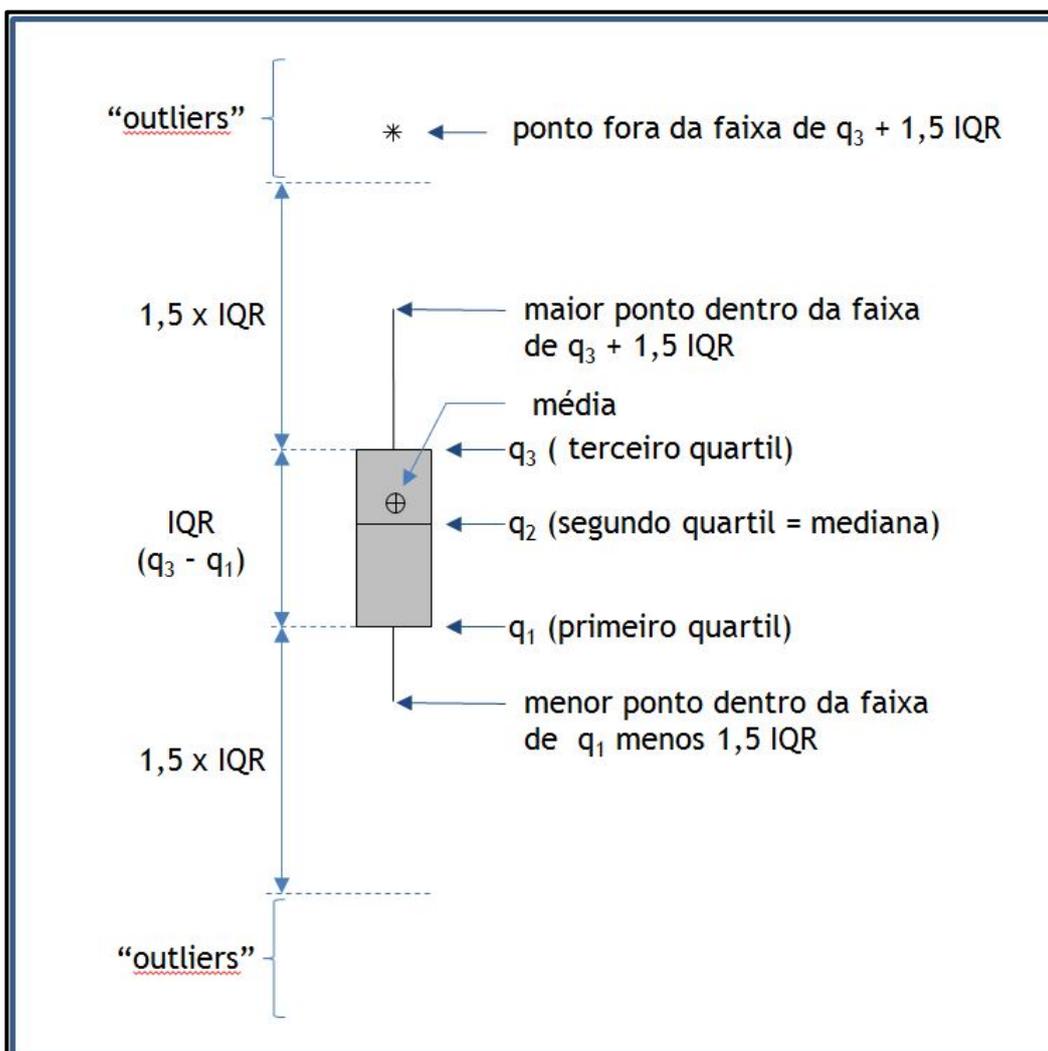


Figura 48 – Diagrama de caixa, “*Boxplot*”, com indicação da forma em que são representadas as principais características da amostra.

Fonte: Adaptado de [51]

Foram realizados 30 testes de hipótese no Minitab “Two-Sample t”, confrontando os valores das cinco variáveis, Tot_Reig, Vpp_max, Vp_max, Vpp_med e Vp_med, nas duas condições de manobra da chave, abertura e fechamento, sem o uso de supressores, contra a condição com supressor, para os três tipos de supressores, S_139, S_Nano e S_190.

Os resultados obtidos pelo Minitab na forma numérica e gráfica para cada teste estão mostrados no apêndice, Figuras 135 a 149.

Da forma numérica foram extraídos os valores de “*P-value*” para cada tipo de supressor, agrupados por variável e tipo de manobra, Tabela 11.

Os valores da Tabela 11 são mostrados na forma de gráfico de colunas na Figura 49, onde se evidencia a semelhança com os gráficos das Figuras 44 e 45, conduzindo às mesmas conclusões da análise prévia realizada apenas com os valores médios obtidos das Tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 11 – Valores de “*P value*” obtidos nos 30 testes de hipótese realizados.

Variável	Operação	Valores de “ <i>P value</i> ”		
		Supressor		
		S_139	S_Nano	S_190
Tot_Reig	Abert.	0,039	0,005	0,010
	Fech.	0,000	0,000	0,010
Vpp_max	Abert.	0,636	0,158	0,285
	Fech.	0,234	0,272	0,230
Vp_max	Abert.	0,808	0,232	0,368
	Fech.	0,320	0,270	0,232
Vpp_med	Abert.	0,293	0,179	0,194
	Fech.	0,054	0,159	0,173
Vp_med	Abert.	0,293	0,179	0,194
	Fech.	0,054	0,159	0,173

Pode-se agora complementar a análise anterior realizada pela inspeção visual dos gráficos das Figuras 44 e 45, tendo por base os valores de “*P value*” da Tabela 11, mostrados de forma gráfica na Figura 49, que permitem afirmar ser correto rejeitar a hipótese de que os supressores não são efetivos (H_0), em favor da

hipótese de que os *supressores são efetivos* (H_1), com probabilidade de Erro Tipo I (α), ou “*P-value*”, que é o menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula.

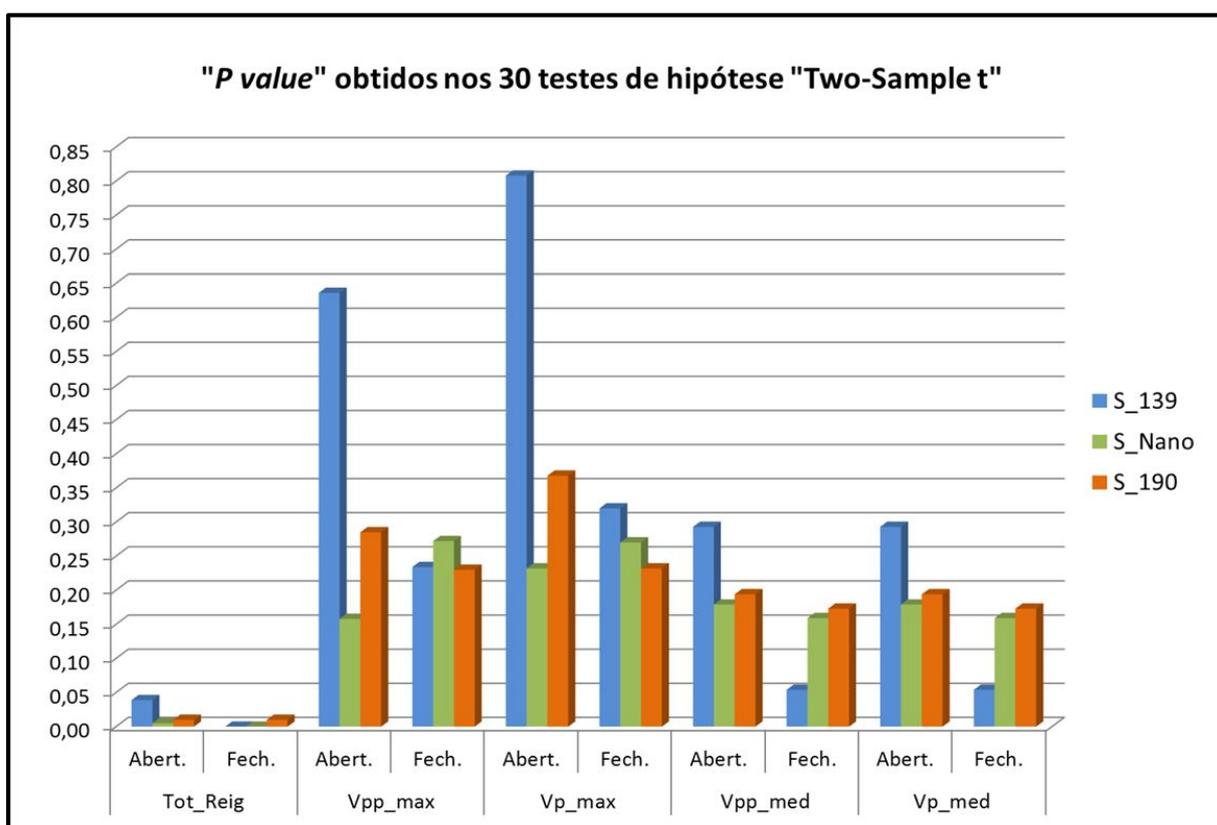


Figura 49 – Gráfico com “*P values*” obtidos nos 30 testes de hipótese agrupados por variável e tipo de manobra.

Os testes de hipóteses nas duas condições de manobra, abertura e fechamento, com os três tipos de supressores, consideradas as cinco variáveis analisadas demonstram que:

- 1) **Tot_Reig** – O número de reignições com o uso de supressores é inferior ao número de reignições sem o uso de supressores, tanto para manobras de abertura como para manobras de fechamento da chave seccionadora, tendo esta afirmativa o menor grau incerteza com relação às demais. “*P-value*” variou de 0,000 a 0,039, fazendo esta ser uma afirmativa forte, pois atende ao proposto por Montgomery [51] e Balestrassi [52], com “*P-value*” inferior a 0,05, o que garante um intervalo de confiança maior que 0,95;

- 2) **Vpp_max** – A tensão pico a pico máxima nas reignições com o uso de supressores também é inferior à tensão pico a pico máxima sem o uso de supressores. Tomando como exemplo o supressor S_Nano, os valores de “*P-value*” foram de 0,158 na abertura e 0,272 no fechamento. Embora não atendendo ao critério de serem inferiores a 0,05 para se ter um intervalo de confiança de 0,95, permitem rejeitar a hipótese H_0 , se o intervalo de confiança for reduzido para 0,73;
- 3) **Vp_max** – A tensão de pico máxima nas reignições com o uso de supressores também é inferior à tensão de pico máxima sem o uso de supressores. Tomando como exemplo o supressor S_Nano, os valores de “*P-value*” foram de 0,232 na abertura e 0,270 no fechamento. Embora também não atendendo ao critério de serem inferiores a 0,05 para se ter um intervalo de confiança de 0,95, permitem rejeitar a hipótese H_0 , se o intervalo de confiança, da mesma forma que em II, for reduzido para 0,73;
- 4) **Vpp_med** – A tensão pico a pico média nas reignições com o uso de supressores também é inferior à tensão pico a pico média sem o uso de supressores. Tomando como exemplo o supressor S_Nano, os valores de “*P-value*” foram de 0,179 na abertura e 0,159 no fechamento. Embora também não atendendo ao critério de serem inferiores a 0,05 para se ter um intervalo de confiança de 0,95, permitem rejeitar a hipótese H_0 , se o intervalo de confiança, for reduzido para 0,82;
- 5) **Vp_med** – A tensão de pico média nas reignições com o uso de supressores também é inferior à tensão pico média sem o uso de supressores. Tomando como exemplo o supressor S_Nano, da mesma forma que em IV, os valores de “*P-value*” foram de 0,179 na abertura e 0,159 no fechamento. Embora também não atendendo ao critério de serem inferiores a 0,05 para se ter um intervalo de confiança de 0,95, permitem rejeitar a hipótese H_0 , se o intervalo de confiança, for reduzido para 0,82.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nos três níveis de desenvolvimento propostos, Modelagem Computacional, Modelo Reduzido e Ensaio em um trecho de Subestação de 500 kV, a hipótese de que é possível conseguir a atenuação das **Sobretensões Transitórias Muito Rápidas (VFTO)** utilizando elementos passivos de baixo custo foi validada.

Na Modelagem Computacional e no Modelo Reduzido foram realizadas simulações de uma só reignição do arco elétrico, enquanto nos Ensaio no trecho de Subestação de 500 kV foram realizadas manobras de abertura e fechamento da chave seccionadora, com o registro da sequência de dezenas de reignições, como de fato ocorre na condição operativa de uma subestação blindada a SF₆.

Na Modelagem Computacional e no Modelo Reduzido, os níveis de atenuação apontados para a tensão de pico foram de respectivamente uma redução para 50% e 60% dos valores com supressores comparados com os valores sem supressores.

Nos ensaios no trecho de Subestação de 500 kV surgiu a possibilidade de além da comparação dos valores das sobretensões, comparar também a redução do número de reignições, sendo que em cada reignição ocorre uma nova sobretensão e naturalmente uma nova solicitação ao dielétrico dos equipamentos.

Nos ensaios no trecho de subestação de 500 kV a atenuação verificada para o número de reignições foi de uma redução para 80 % dos valores com o uso de supressores comparados com valores sem supressores, enquanto a atenuação para os valores das sobretensões foi para 95 % do valor com o uso de supressores comparados com valores sem supressores, apresentando uma redução de 5 %.

Esta redução de 5 %, embora já significativa para o aumento da vida útil dos equipamentos, principalmente se considerada a redução de 20 % no número de reignições, gera uma proposta de trabalhos futuros no sentido de um melhor entendimento da influência da do material magnético, da geometria dos toroides, assim como da forma de sua distribuição sobre o condutor do barramento blindado, visando atingir níveis de redução mais próximos aos verificados na Modelagem Computacional e no Modelo Reduzido.

Este trabalho também levanta a necessidade de que as entidades normatizadoras, por um lado, e os fabricantes e usuários de equipamentos por outro,

contemplem em nível de especificação, projeto e ensaios, a verificação da suportabilidade dos equipamentos a uma faixa maior de frequências, estendendo a faixa de frequências esperadas para a envoltória do transitório, f_2 , de 300 kHz para valores acima de 5,0 MHz, além de estudos que permitam o melhor entendimento de como ocorre a degradação do dielétrico dos equipamentos frente às sobretensões muito rápidas, que embora de baixa energia, tem em alguns casos a condição de ocorrência repetitiva, gerando degradação por efeito acumulativo.

No âmbito do grupo Institutos Lactec/Copel/Itaipu, já foram iniciadas novas pesquisas visando o desenvolvimento e calibração de sensores para o registro dos transitórios em alta frequência, e novos ensaios visando o entendimento da influência da geometria e distribuição dos toroides relativamente ao barramento blindado da GIS.

REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE WORKING GROUP AG D1.03. **Very Fast Transient Overvoltages (VFTO) in Gas-insulated UHV Substations**. CIGRE, 2012.
- [2] IEC. **IEC 60071 Insulation co-ordination, Definitions, principles and rules**. IEC, 2006.
- [3] KOCH, D. **SF6 properties and use in MV and HV switchgear**. Schneider Electric. 2003.
- [4] IEC. **IEC TR 60071-4**. 2004.
- [5] RAGALLER, K. **Surges in High-Voltage Networks**. New York Plenum Press, 1980.
- [6] CIGRÉ-BRASIL W.G.A2/C4-03. **Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência**. CIGRÉ, 2011.
- [7] CIGRÉ - WG A2/C4.39. **Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System**. CIGRÉ, 2013.
- [8] BOGGS, S. A.; CHU, F. Y.; FUJIMOTO, N. **Disconnect switch induced transients and trapped charge in GAS-Insulated substations**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-101, p. 3593-3602, Outubro 1982.
- [9] WG CIGRÉ 33-3. **Very fast transient phenomena associated with Gas Insulated Substations**. Paris CIGRÉ, 1988.
- [10] LIMA F^o, J. F. et al. **Tucuruí's Generator Step-Up Transformer Failures due to Very Fast Transients in GIS**. International Conference on Power Transients, Seattle, p. 280-285, Junho 1997.
- [11] SOARES, J. C. **Dissertação de Mestrado: "Avaliação da suficiência dos ensaios elétricos especificados para aquisição de transformadores elevadores submetidos às sobretensões de frente de onda muito rápida**. IEP - Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2011.
- [12] MORCHED, A. S. et al. **Analysis of internal winding stresses in EHV generator step-up transformer failures**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 2, p. 888-894, Abril 1996.

- [13] MENDES, J. C. **Tese de Doutorado: "Redução de falhas em grandes transformadores de alta tensão"**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [14] KIENY, C. et al. **Distribution of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Windings**. CIGRÉ 1992 Session, Paris, v. 12-204, p. 1-6, Agosto-Setembro 1992.
- [15] FREIRE, A. R.; PENA, M. C. M. **Estudo de tensões transitórias de alta frequência e requisitos para especificação de transformadores**. XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, v. GSC-29, Outubro 2005.
- [16] YUANFANG, W.; ZHOU, C. **Experimental Studies on the Use of MOV in Transformer Windings Inner Protection**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 2, p. 1441-1446, Abril 2005.
- [17] CANCINO, A. et al. **In service failure of 230 kV transformers due to Steep-Front lightning over voltages at Mexican west coast**. CIGRÉ WG A2-201, 2006.
- [18] HORI, M. et al. **Internal Winding Failure due to Resonance Overvoltage in Distribution Transformer Caused by Winter Lightning**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 21, n. 3, p. 1600-1606, Julho 2006.
- [19] GUSTAVSEN, B.; BREDE, A. P.; TANDE, J. O. **Multivariate Analysis of Transformer Resonant Overvoltages in Power Stations**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, n. 4, p. 2563-2572, Outubro 2011.
- [20] MAC_ELROY, A. J. **On the significance of recent EHV Transformer Failures Involving Winding Resonance**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-94, n. 4, p. 1301-1316, Julho 1975.
- [21] CIGRÉ WG 12-07. **Resonance Behaviour of High-Voltage Transformers**. CIGRÉ 1984 Session - International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, p. 1-8, Agosto-Setembro 1984.
- [22] GUSTAVSEN, B. **Study of Transformer Resonant Overvoltage Caused by Cable-Transformer High-Frequency Interaction**. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 25, n. 2, p. 770-779, Abril 2010.
- [23] SHIPP, D. D. et al. **Transformer failure due to circuit breaker induced switching transients**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 22, n. 1, p. 1-10, Janeiro 2011.
- [24] LAPWORTH, J. A.; JARMAN, P. N.; BRECKENRIDGE, T. **Transformer internal over-voltages caused by remote energization**. CIGRÉ WG A2-305, p. 1-11, 2006.

- [25] KRESS, K.; KÖNIG, D.; MÜLLER, W. **Travelling waves as causes of internal resonance phenomena in coils and windings**. CIGRÉ 1992 Session - WG 12-303, Paris, p. 1-7, Agosto-Setembro 1992.
- [26] IEEE VERY FAST TRANSIENTS TASK FORCE. **Modeling Guidelines for Very Fast Transients in Gas Insulated Substations**. IEEE Transactions on Power Delivery, p. 2028-2035 1996.
- [27] ROCHA, A. C. et al. **Assessment of Transformer Modeling Impact on Transient Recovery Voltage in Transformer Limited Faults**. CIGRÉ A3-107, 2012.
- [28] FURNAS CENTRAIS ELETRICAS / ITAIPU BINACIONAL. **Estudo de Sobretensões Transitórias**. Itaipu Binacional. Foz do Iguaçu 1986. (6380-10-19507-P).
- [29] DEL POZO, M. D. et al. **Field measurements and modeling of high frequency transients during disconnect switch operations in EHV Substations**. CIGRÉ A3-207, 2010.
- [30] SHIBUYA, Y.; FUJITA, S. **High Frequency Model of Transformer Winding**. Electrical Engineering in Japan, v. 146, n. 3, p. 201-207, Fevereiro 2004.
- [31] SZEWCZYK, M. et al. **Impact of Disconnect Design on Insulation Coordination in Gas-Insulated UHV Switchgear Substations**. Electrical Review, p. 35-38, 2013.
- [32] KUMAR, V. V.; THOMAS, J. M.; NAIDU, M. S. **Influence of Switching Conditions on VFTO Magnitudes in GIS**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 4, p. 539-544, Outubro 2001.
- [33] HONORATI, O.; SANTINI, E. **New approach to the analysis of impulse voltage distribution in transformer windings**. IEEE Proceedings, v. 137, n. 4, p. 283-290, Julho 1990.
- [34] DE, A.; CHATTERJEE, N. **Part winding resonance: Demerit of interleaved high-voltage transformer winding**. IEEE Procedures on Electric Power Application, v. 147, n. 3, p. 167-174, Maio 2000.
- [35] YE, B. et al. **Study on Very Fast Transient Overvoltage of Closing No-load China UHV Transmission Demonstration Project Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1000 kV Transmission Lines**. International Journal of Grid Distribution Computing, v. 7, n. 3, p. 273-286, 2014.

- [36] IEC TR 61321-1. **High Voltage testing techniques with very fast impulses - Part 1: Measuring systems for very fast front overvoltages generated in gas-insulated substations.** 1994.
- [37] BOGGS, S. A.; FUJIMOTO, N. **Thechnics and Instrumentation for measurement of transients in Gas-Insulated switchgear.** IEEE Transaction on Electrical Insulation, v. EI-19, n. 2, Abril 1984.
- [38] BURCH, F. P. **On Potential Dividers for Cathode Ray Oscilographs.** Phil. Mag., v. 13, n. N° 86, p. 760-774, April 1932.
- [39] MEPPELINK, J.; HOFER, P. **Design and Calibration of a High Voltage Divider for Measurement of Very Fast Transients in Gas Insulated Switchgear.** 5 Int. Symposium on High Voltage Engineering. Braunschweig 1987. (71.08).
- [40] STEPAN, L. G.; RENZ, B. A.; MACELROY, A. J. **An improved technique to measure transmission system switching surge phenomena.** IEEE PES Winter Meeting, New York, p. 1987-1991, Setembro 1972.
- [41] RIECHERT, U.; R., P. **Dielectric testing of Ultra High Voltage Equipment.** CIGRÉ-IEC Colloquium, Montreal, Maio 2016.
- [42] ONTARIO HYDRO. **Gas-Insulated Substation Reliability Research Program.** Toronto 1987.
- [43] SZEWCZYK, M. et al. **Measurements and Simulations of Very Fast Transients during Disconnector Type Testing in UHV Gas-Insulated Swtchgear.** Electrical Review, p. 150-153, 2012.
- [44] MALEWSKI, R.; DOUVILLE, J.; LAVALLÉE, L. **Measurement of Switching Transients in 735-kV substations and assesment of their severity for transformer insulation.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, p. 1380-1390, Outubro 1988.
- [45] RIECHERT, U.; HOLAUS, W. **Ultra high-voltage gas-insulated switchgear - a technology milestone.** European Transactions on Electrical Power , p. 60-82, Maio 2011.
- [46] CHAGAS, F. A. **Medição de Transitórios em Subestações Blindadas Isoladas a SF6.** VIII SNPTEE, São Paulo, v. Subgrupo VIII-I, Maio 1986.
- [47] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência.** 6ª. ed. Bookman, 2006.
- [48] BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism.** New Jersey, John Wiley & Sons, 2003.

- [49] MAGNETEC. **Magnetec - Magnet Technologie**. Disponível em: <<http://www.magnetec.de>>. Acesso em: Dezembro 2013.
- [50] MAGMATTEC. **Magmattec - Tecnologia em Materiais Magnéticos**. Disponível em: <<http://www.magmattec.com>>. Acesso em: Dezembro 2013.
- [51] RODRIGUES F^o, J. G. et al. **Very Fast Transient Overvoltage Wave Shapes in 500 kV Gas Insulated Switchgear Setup**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 32 No.3, p. 17-23, May/June 2016.
- [52] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5^a. ed. Rio de Janeiro LTC, 2012.
- [53] BALETRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. **Estatística Aplicada**. Itajubá UNIFEI, 2007.

APÊNDICE

Circuitos ATPDraw™ utilizados para modelagem computacional

- Figura 50 a Figura 52.

Oscilogramas de validação do modelo reduzido

- Figura 53 a Figura 59.

Curvas de saturação e resposta em frequência dos toroides do modelo reduzido

- Figura 60 a Figura 62.

Oscilogramas nas 72 condições com modelo reduzido

- Figura 63 a Figura 134.

Notação de saída “Boxplot” do aplicativo “Two-Sample T-Test” do “Minitab®” para os 30 testes de hipótese realizados com as cinco variáveis extraídas do conjunto de 120 oscilogramas de abertura/fechamento da chave seccionadora no trecho de 500 kV montado no laboratório de alta tensão do Instituto Lactec

- Figura 135 a Figura 149.

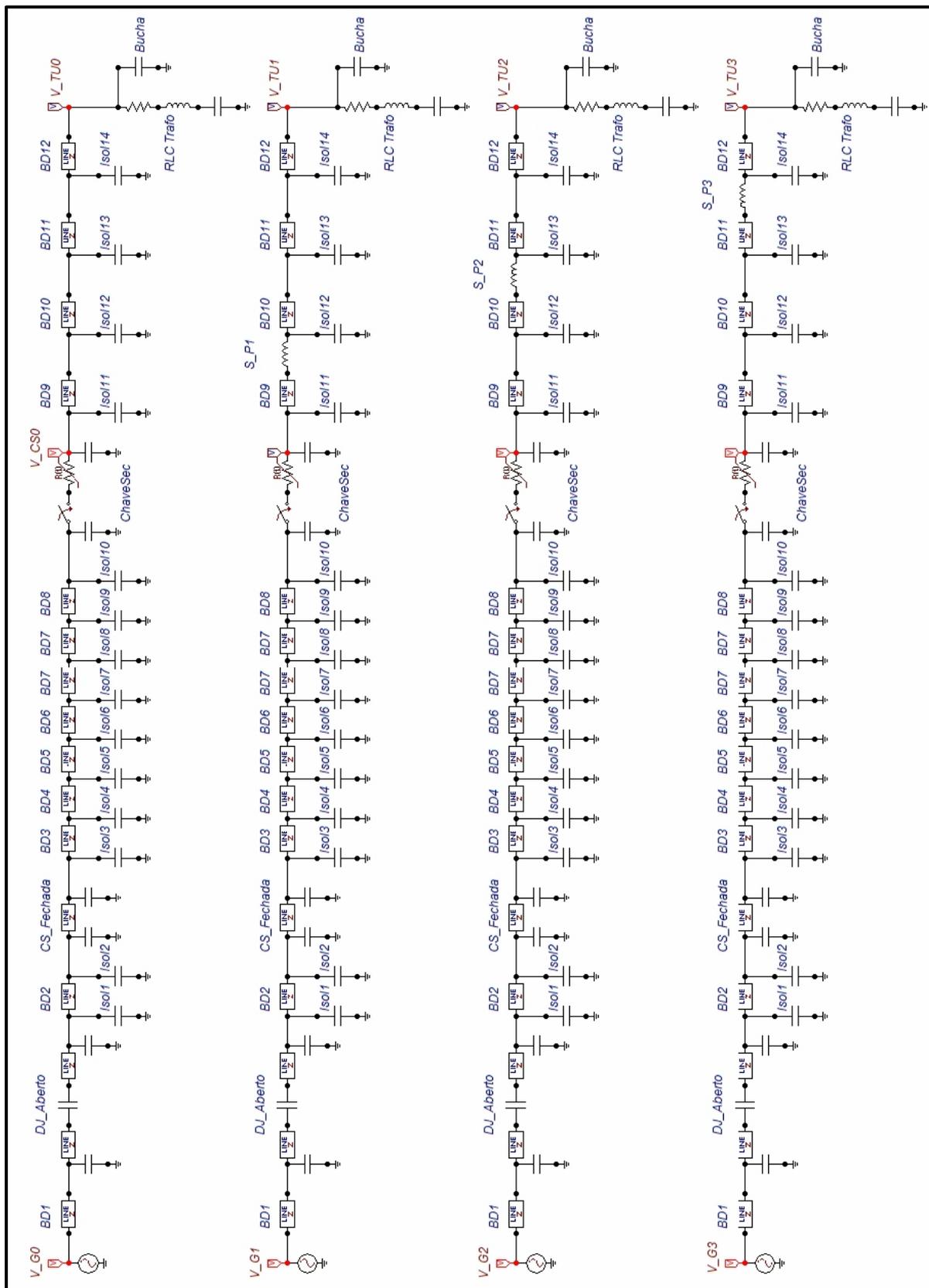


Figura 50 - Circuito ATPDraw para simulação da abertura da Chave Seccionadora, sem carga armazenada do lado do transformador

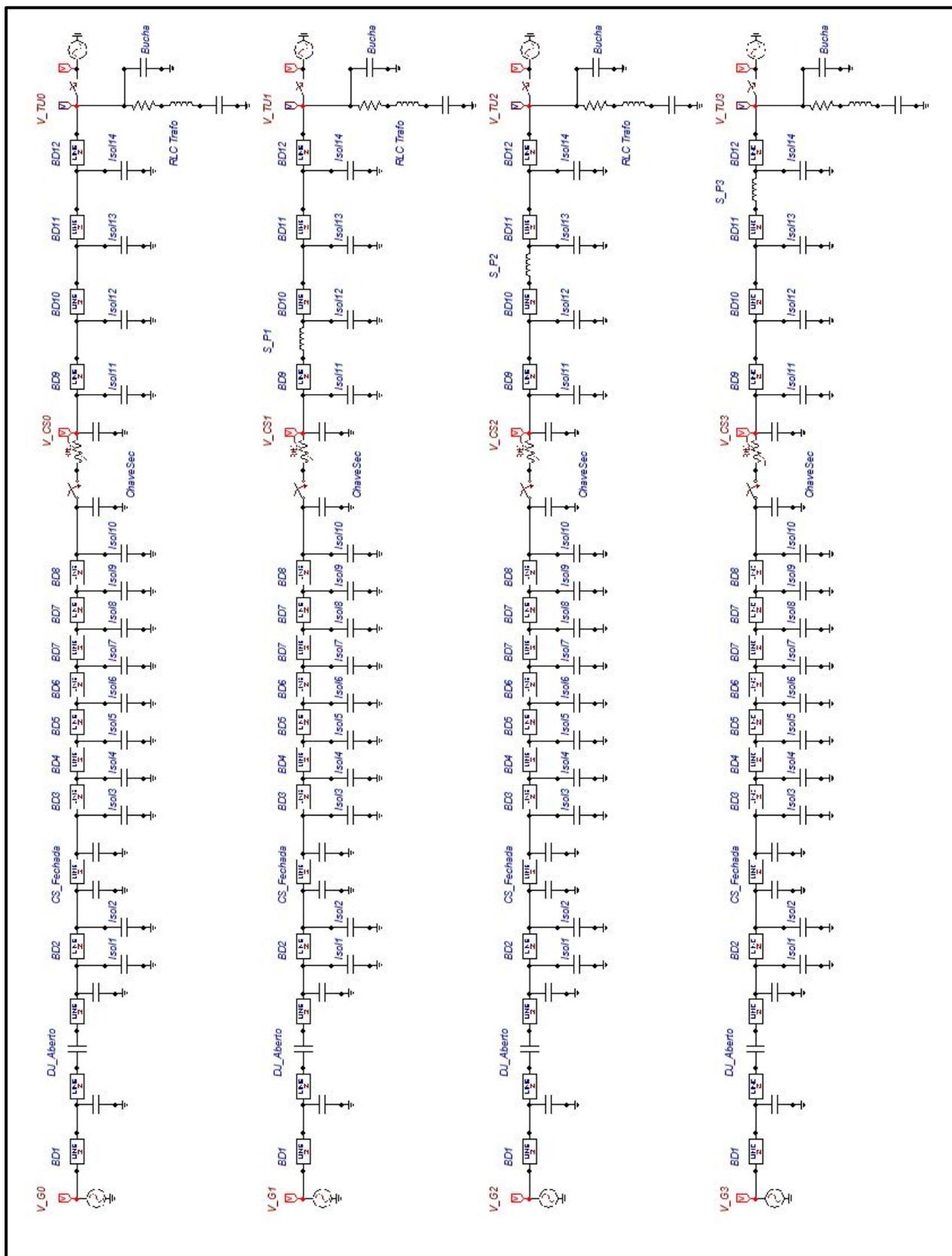


Figura 51 – Circuito ATPDraw para simulação da abertura da Chave Seccionadora, com carga armazenada do lado do transformador

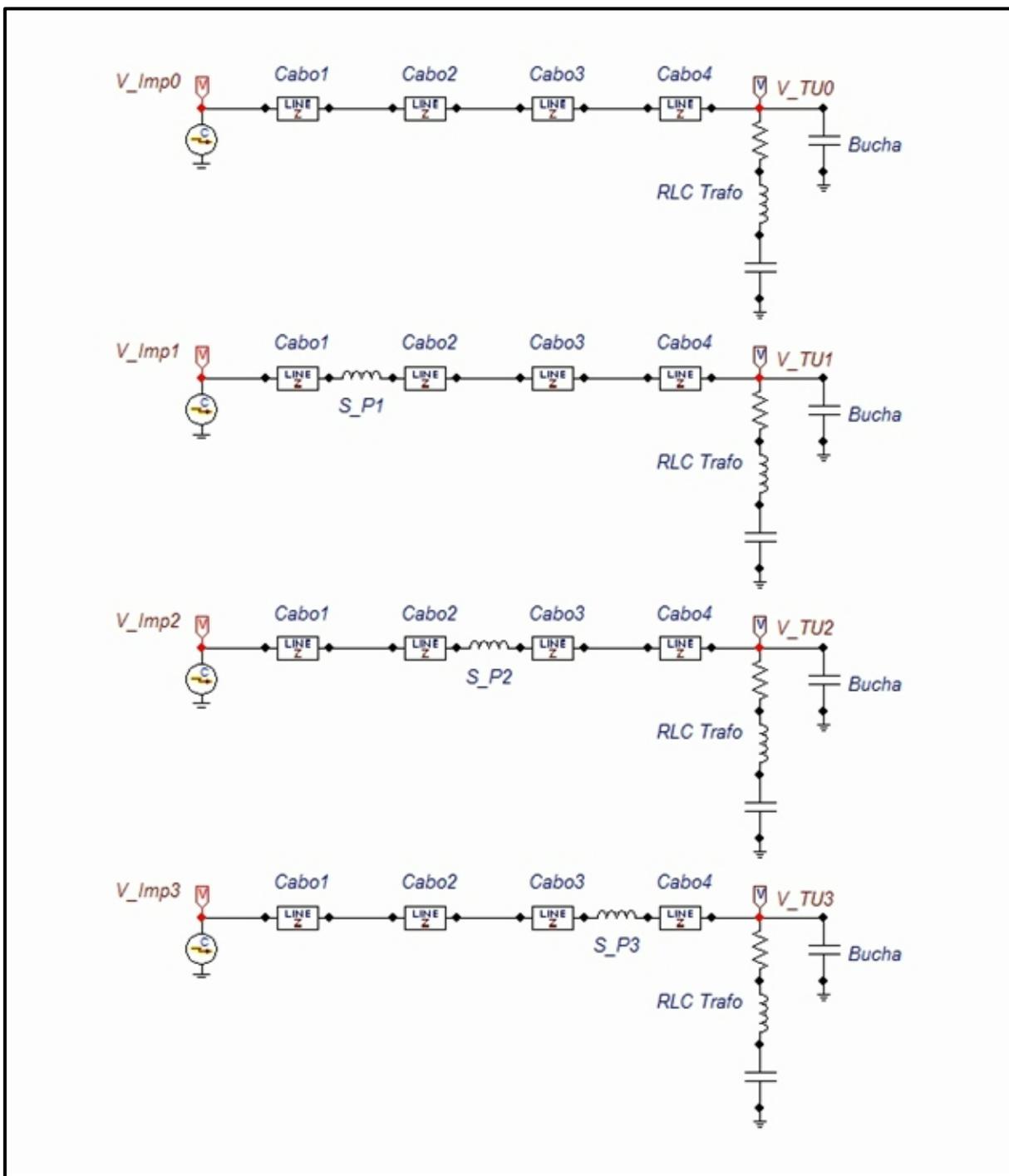


Figura 52 – Circuito ATPDraw para simulação da injeção de impulso no modelo reduzido com cabos coaxiais

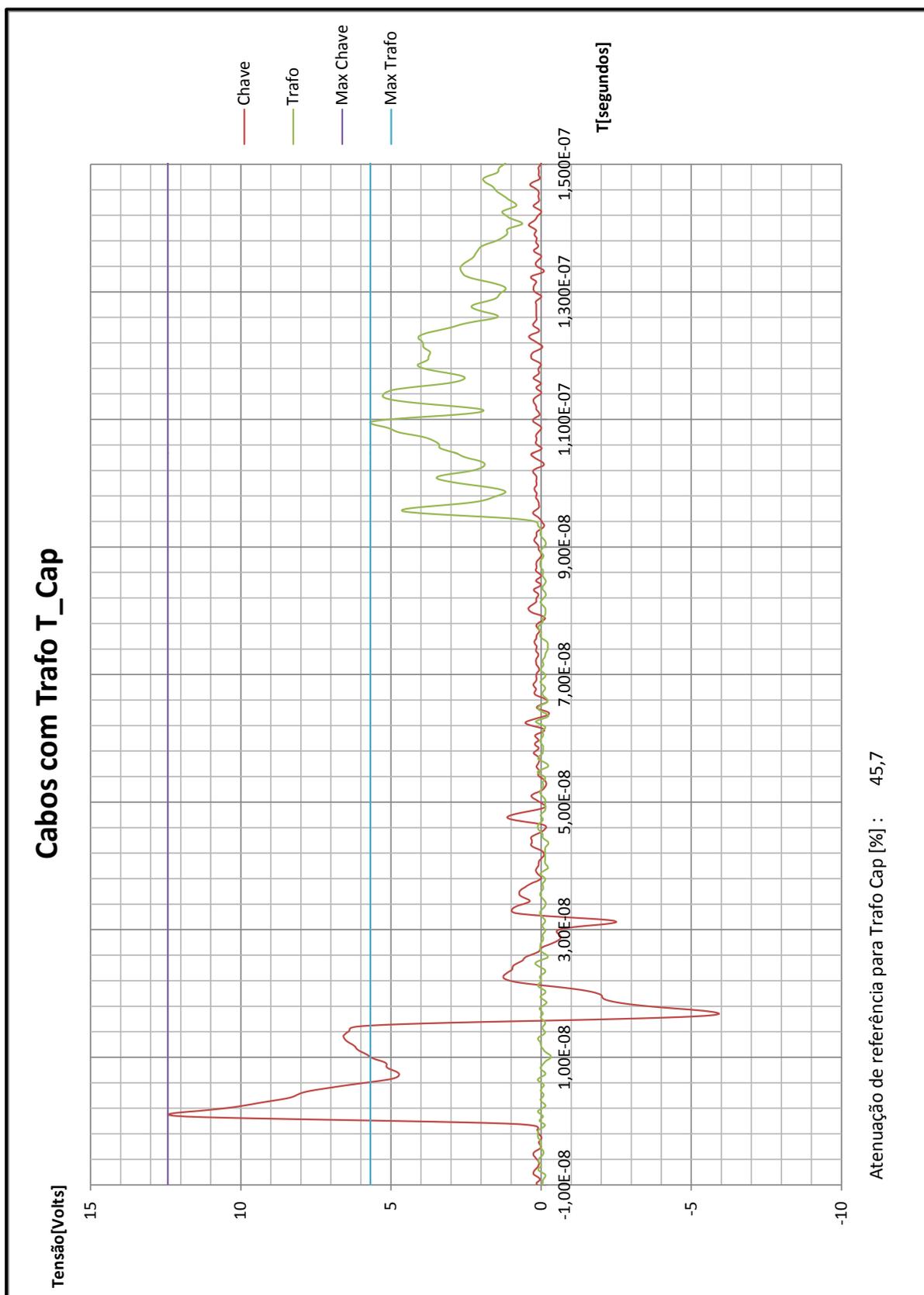


Figura 53 – Oscilograma na condição de montagem com modelo de transformador capacitivo “T_Cap”, sem supressor

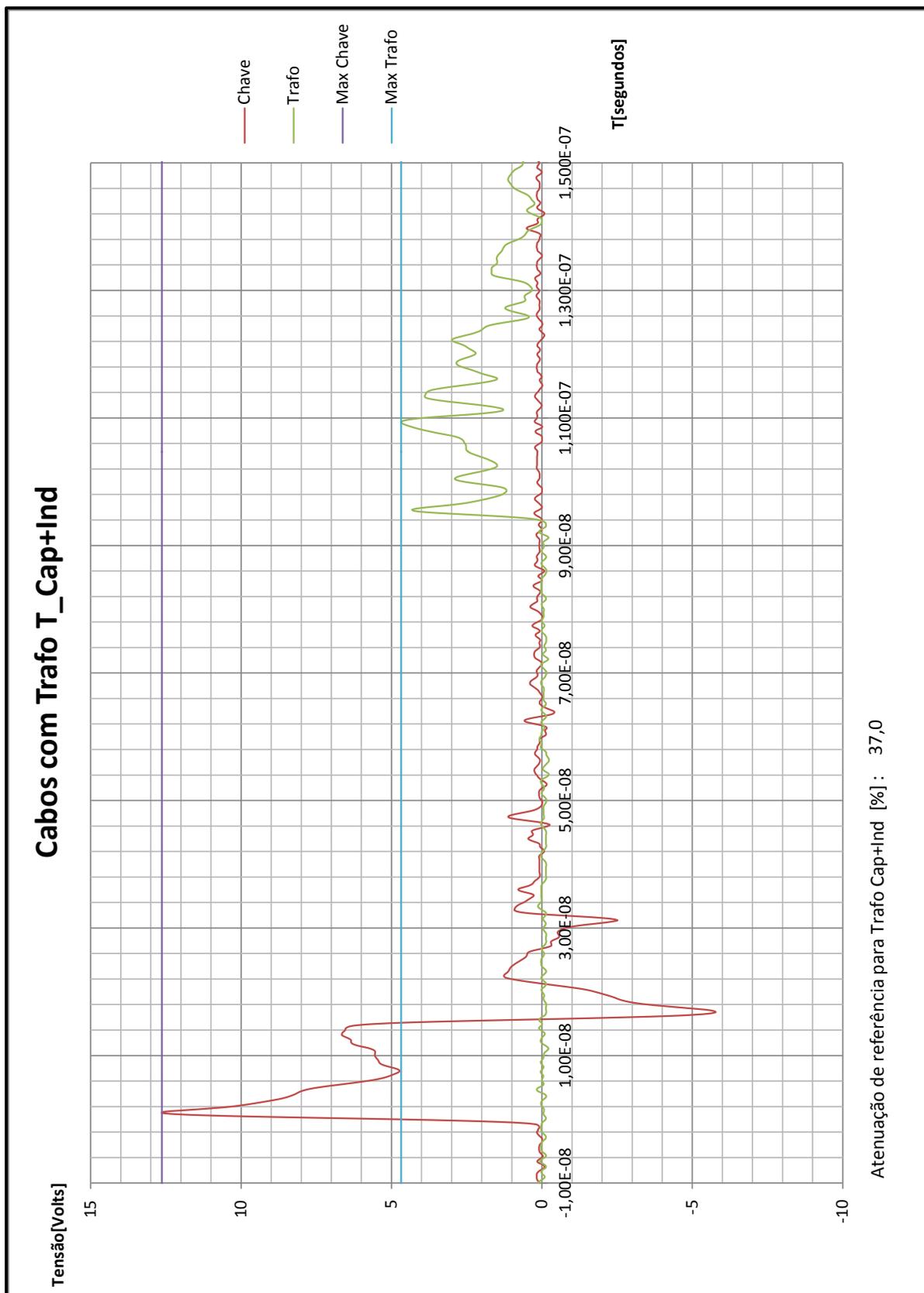


Figura 54 – Oscilograma na condição de montagem com modelo de transformador capacitivo mais ramo RLC, “T_Cap+Ind”, sem supressor

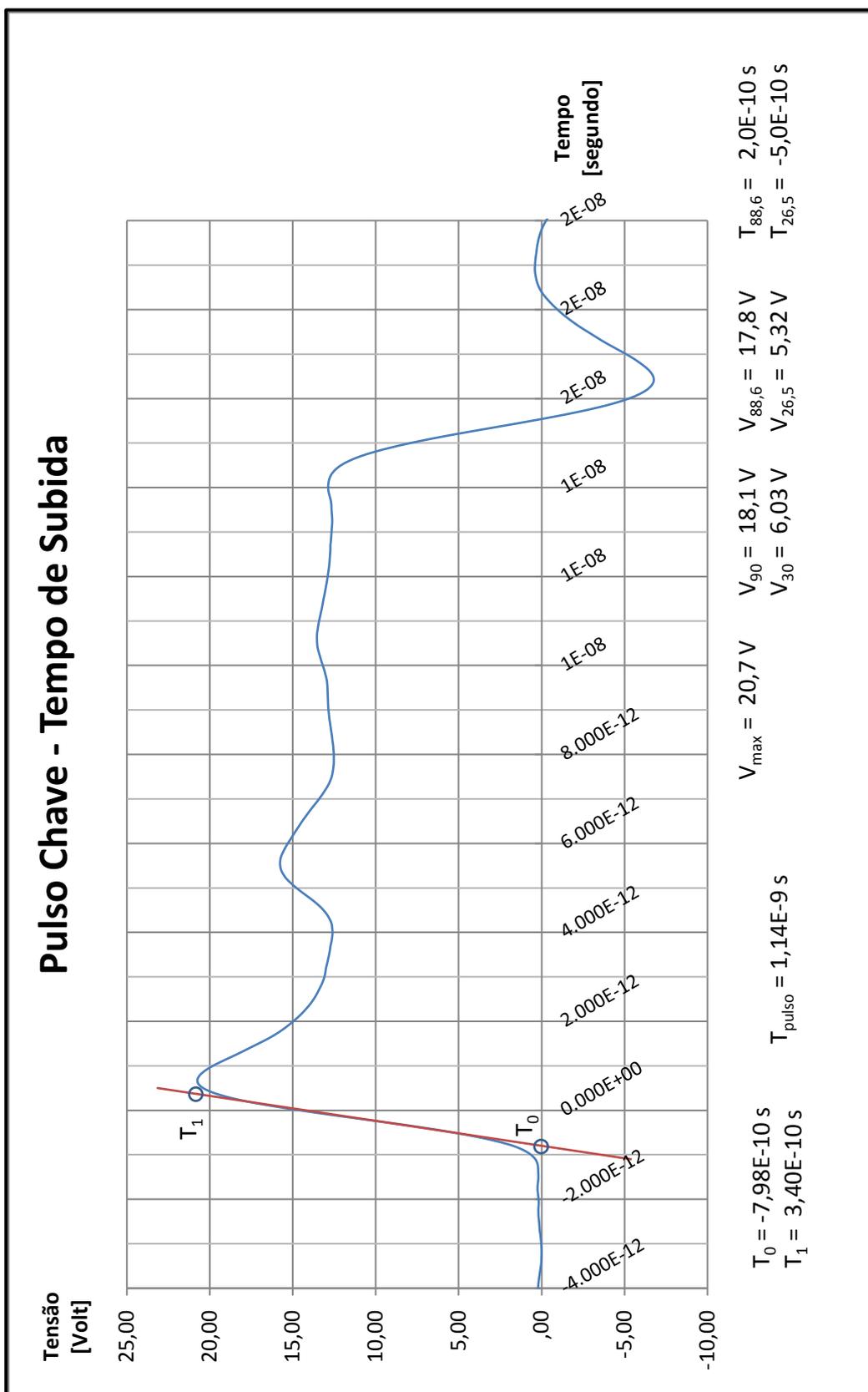


Figura 55 – Oscilograma da tensão transitória gerada pelo chaveamento do gerador de pulsos repetitivos. Tempo de subida 1,14 nano-segundos

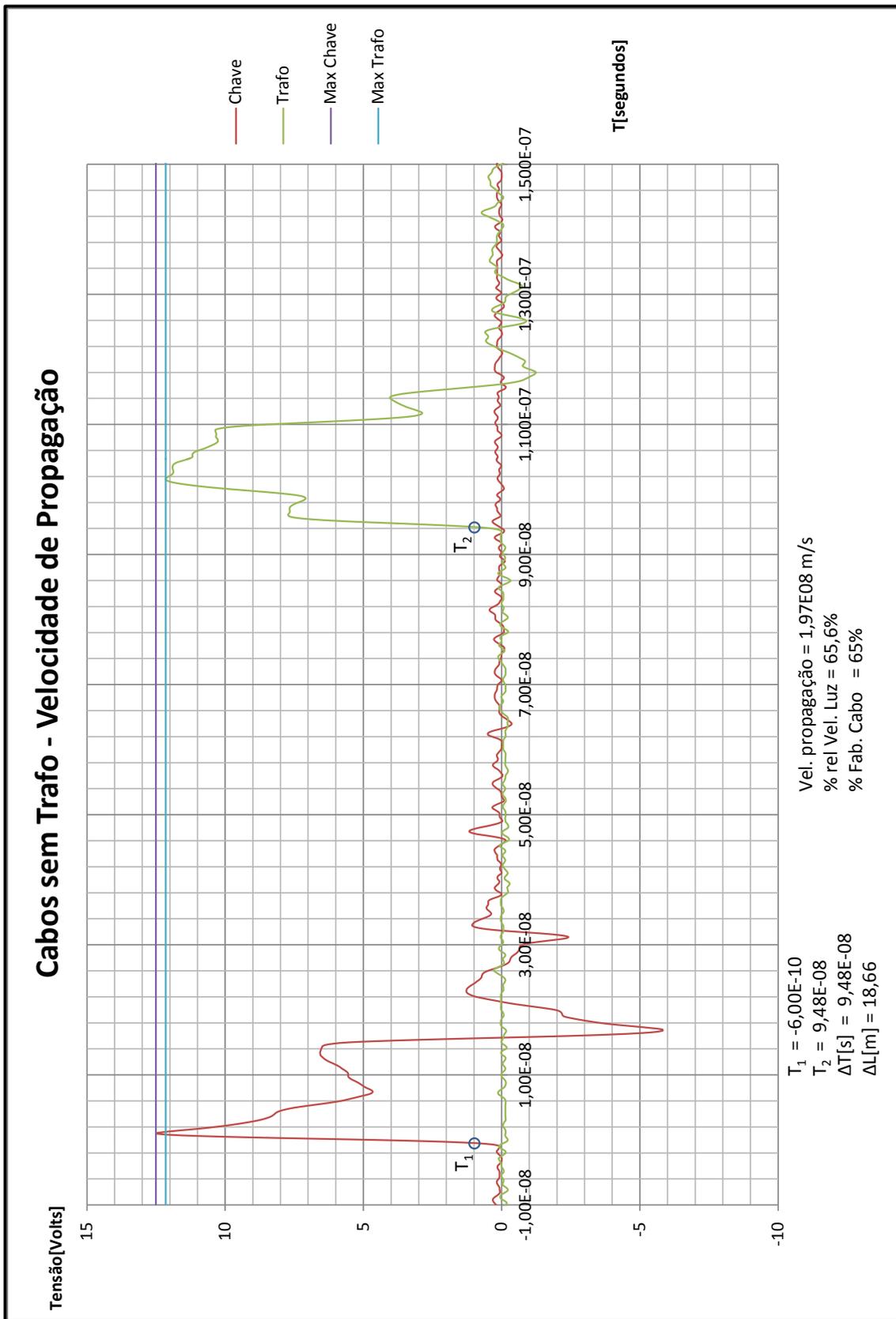


Figura 56 – Oscilograma na condição de cabos sem o transformador.

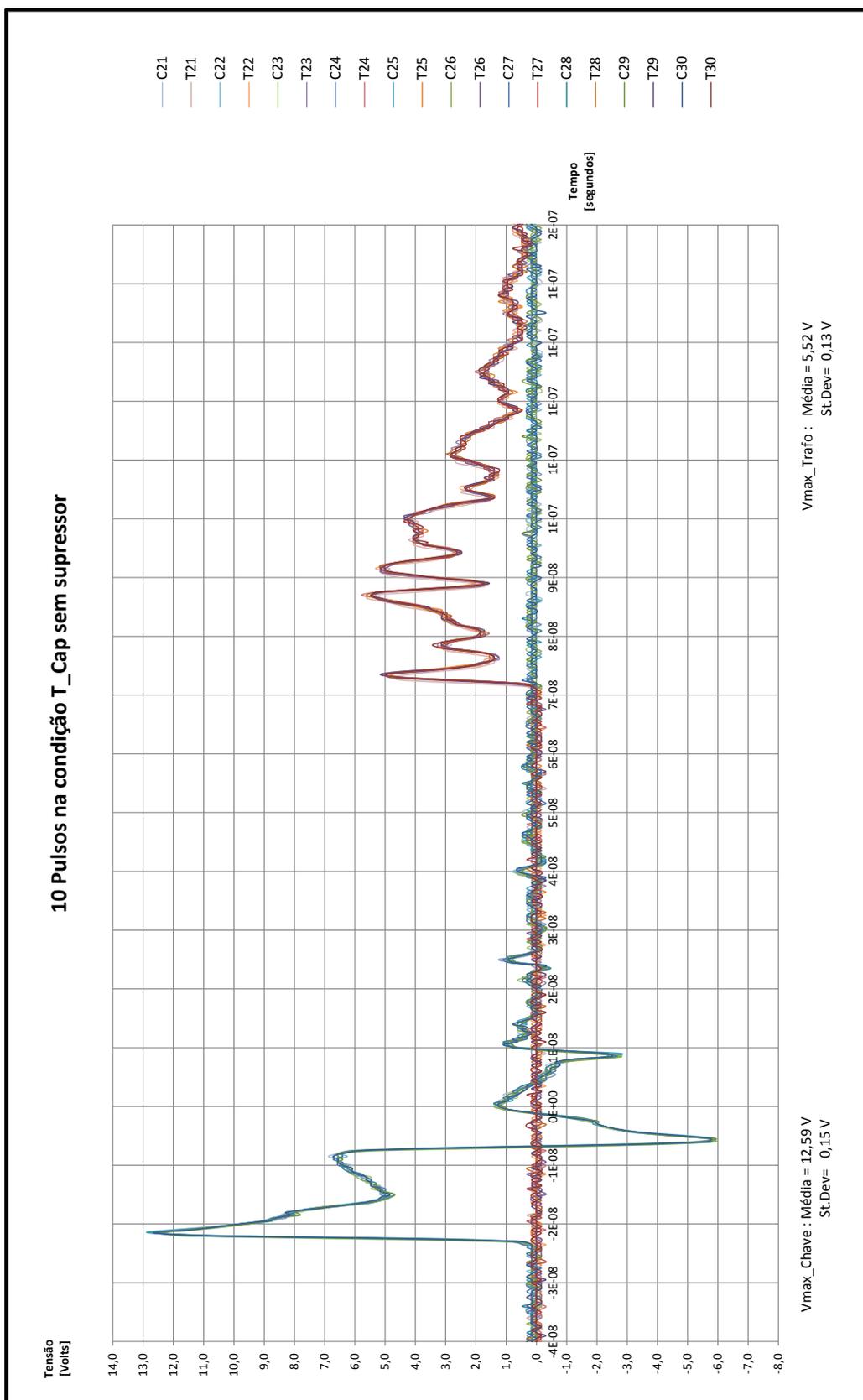


Figura 57 – Oscilograma de 10 pulsos subsequentes na condição de montagem com Trafo “T_Cap” sem supressor, para verificação da repetibilidade

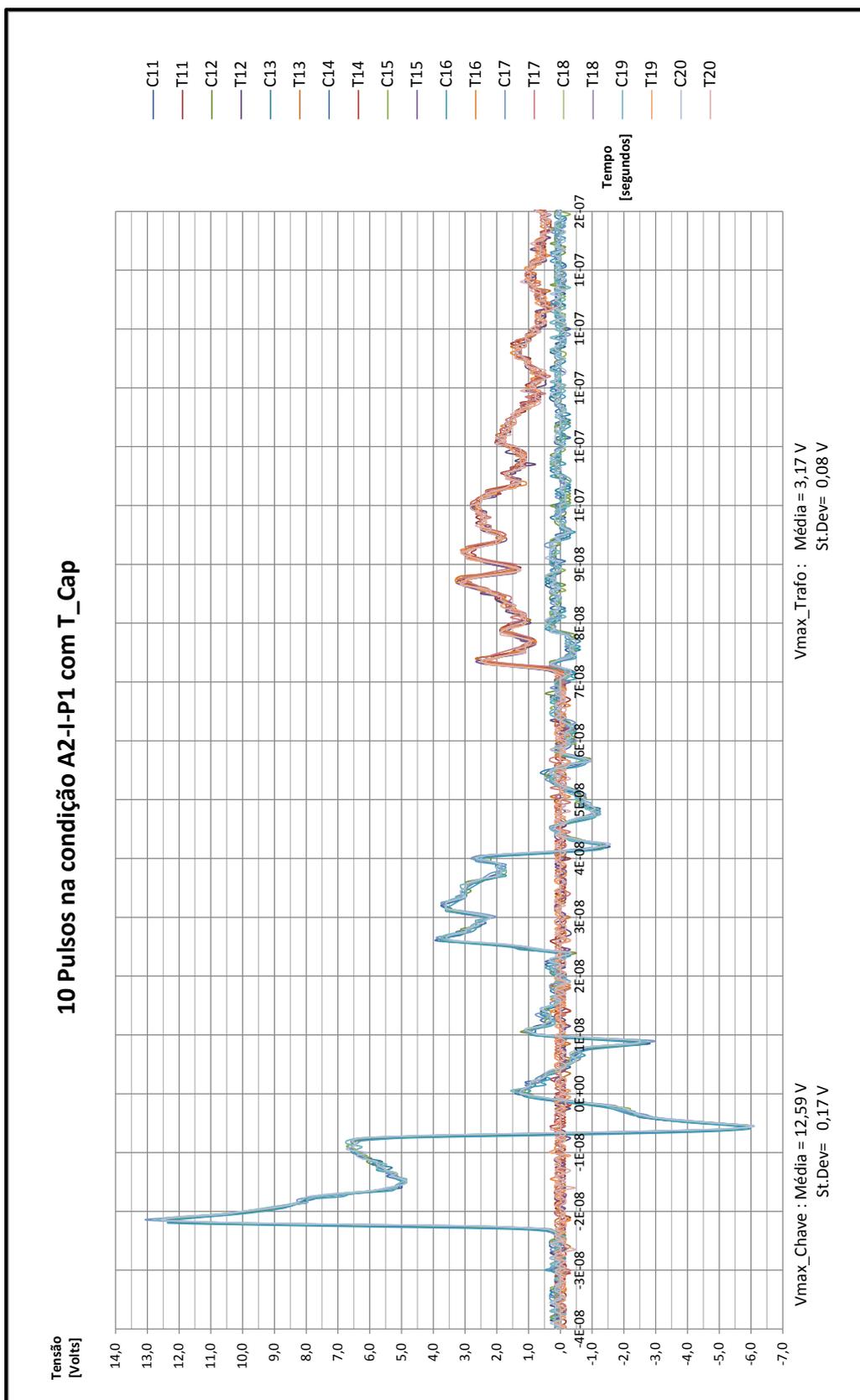


Figura 58 – Oscilograma de 10 pulsos subsequentes na condição A2-I-P1 com Trafo “T_Cap” para verificação da repetibilidade

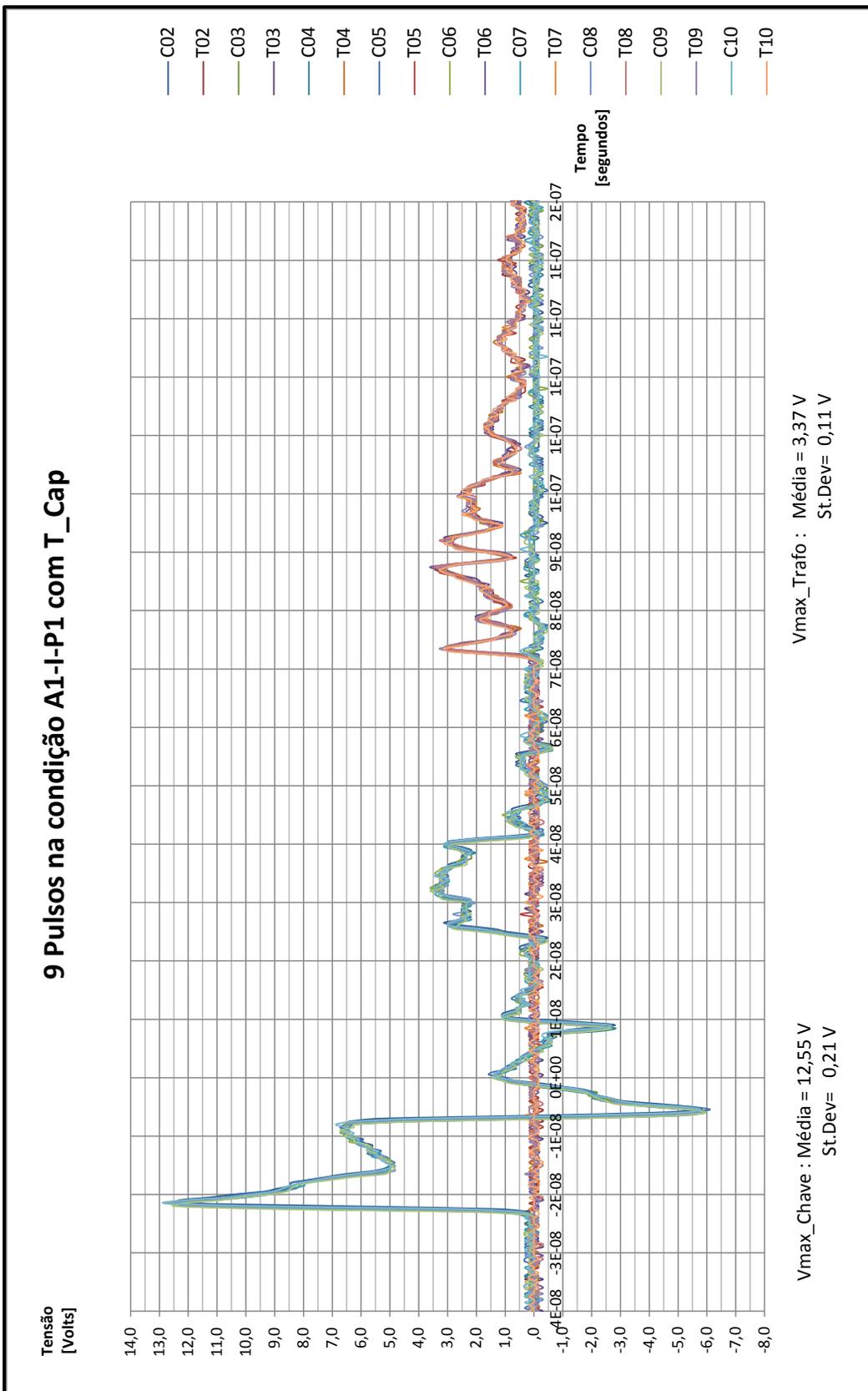


Figura 59 – Oscilograma de 9 pulsos subsequentes na condição A1-I-P1 com Trafo “T_Cap” para verificação da repetibilidade

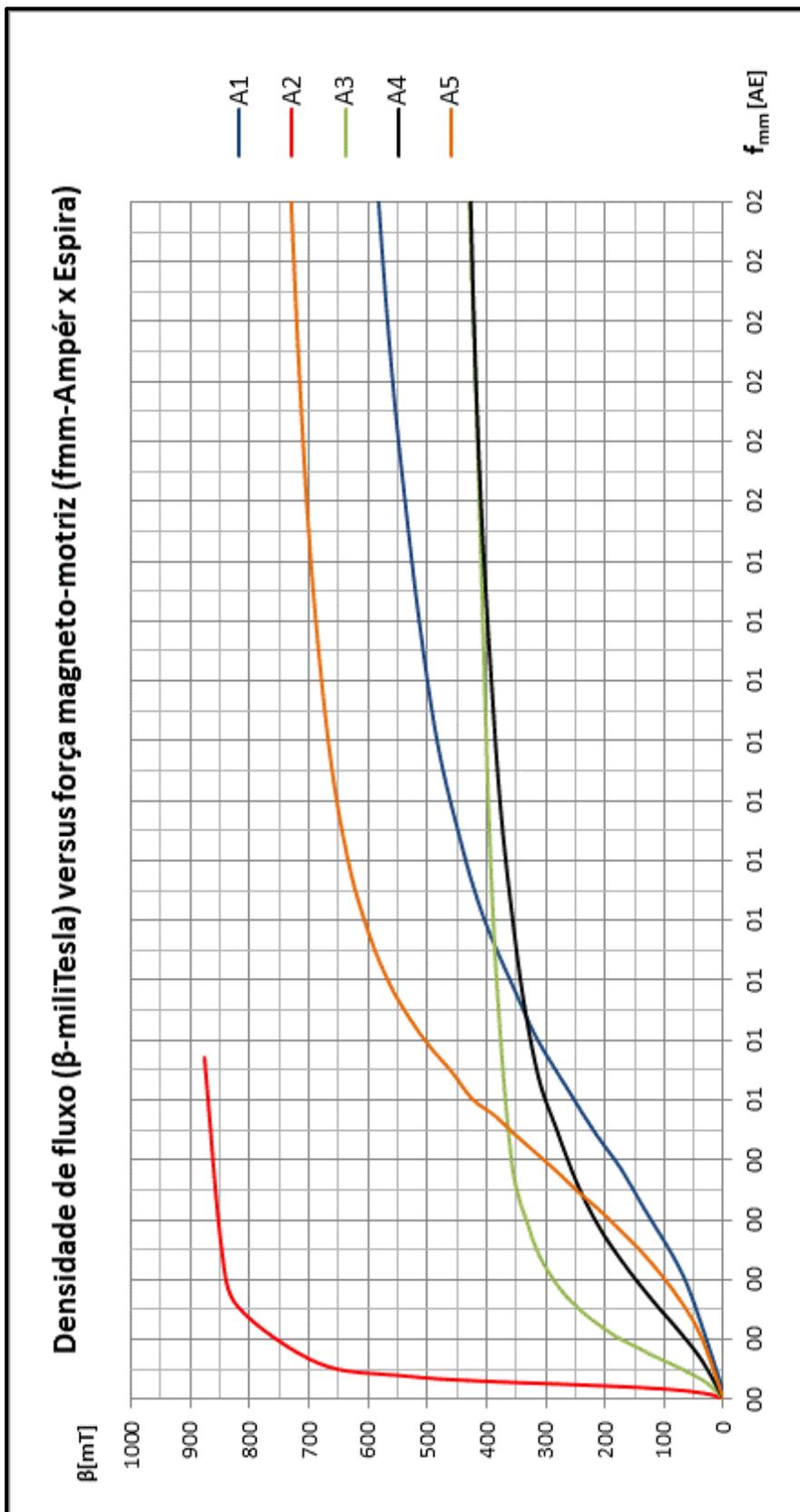


Figura 60 – Curvas de saturação dos núcleos toroidais

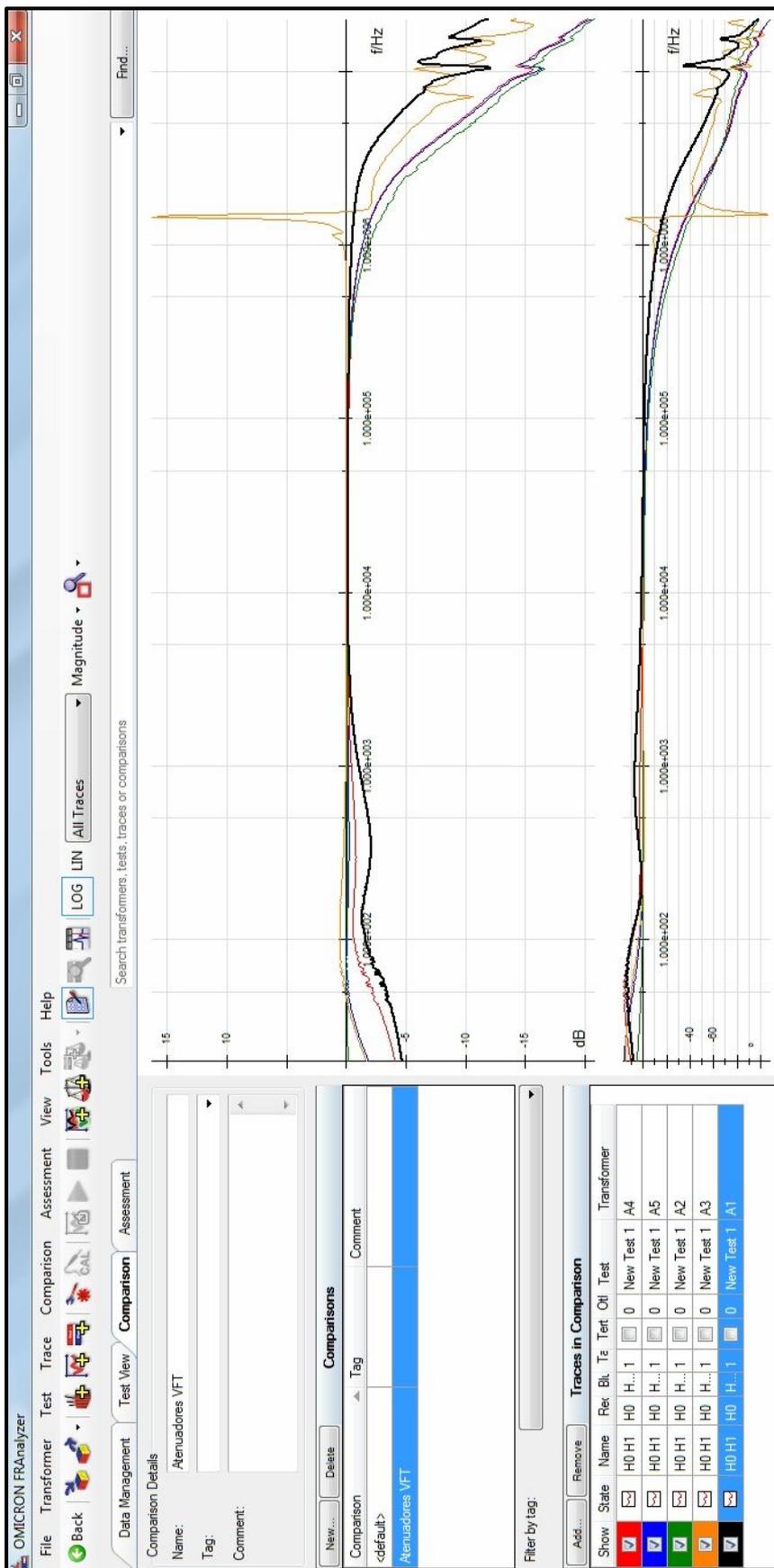


Figura 61 – Curvas de resposta em frequência dos toroides levantadas com o instrumento FRAnalyzer

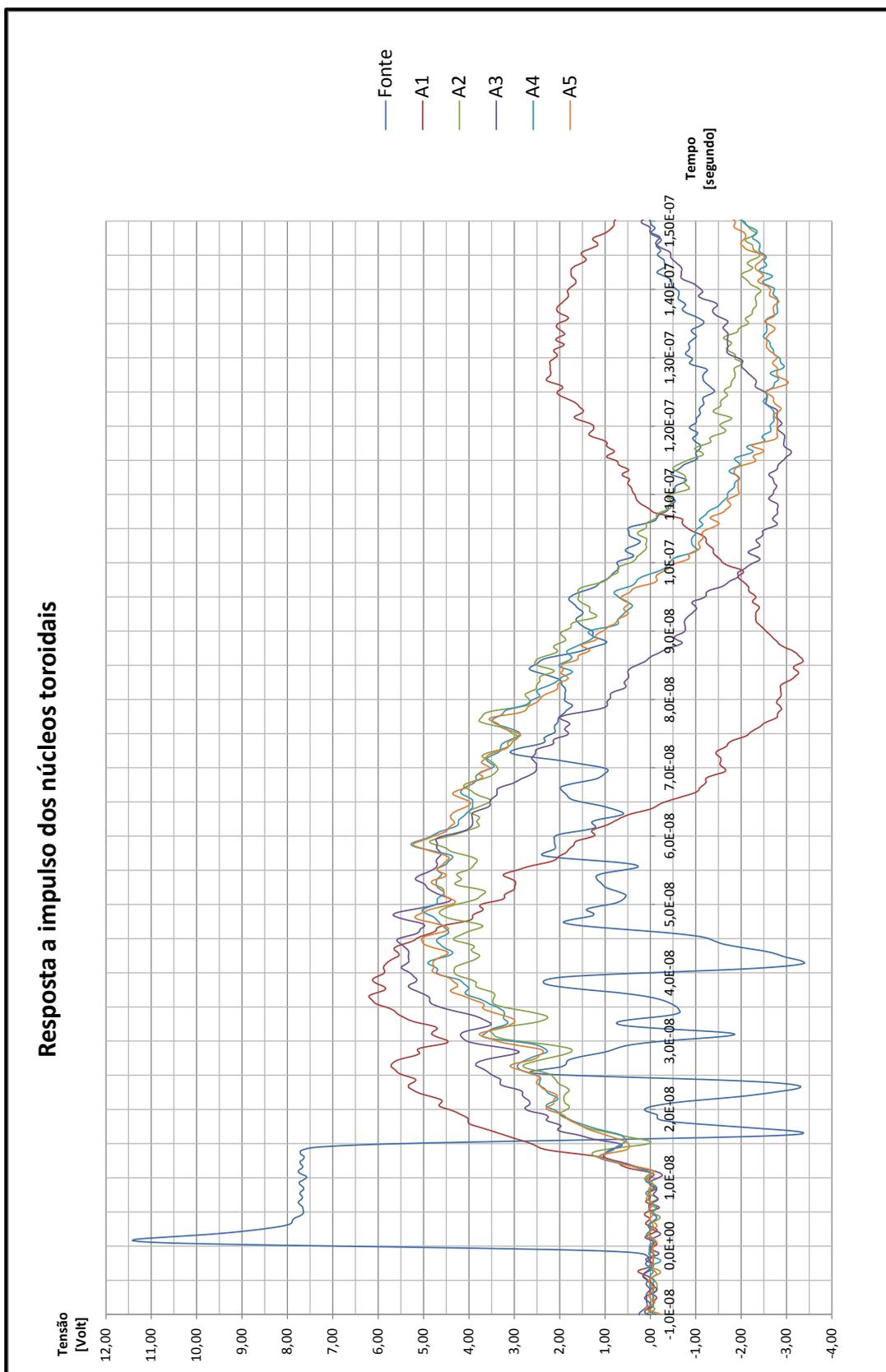


Figura 62 – Oscilogramas de resposta a impulso dos núcleos toroidais

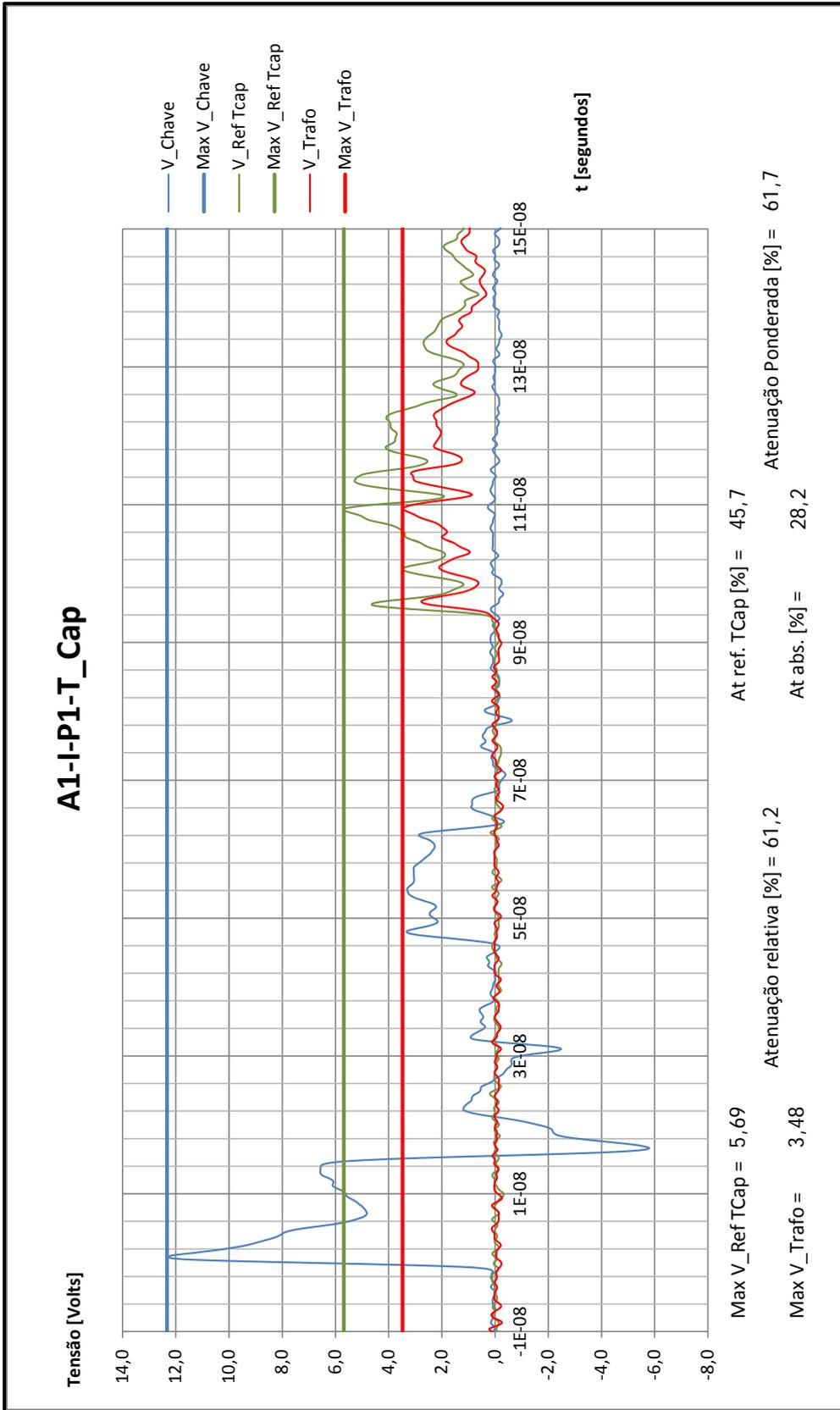


Figura 63 – Oscilograma na condição A1-I-P1-T_Cap

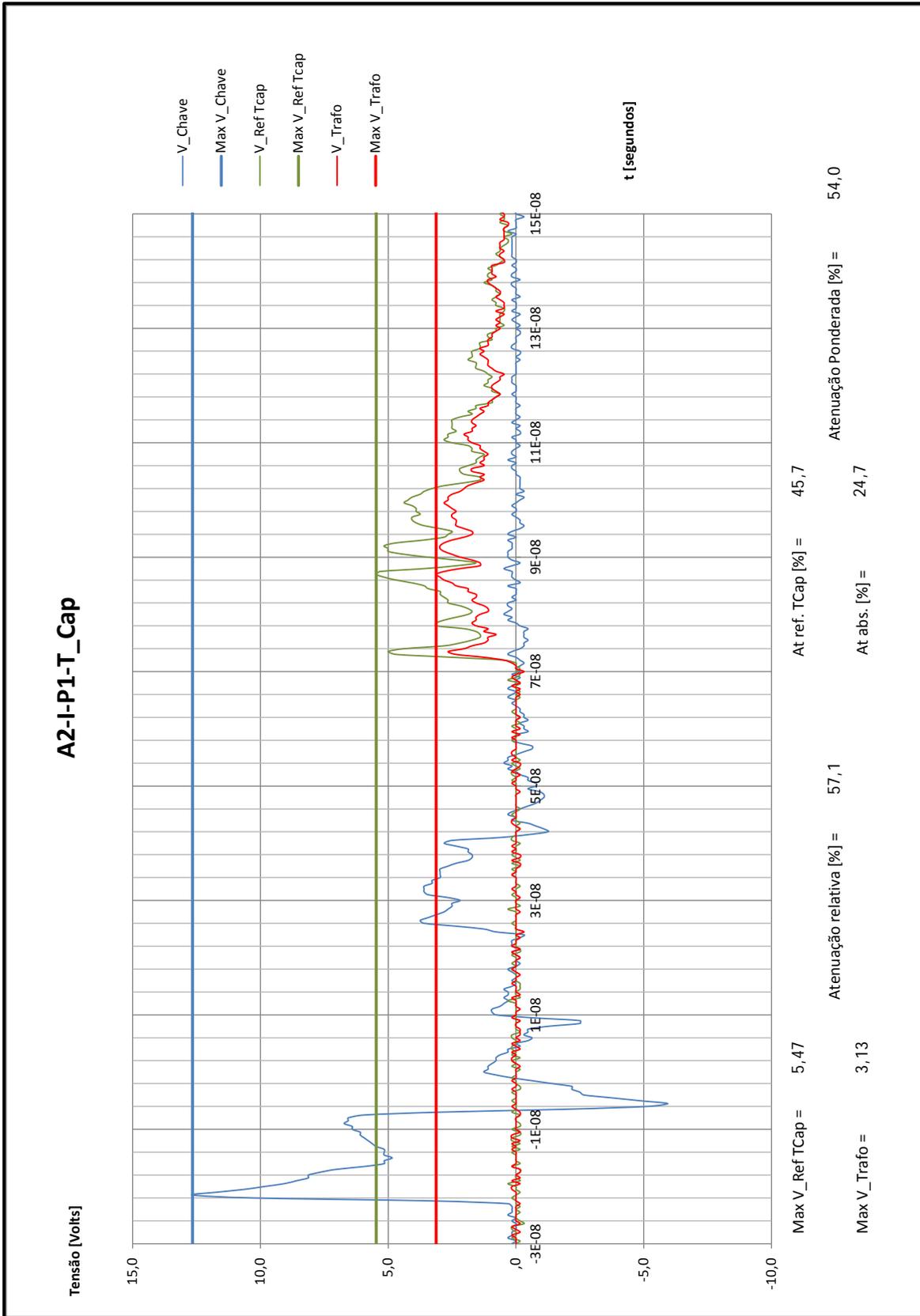


Figura 64 – Oscilograma na condição A2-I-P1-T_Cap

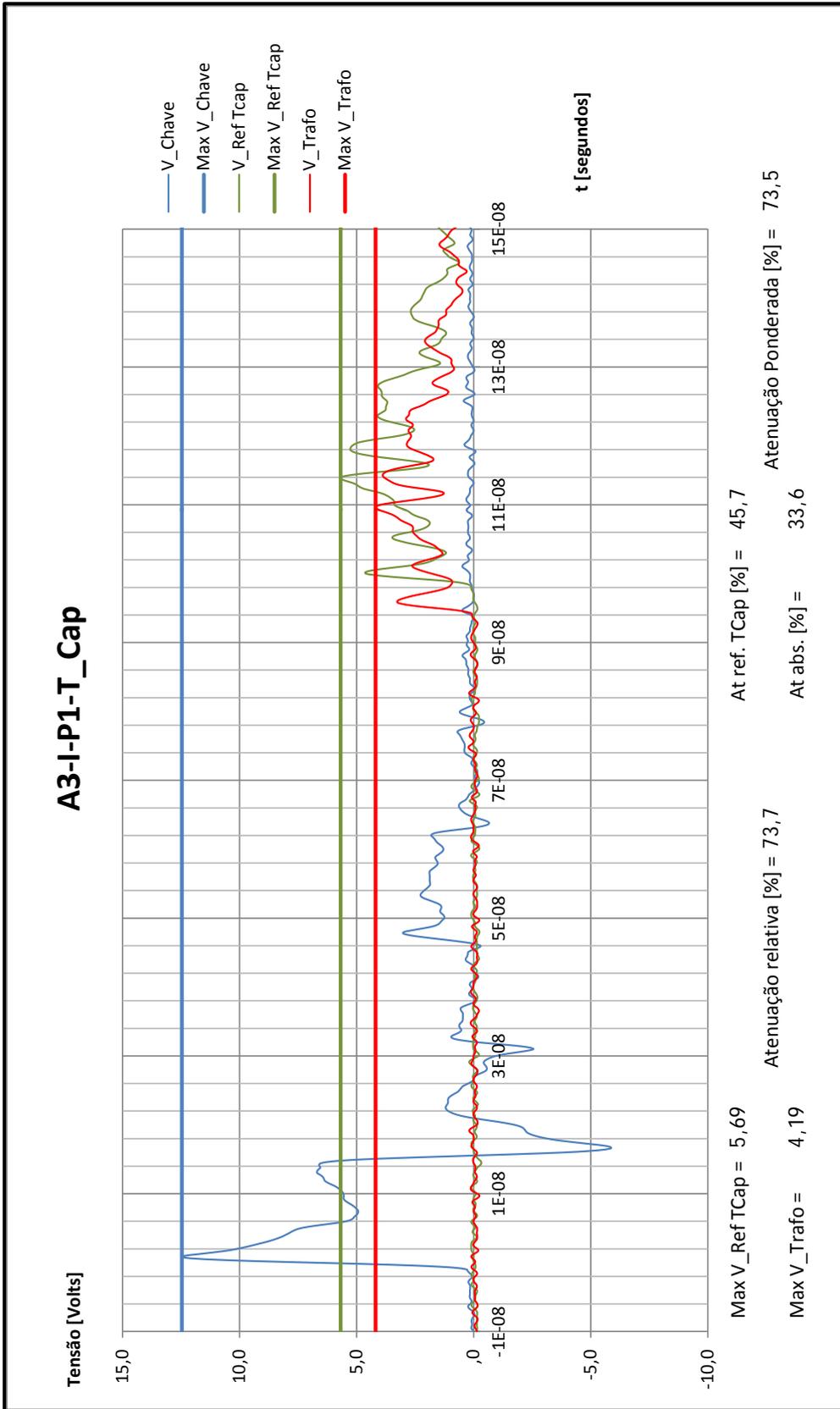


Figura 65 – Oscilograma na condição A3-I-P1-T_Cap

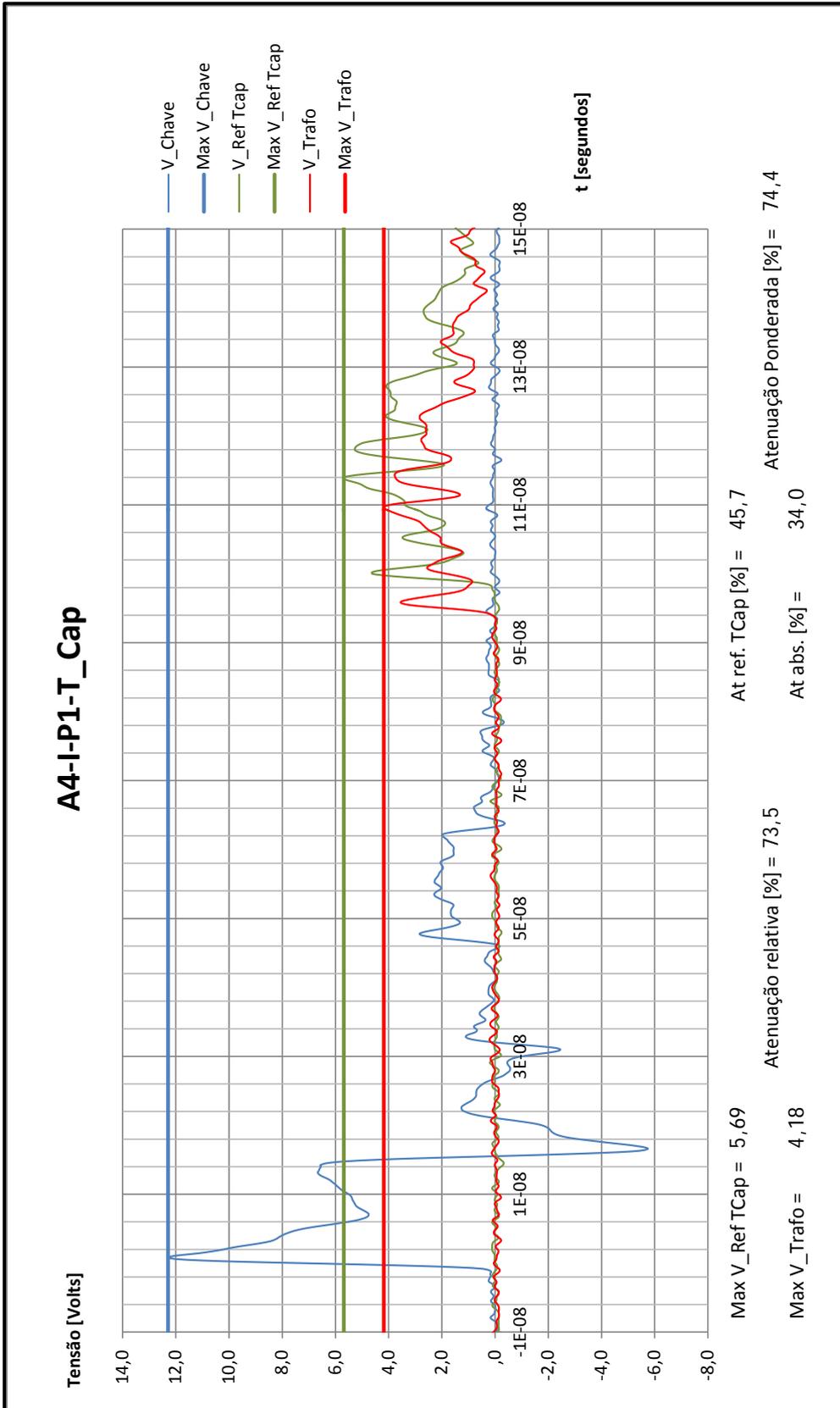


Figura 66 – Oscilograma na condição A4-I-P1-T_Cap

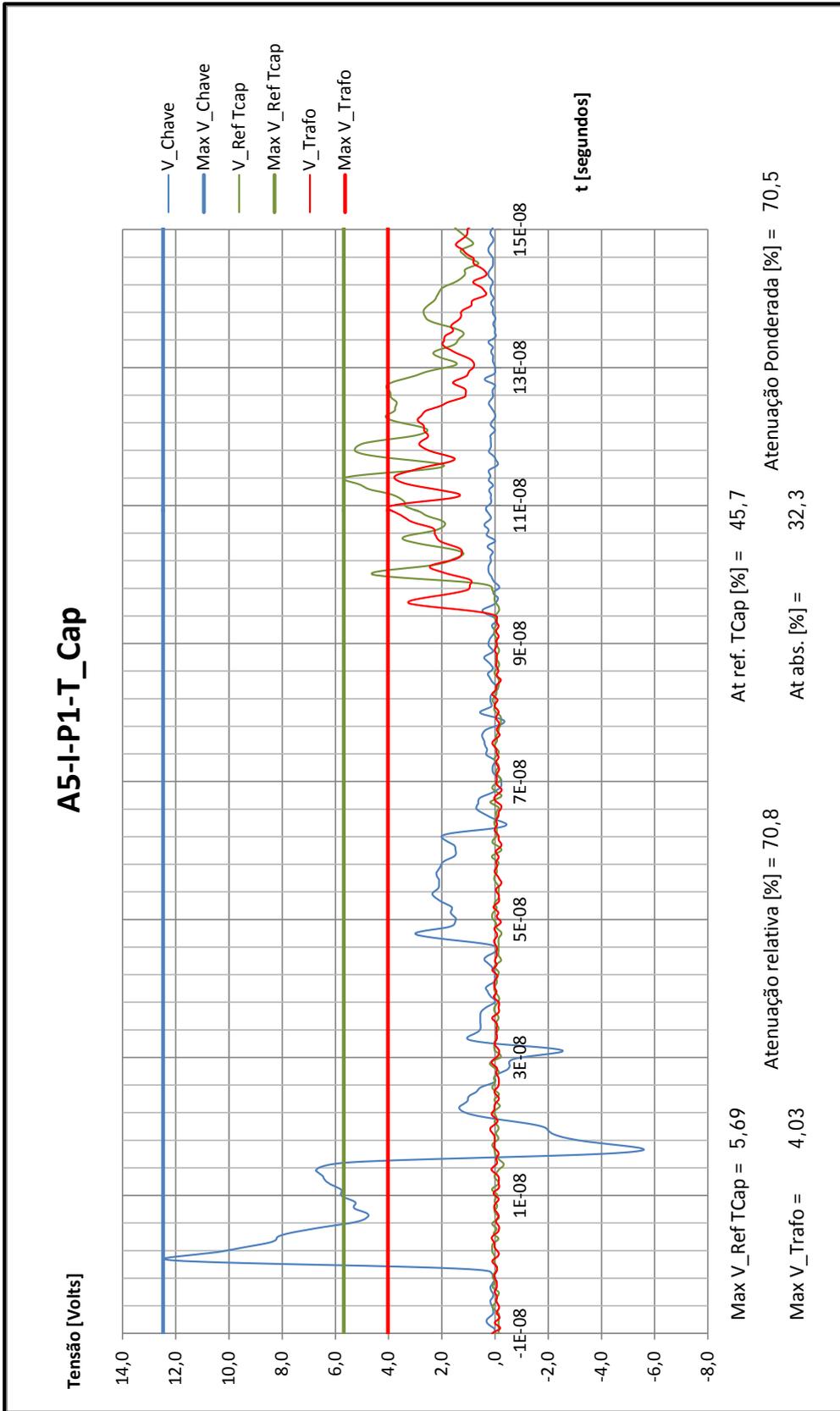


Figura 67 – Oscilograma na condição A5-I-P1-T_Cap

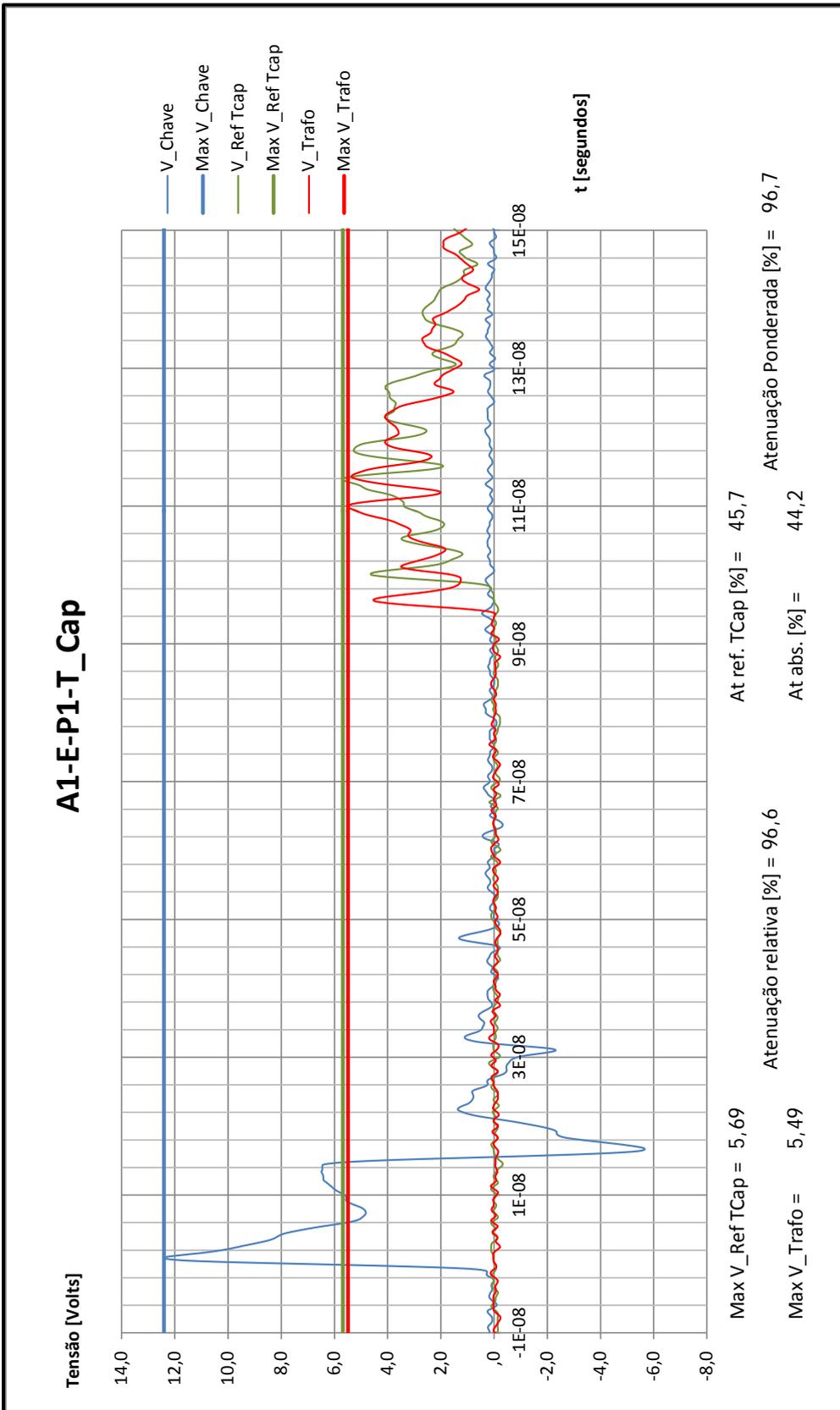


Figura 68 – Oscilograma na condição A1-E-P1-T_Cap

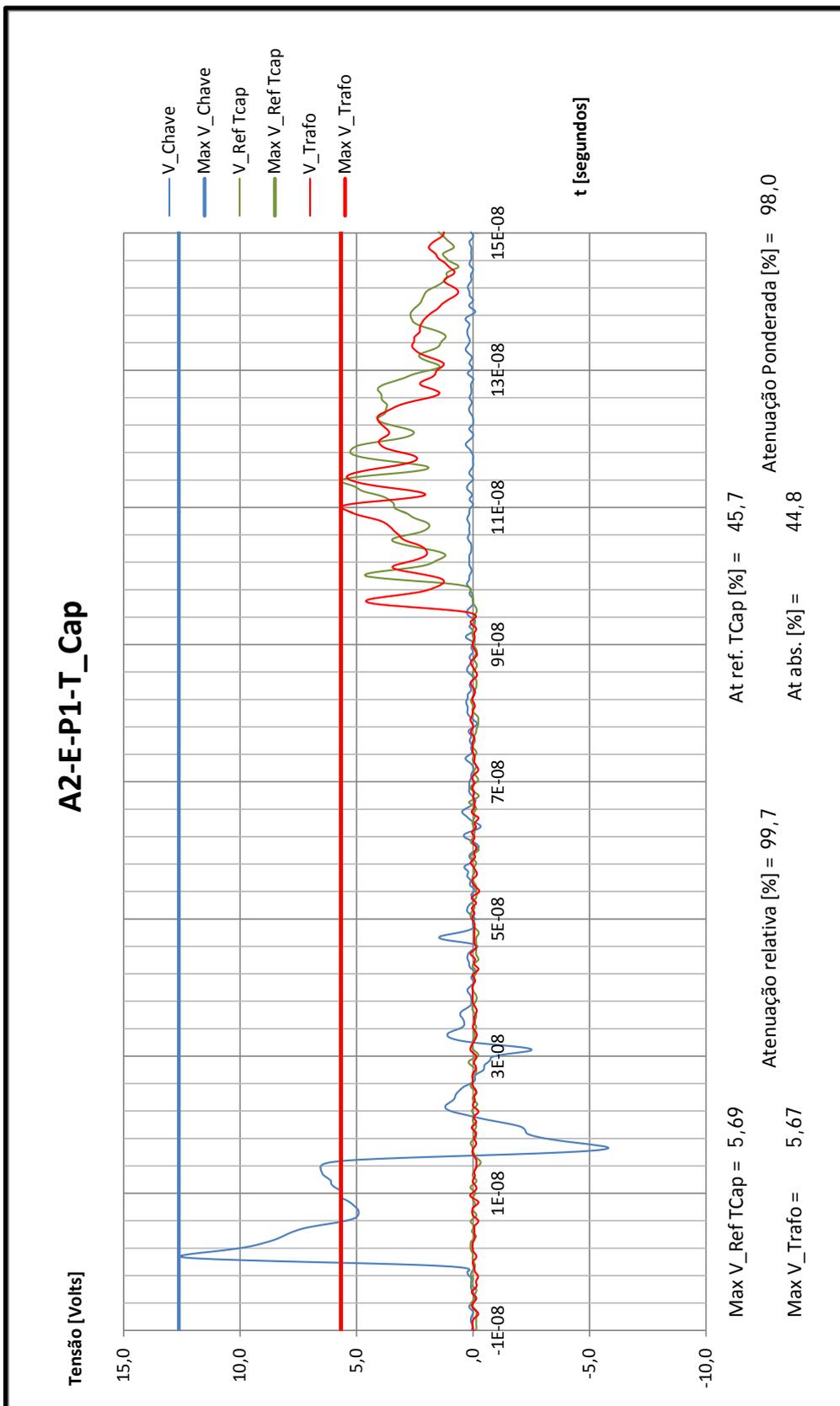


Figura 69 – Oscilograma na condição A2- E-P1-T_Cap

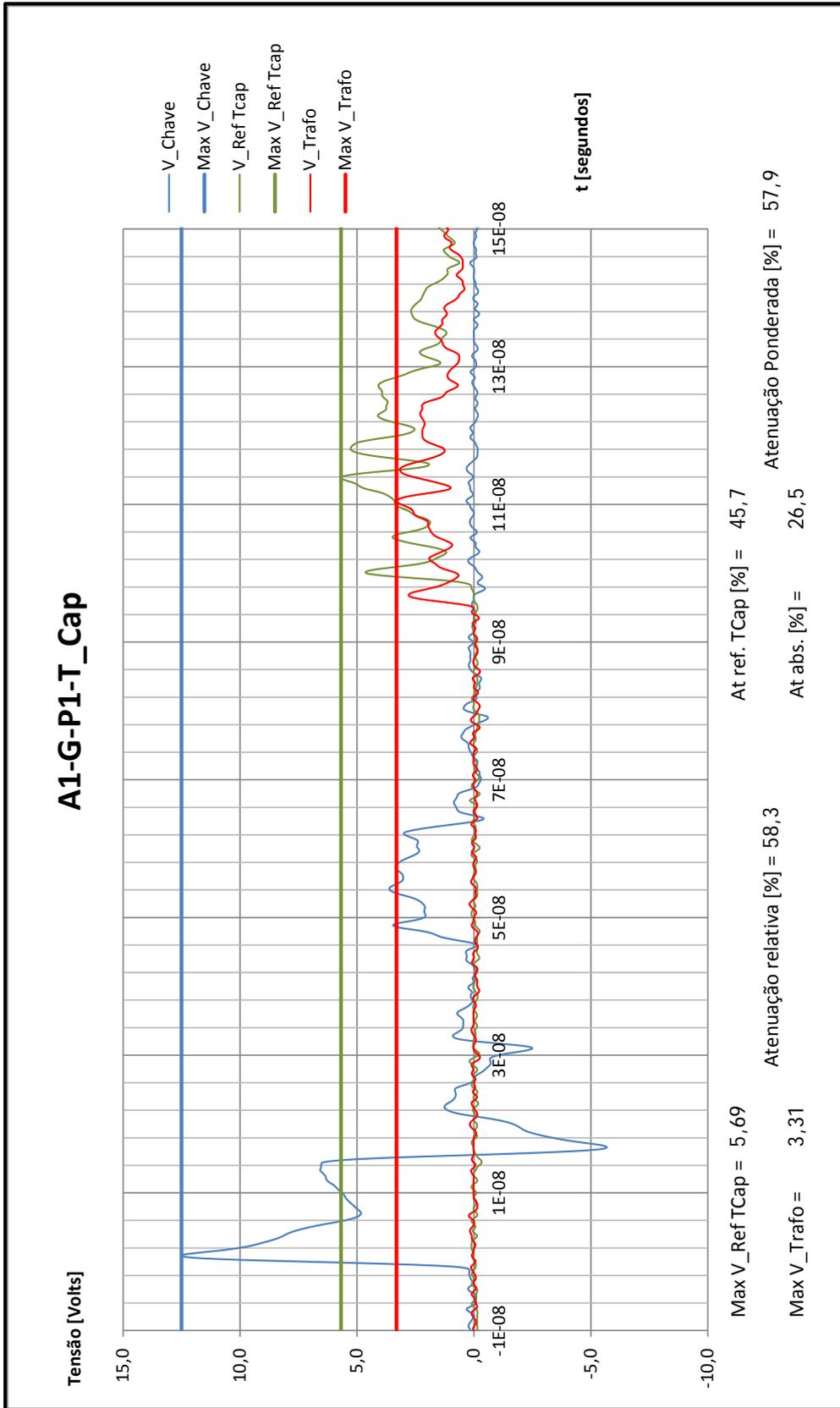


Figura 70 – Oscilograma na condição A1-G-P1-T_Cap

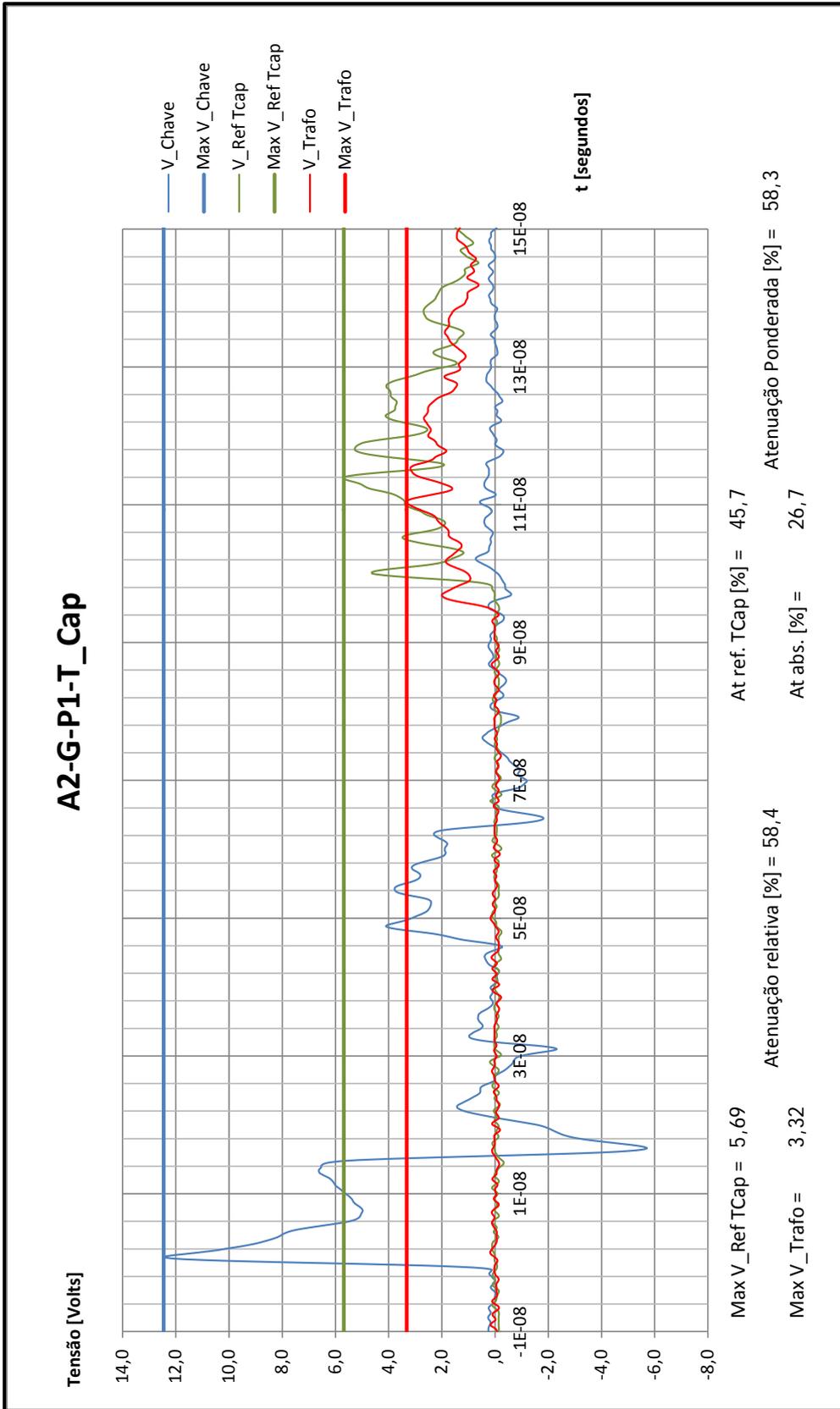


Figura 71 – Oscilograma na condição A2-G-P1-T_Cap

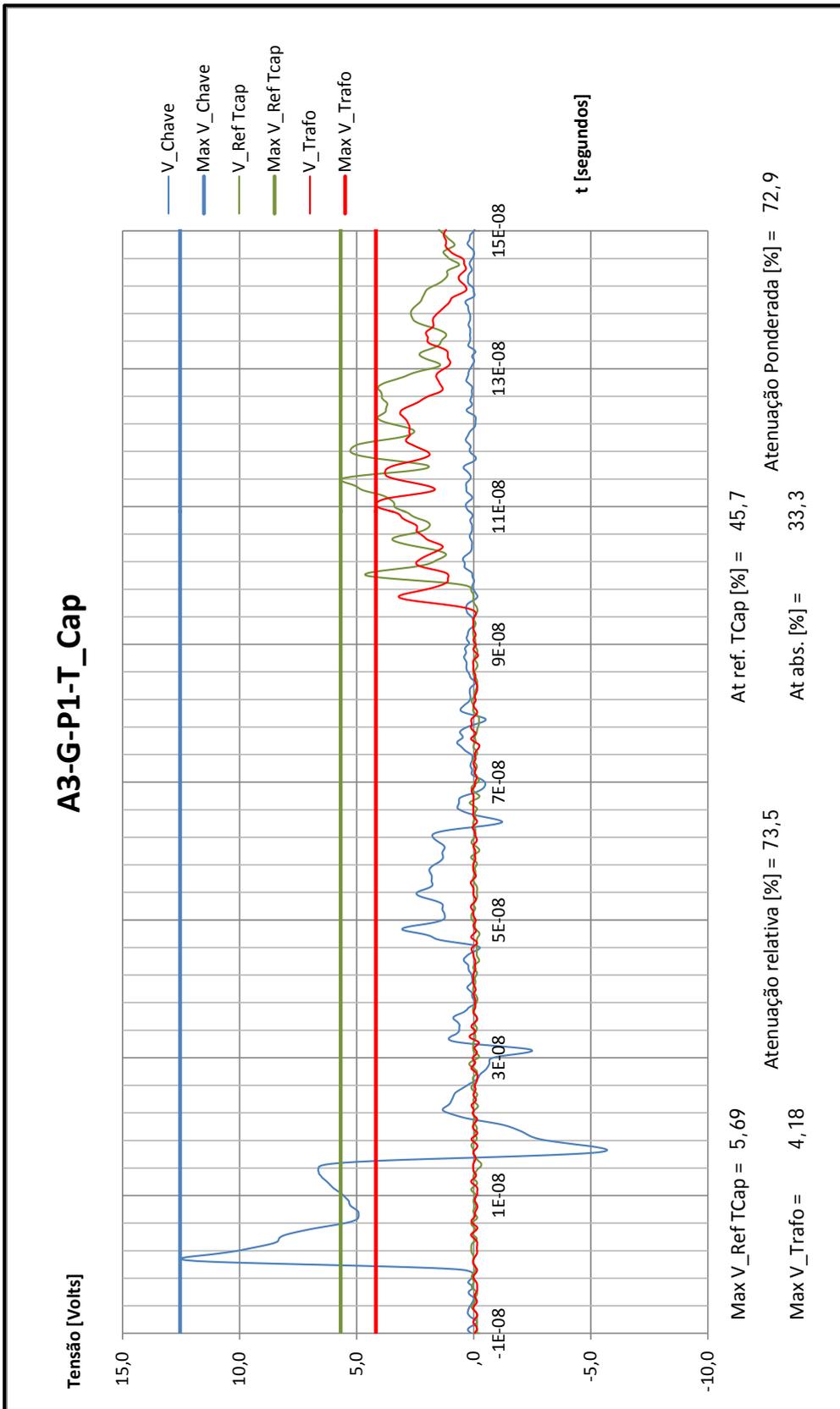


Figura 72 – Oscilograma na condição A3-G-P1-T_Cap

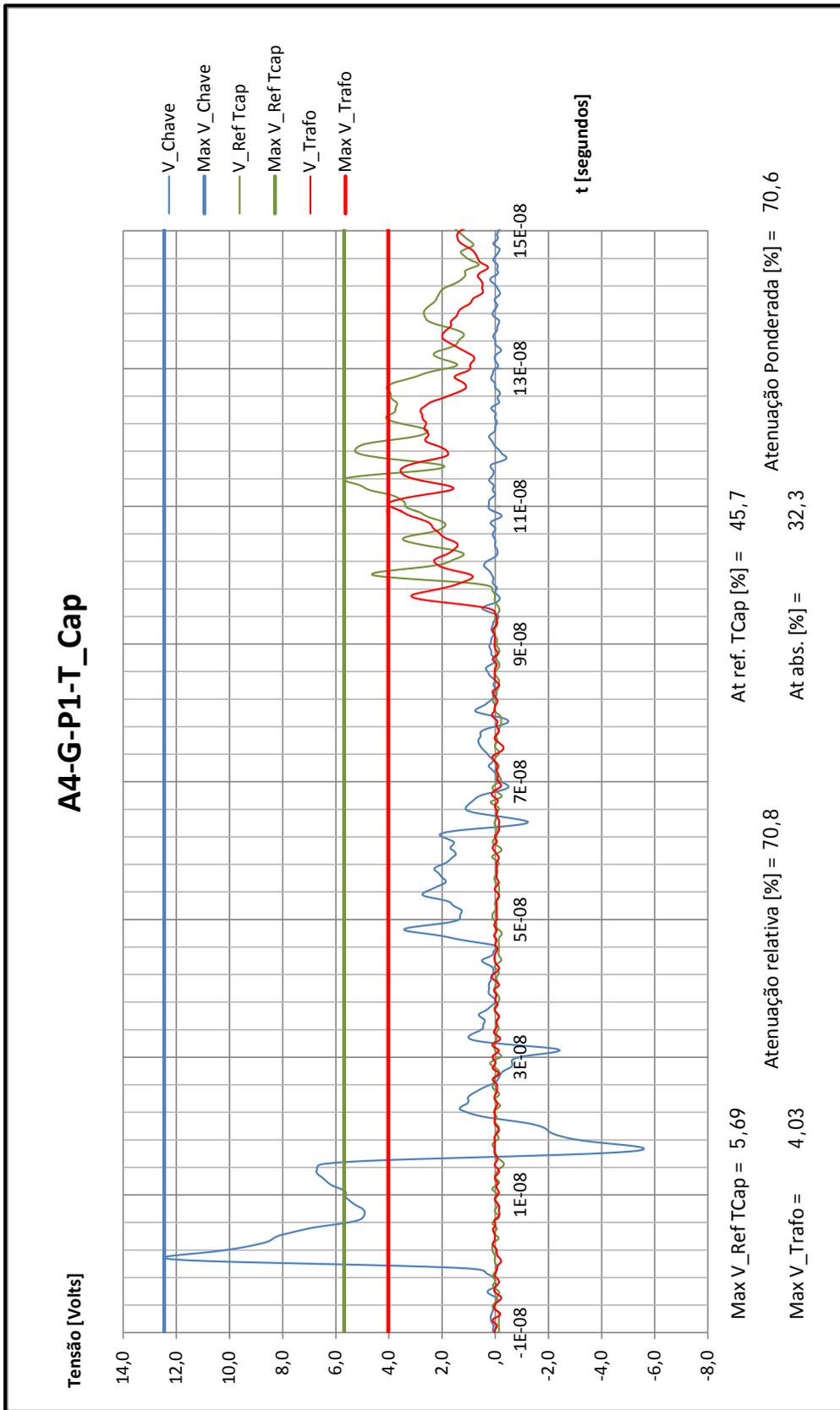


Figura 73 – Oscilograma na condição A4-G-P1-T_Cap

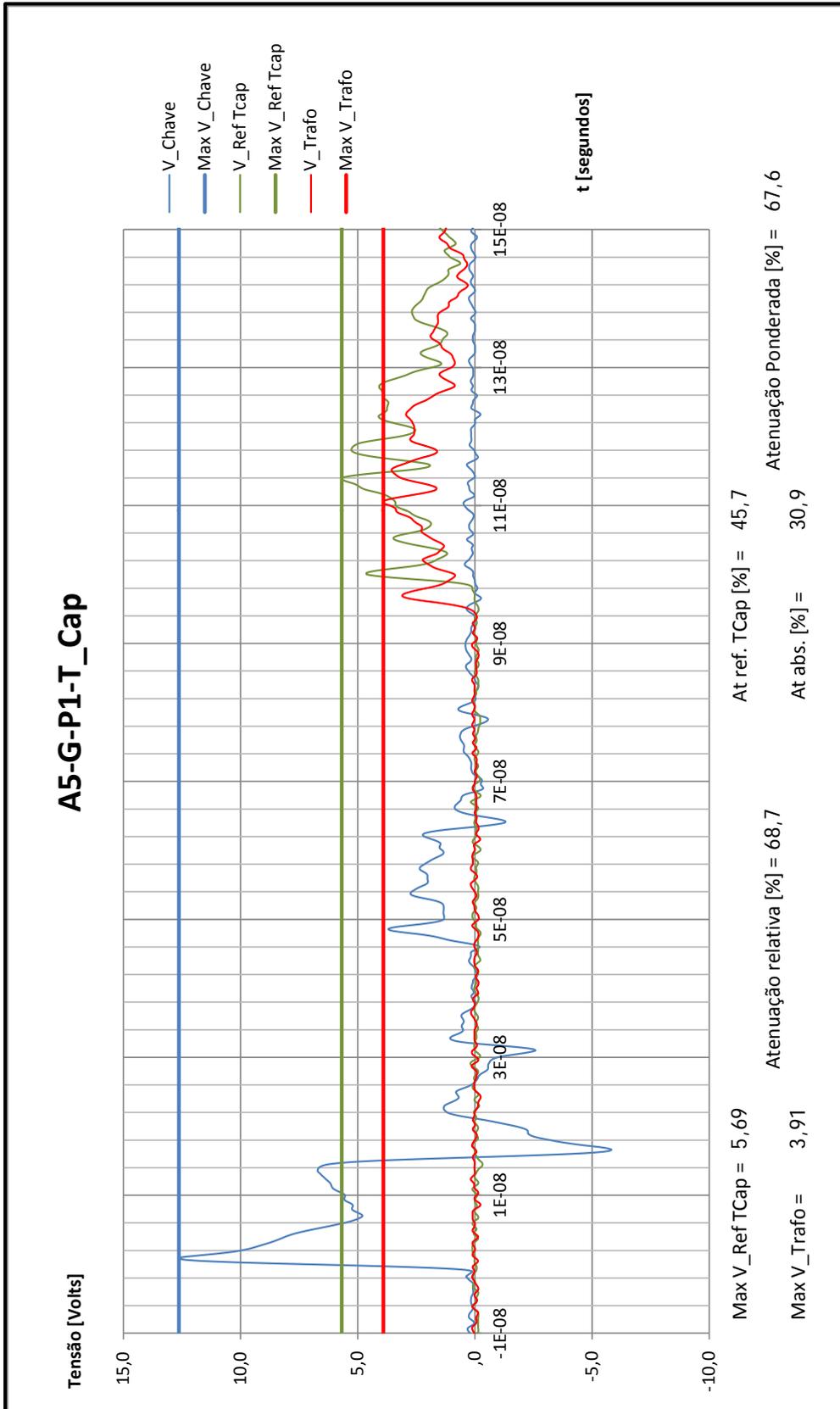


Figura 74 – Oscilograma na condição A5-G-P1-T_Cap

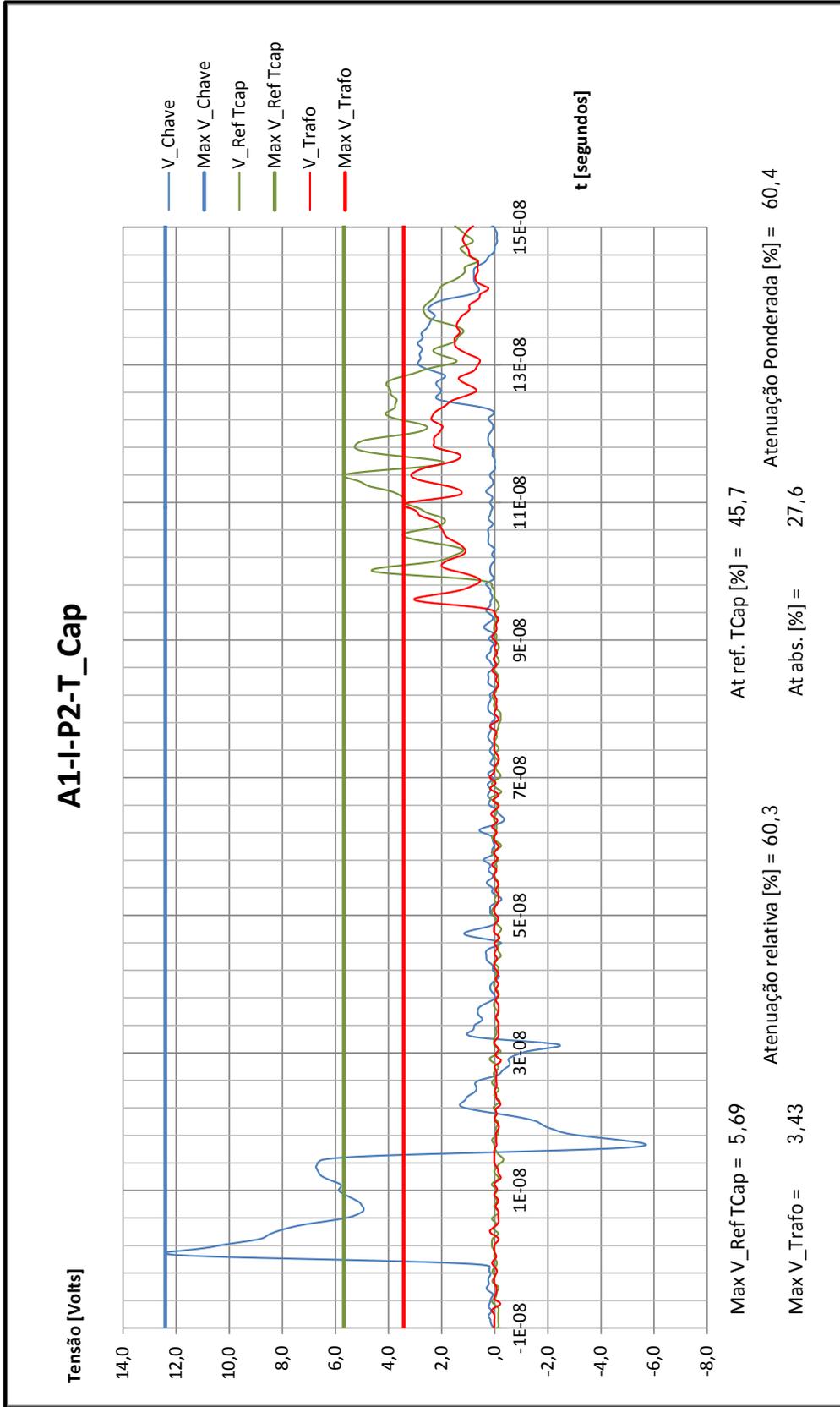


Figura 75 – Oscilograma na condição A1-I-P2-T_Cap

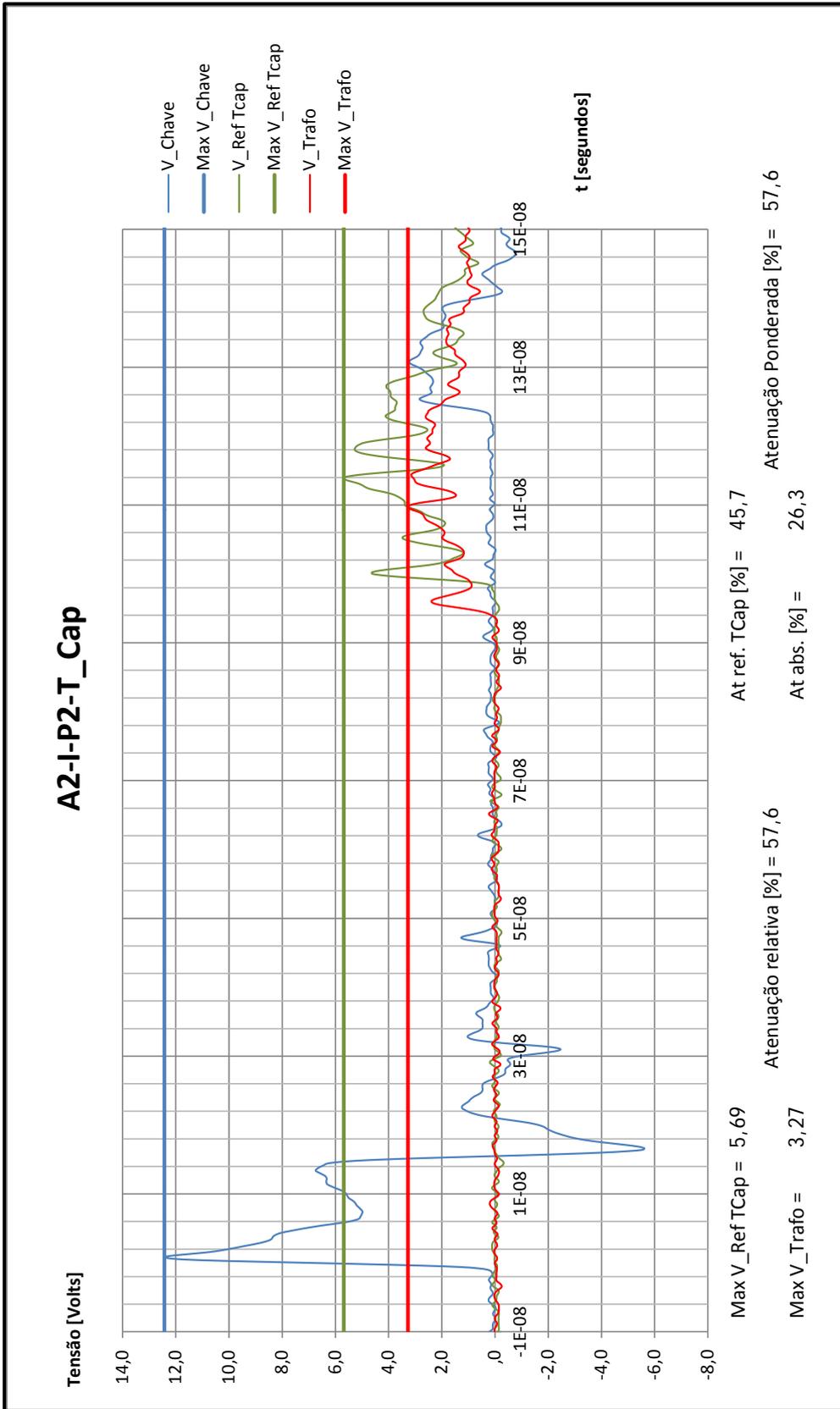


Figura 76 – Oscilograma na condição A2-I-P2-T_Cap

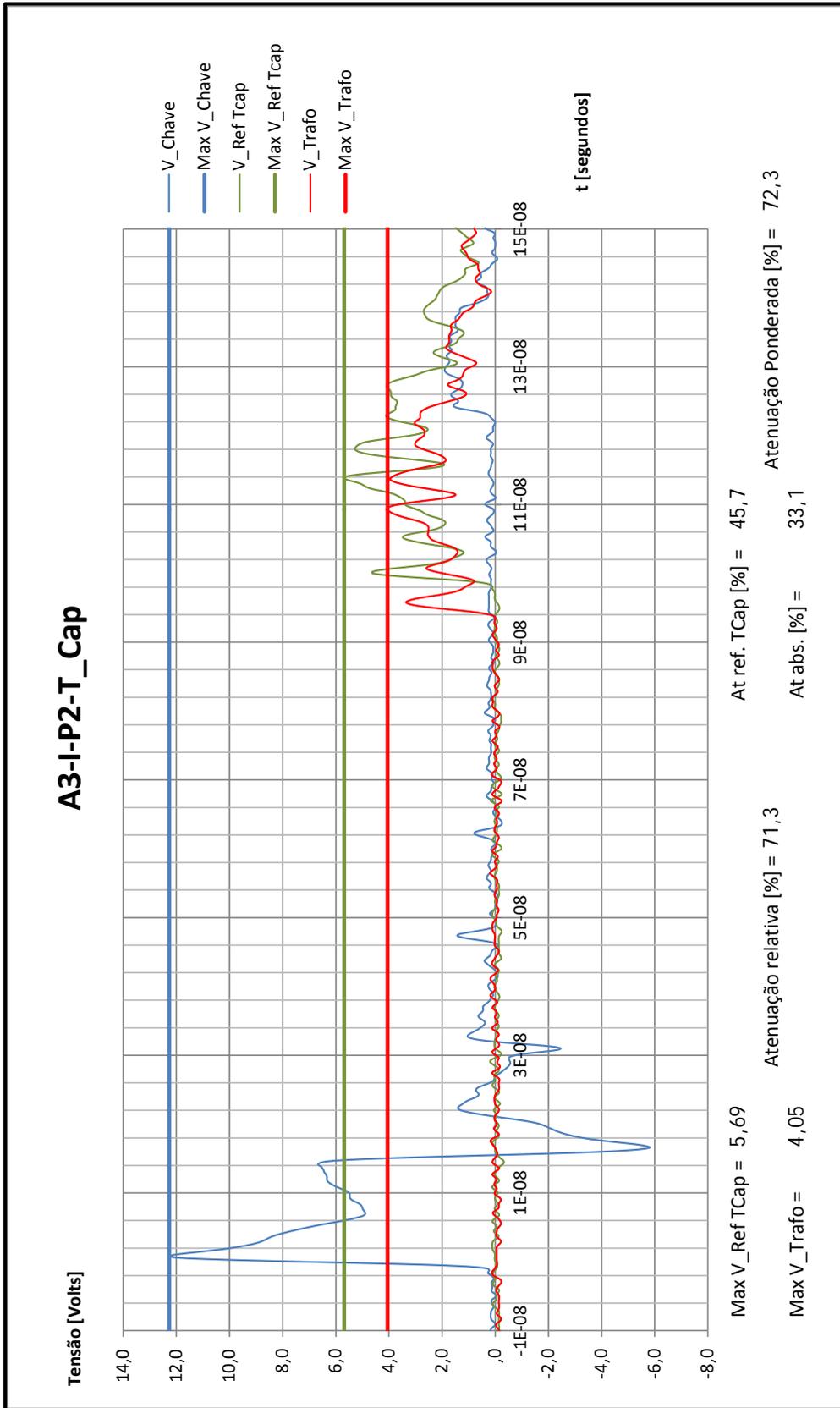


Figura 77 – Oscilograma na condição A3-I-P2-T_Cap

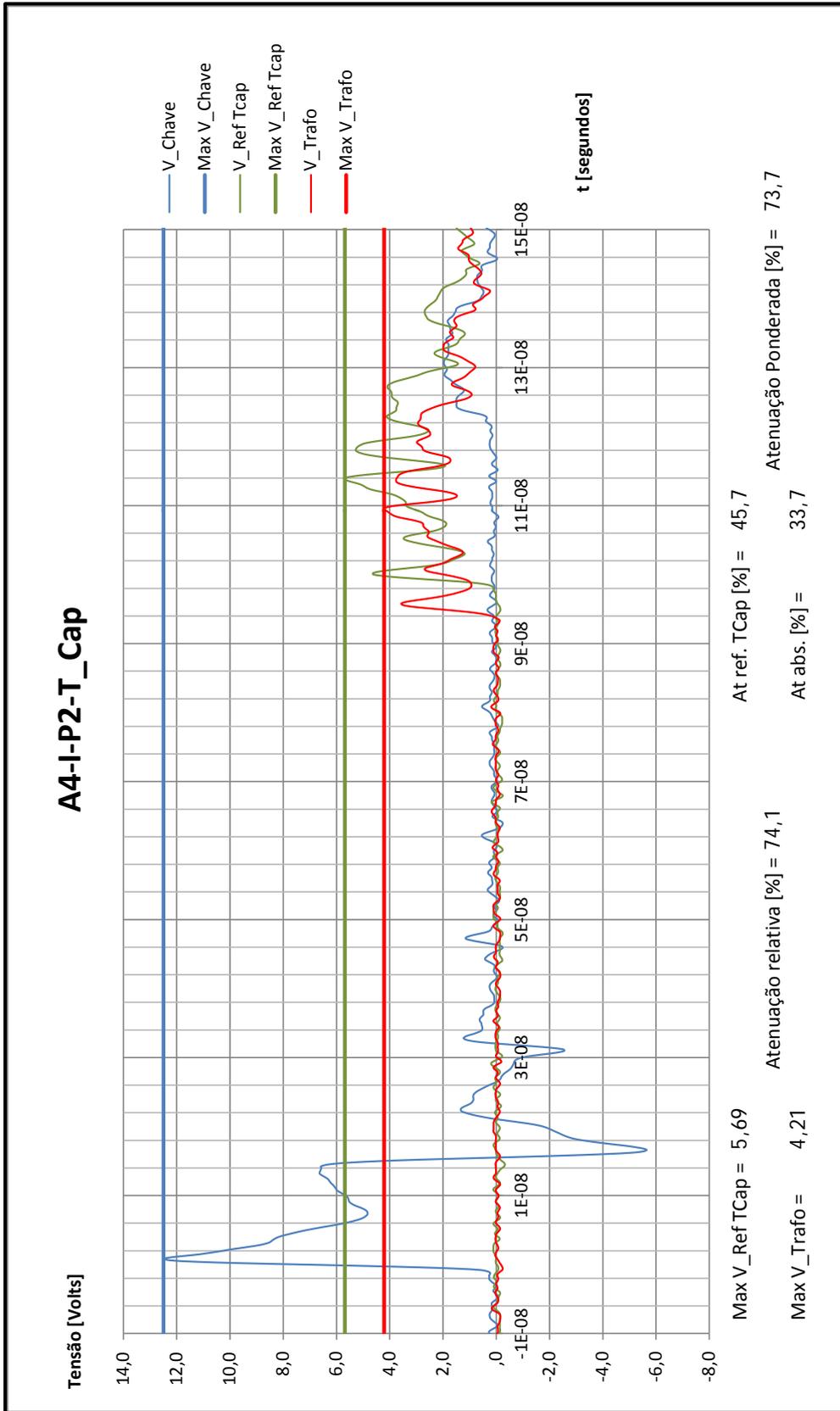


Figura 78 – Oscilograma na condição A4-I-P2-T_Cap

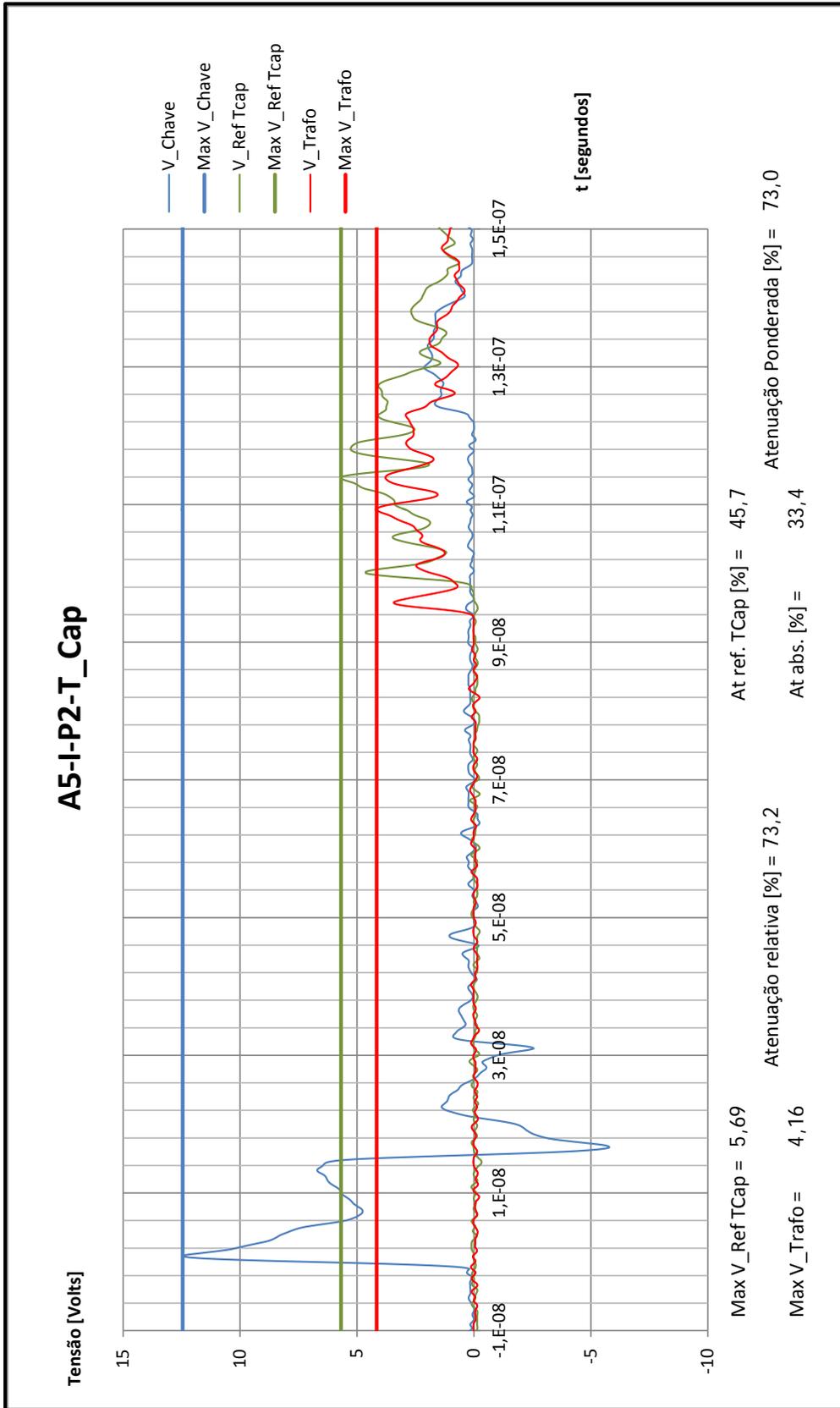


Figura 79 – Oscilograma na condição A5-I-P2-T_Cap

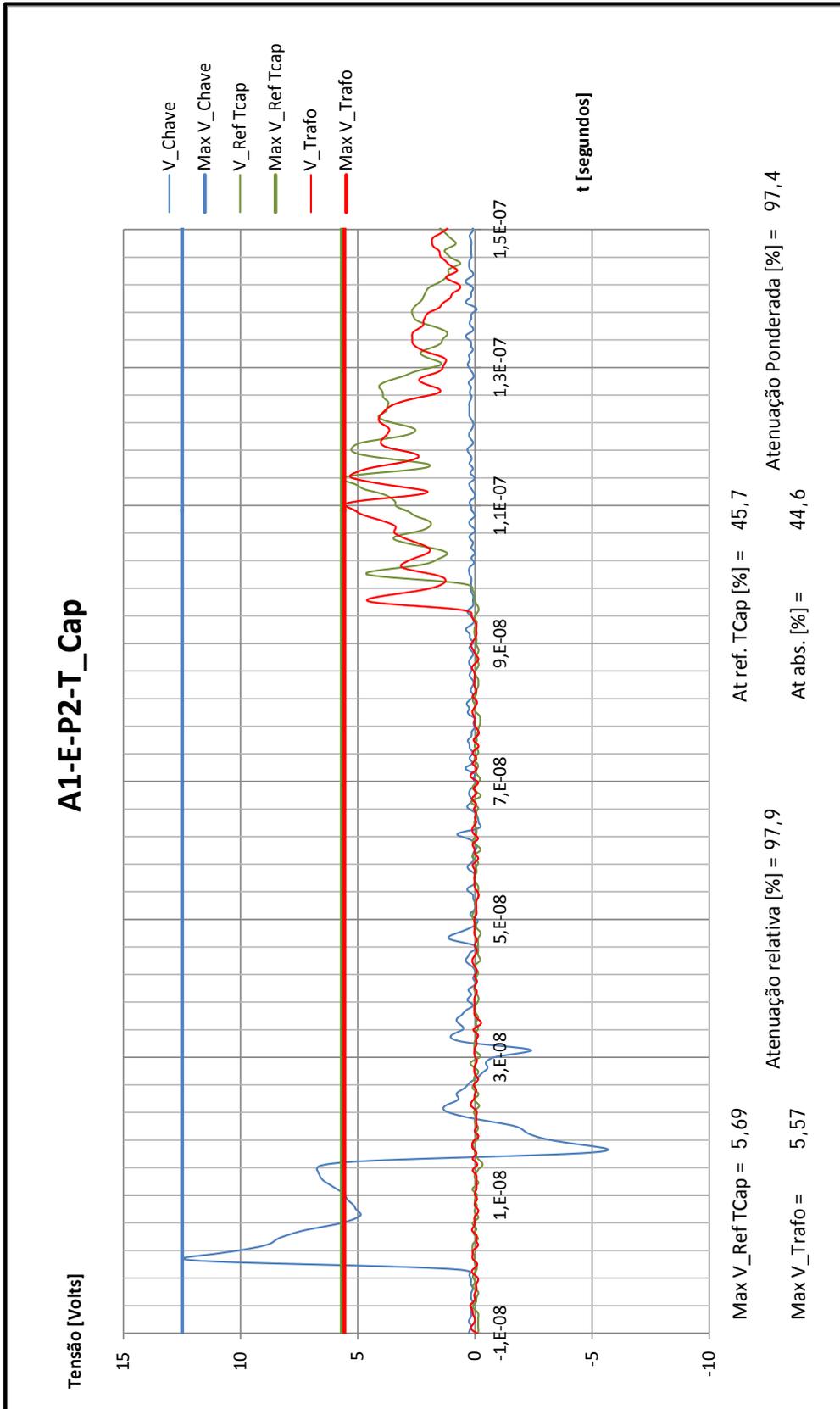


Figura 80 – Oscilograma na condição A1-E-P2-T_Cap

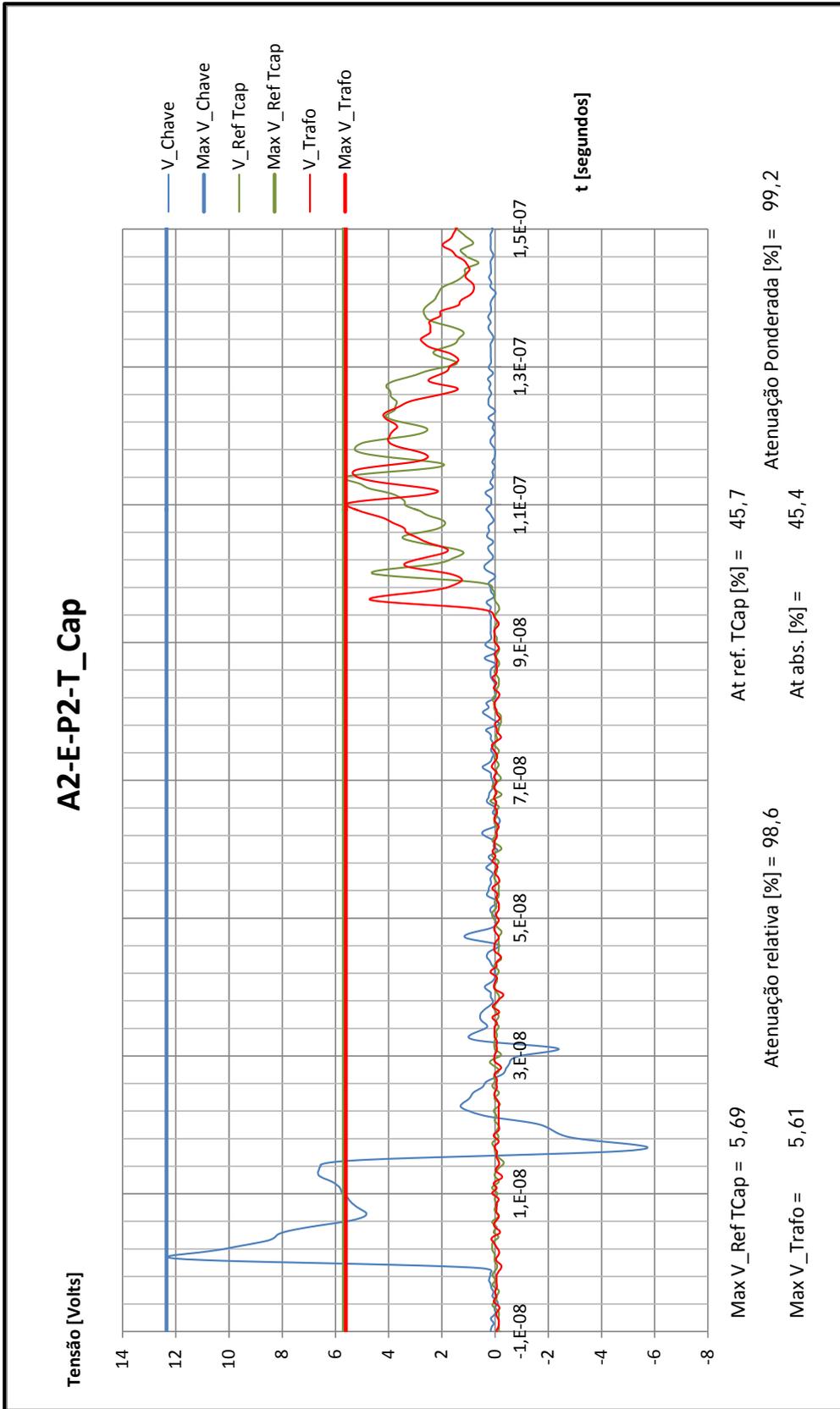


Figura 81 – Oscilograma na condição A2-E-P2-T_Cap

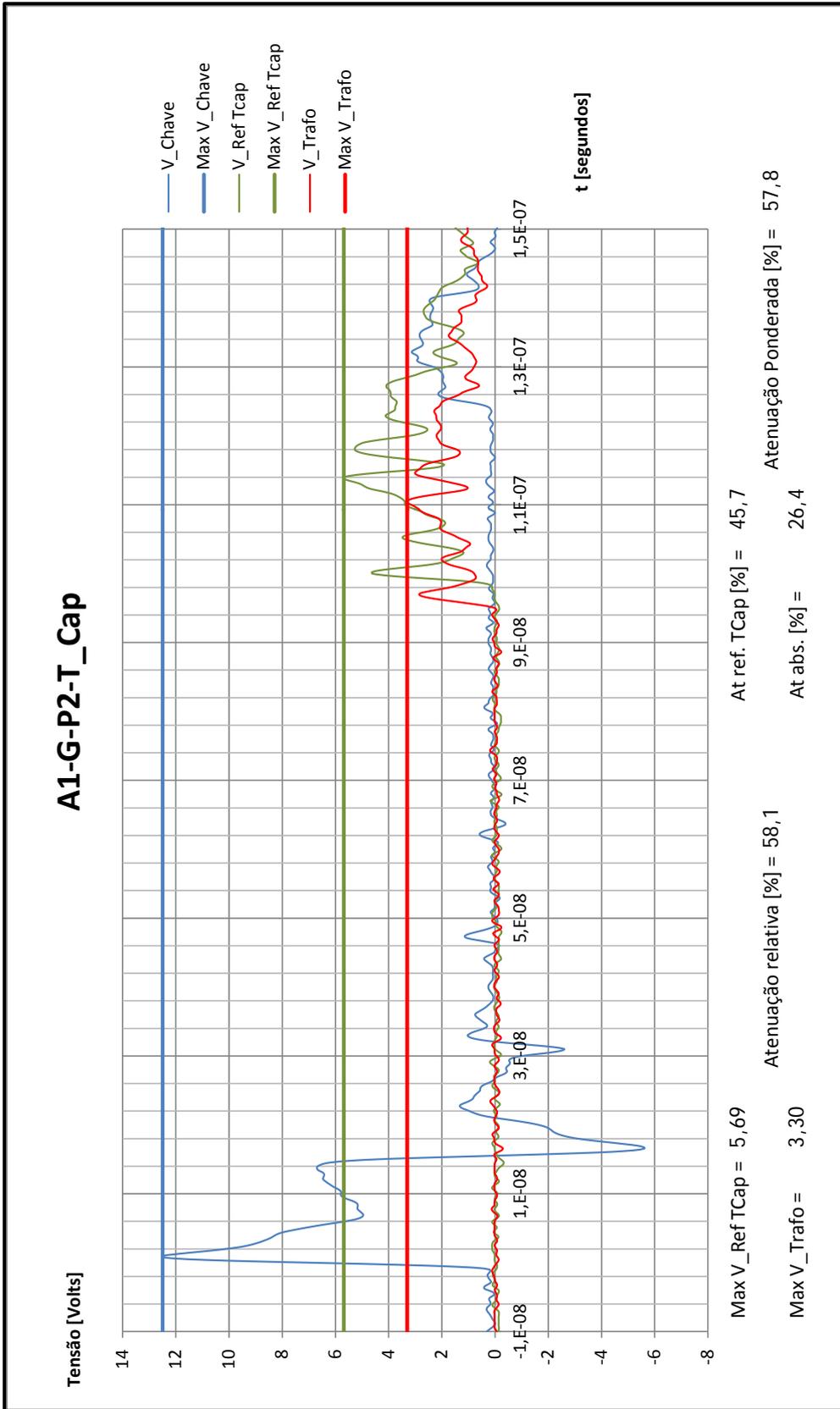


Figura 82 – Oscilograma na condição A1-G-P2-T_Cap

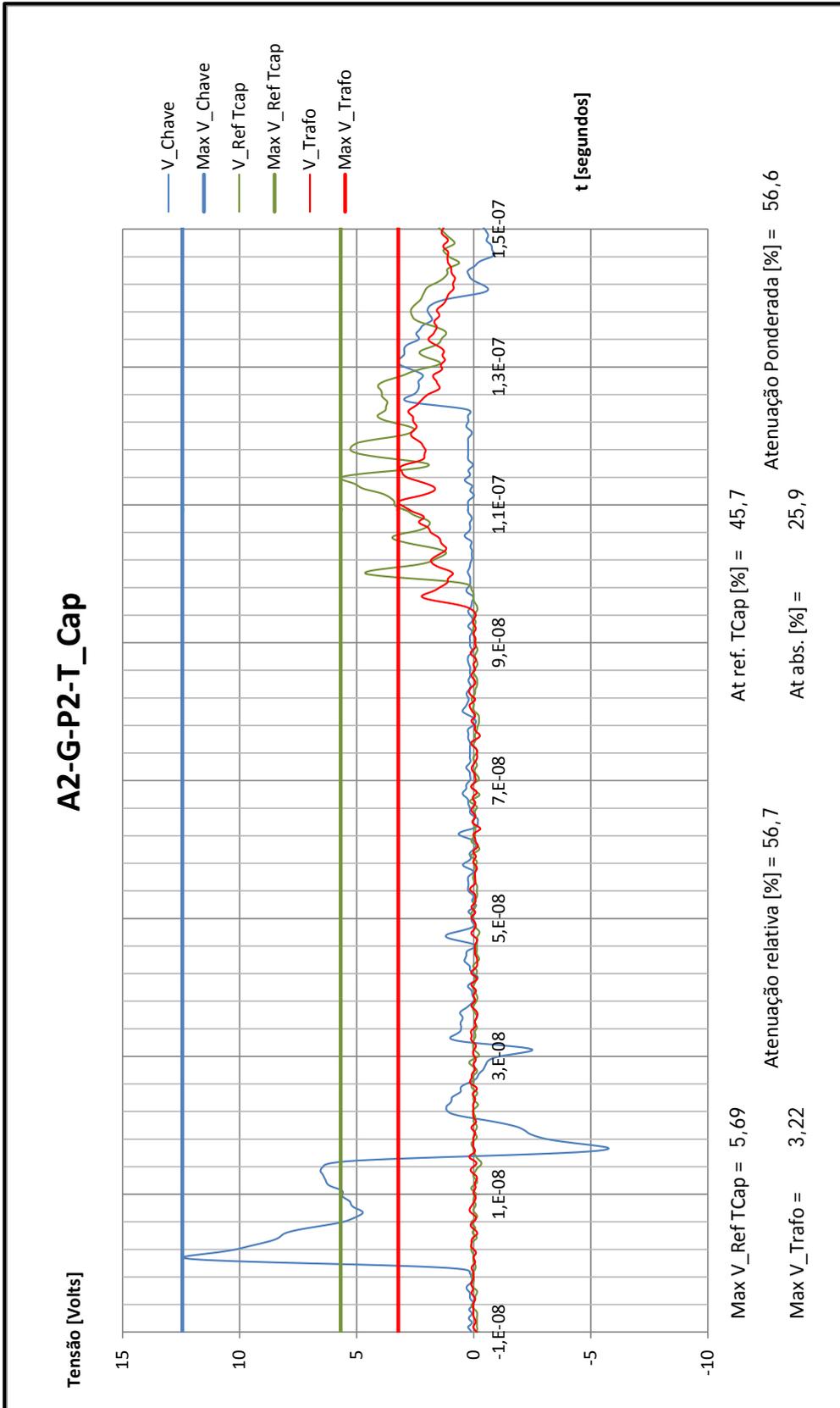


Figura 83 – Oscilograma na condição A2-G-P2-T_Cap

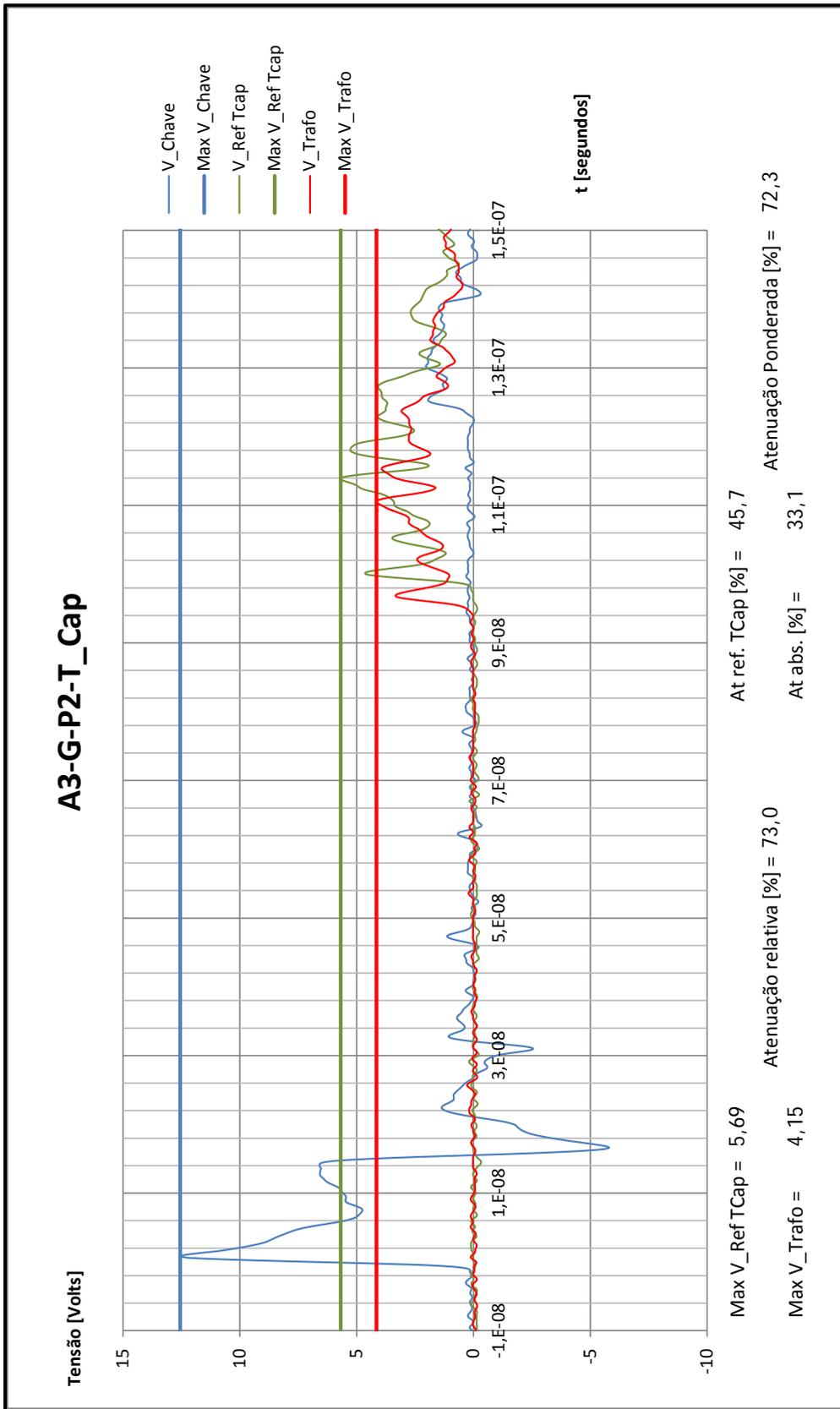


Figura 84 – Oscilograma na condição A3-G-P2-T_Cap

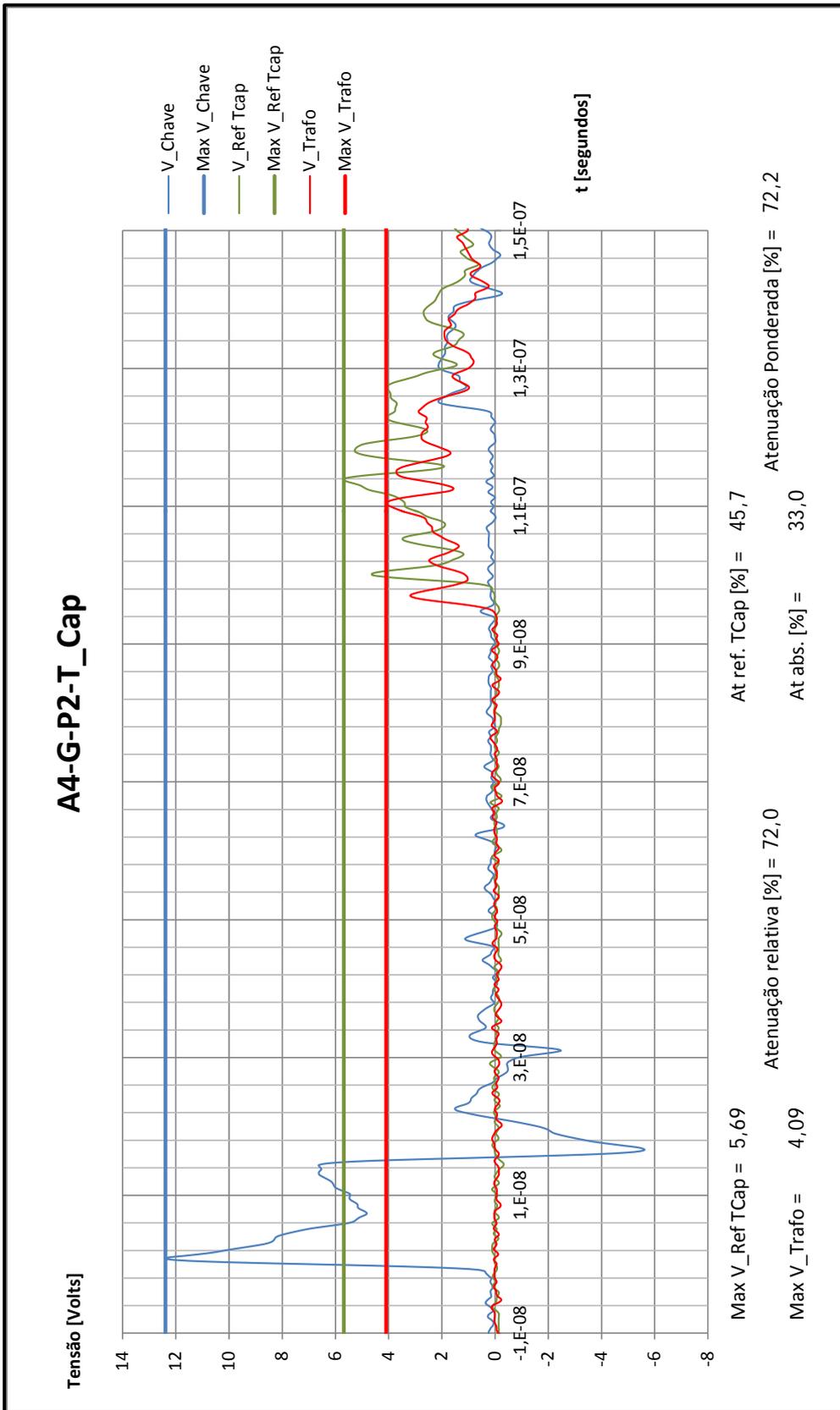


Figura 85 – Oscilograma na condição A4-G-P2-T_Cap

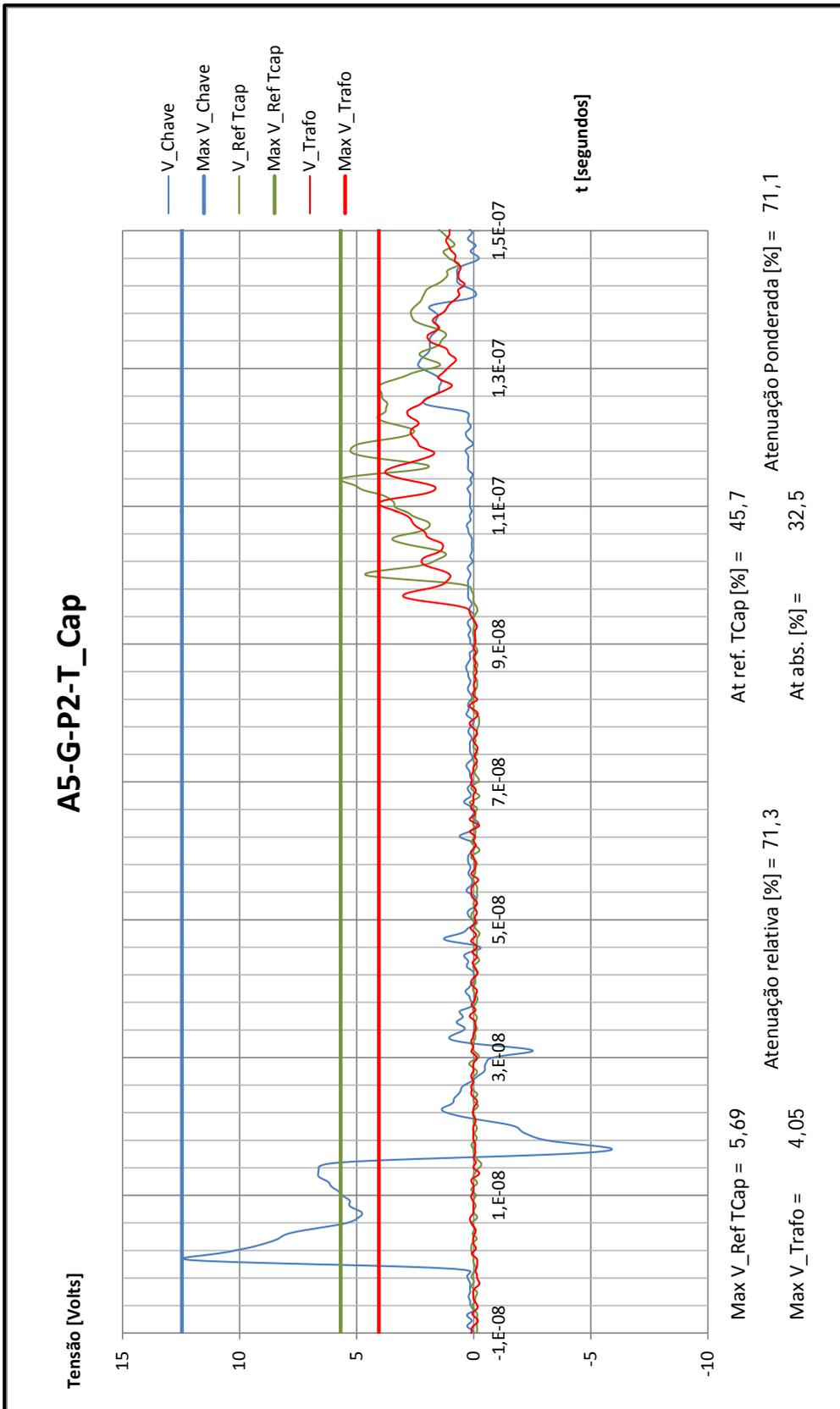


Figura 86 – Oscilograma na condição A5-G-P2-T_Cap

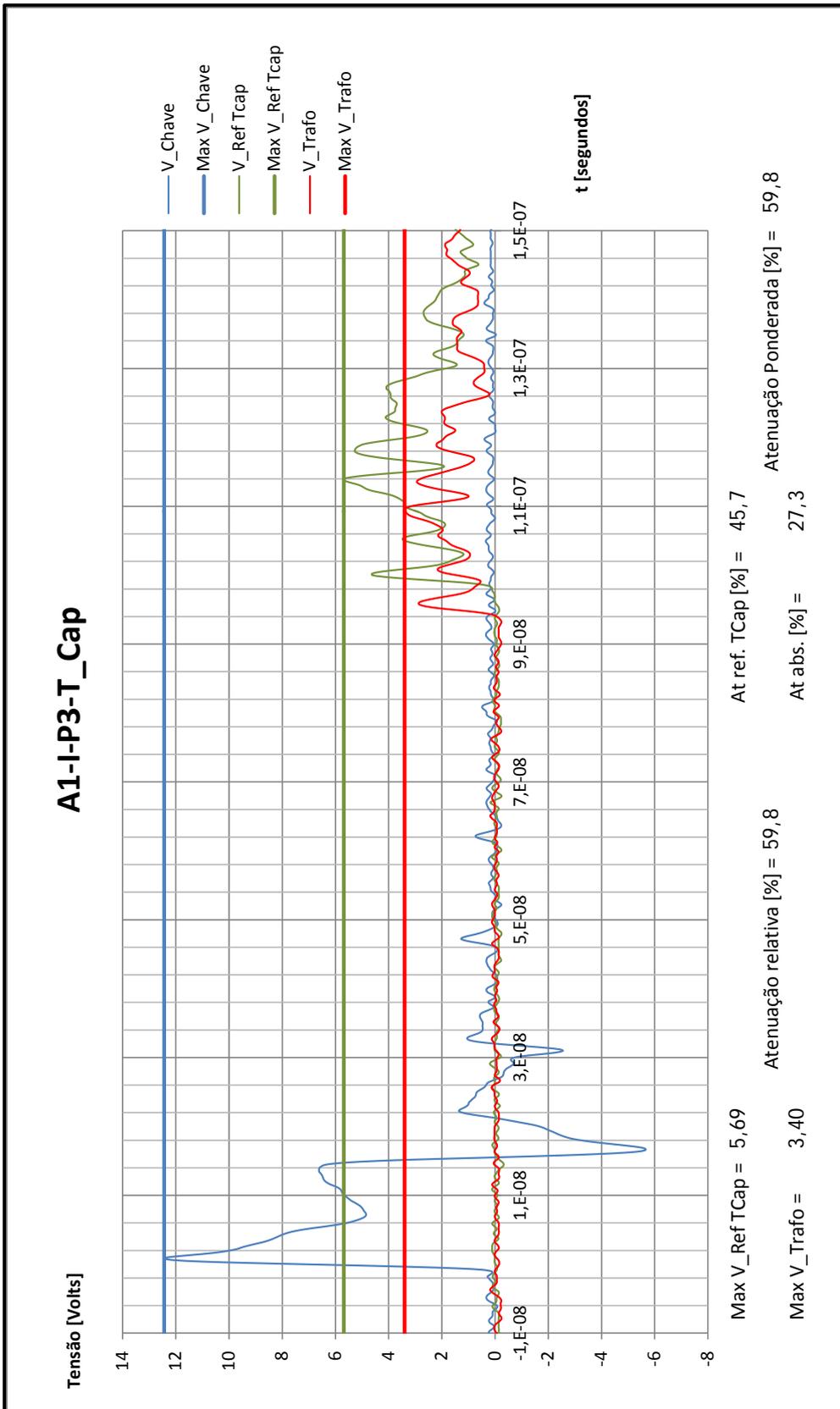


Figura 87 – Oscilograma na condição A1-I-P3-T_Cap

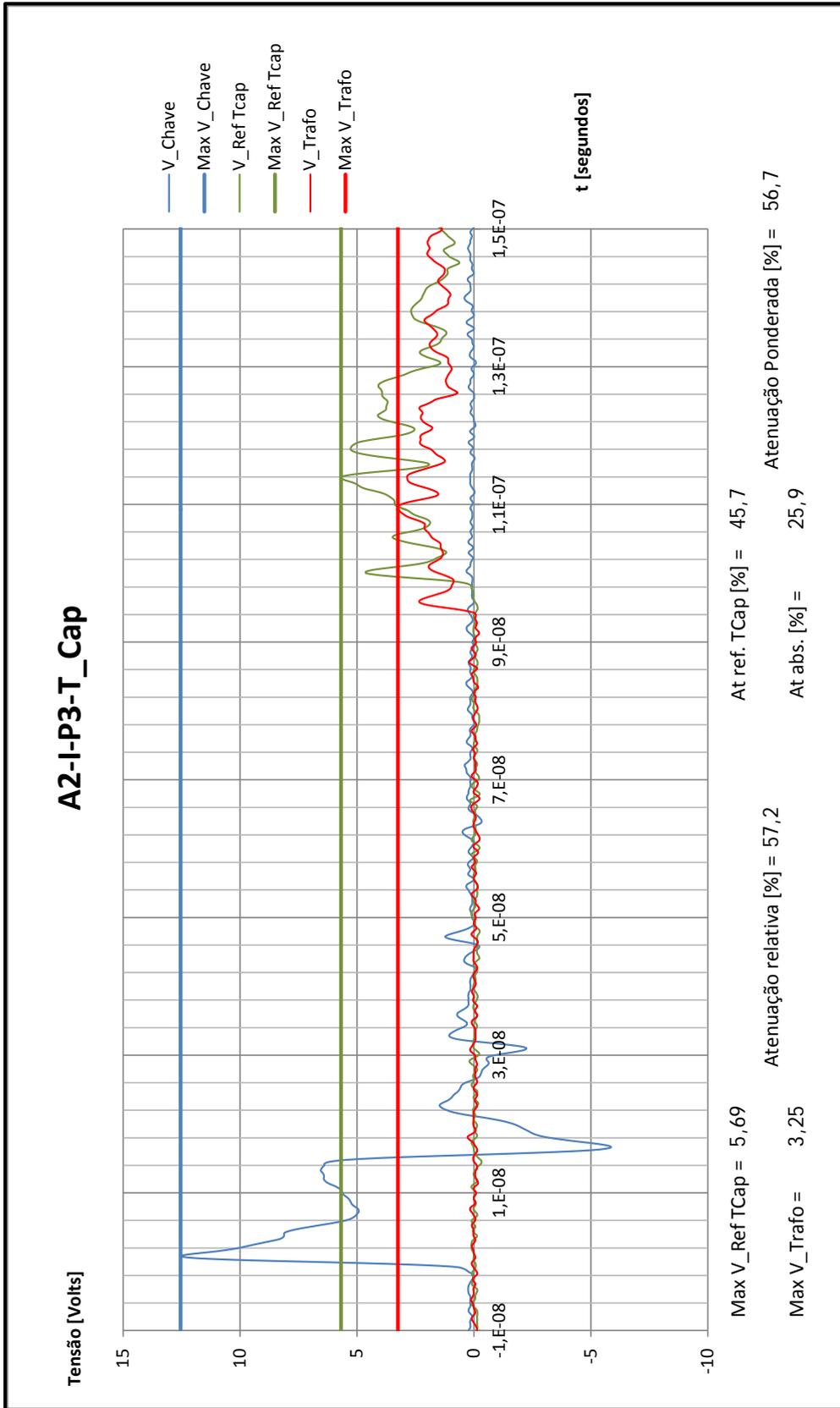


Figura 88 – Oscilograma na condição A2-I-P3-T_Cap

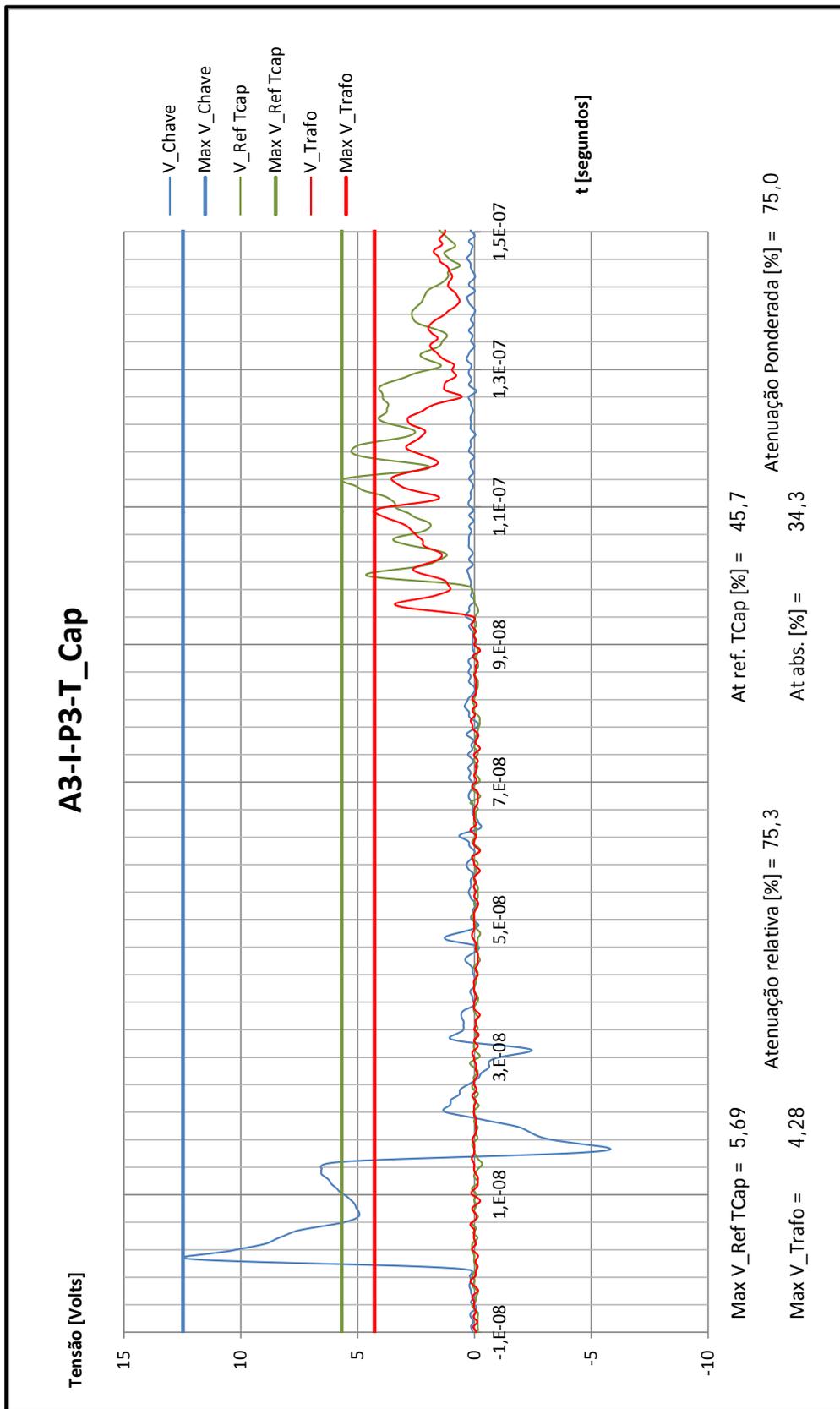


Figura 89 – Oscilograma na condição A3-I-P3-T_Cap

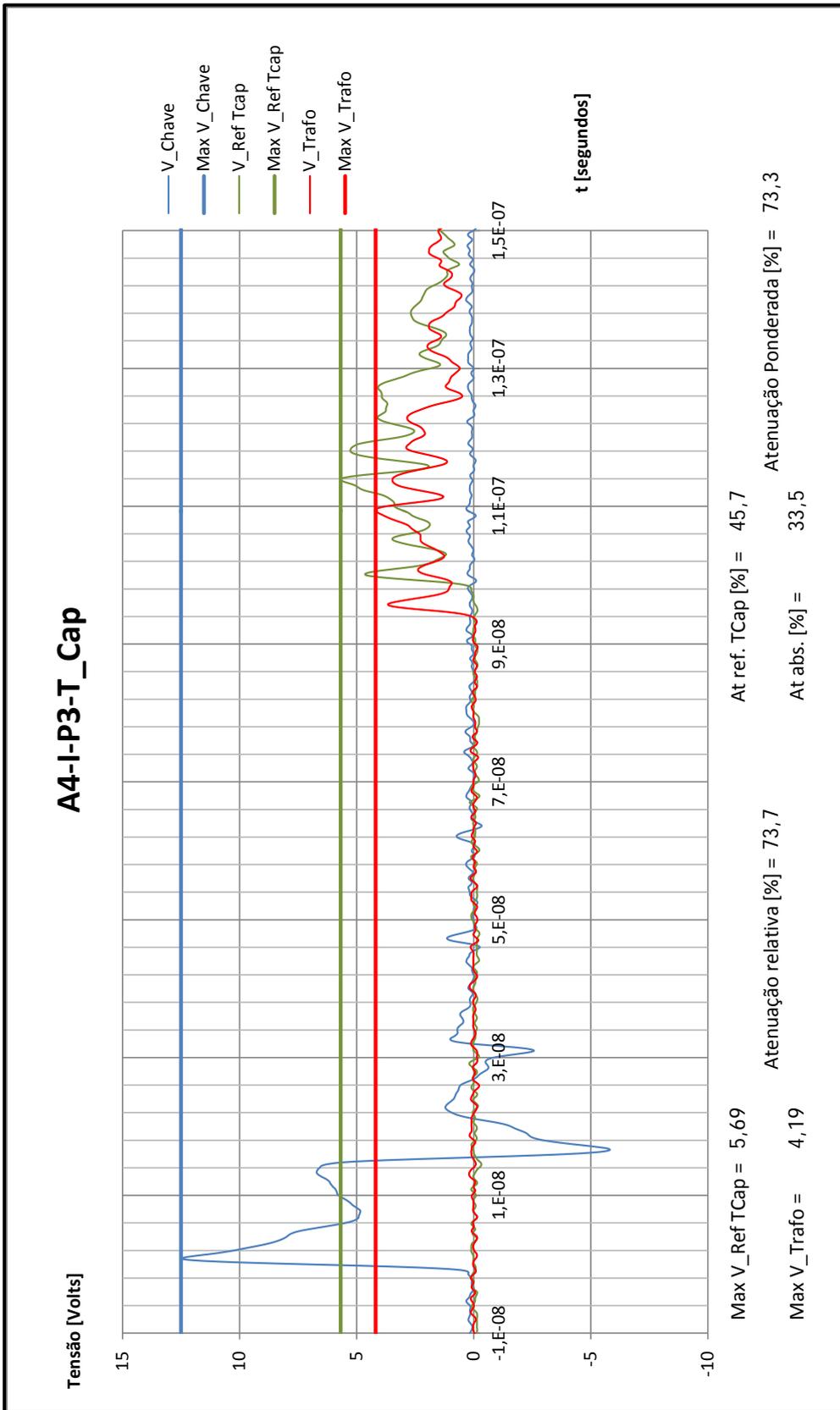


Figura 90 – Oscilograma na condição A4-IP3-T_Cap

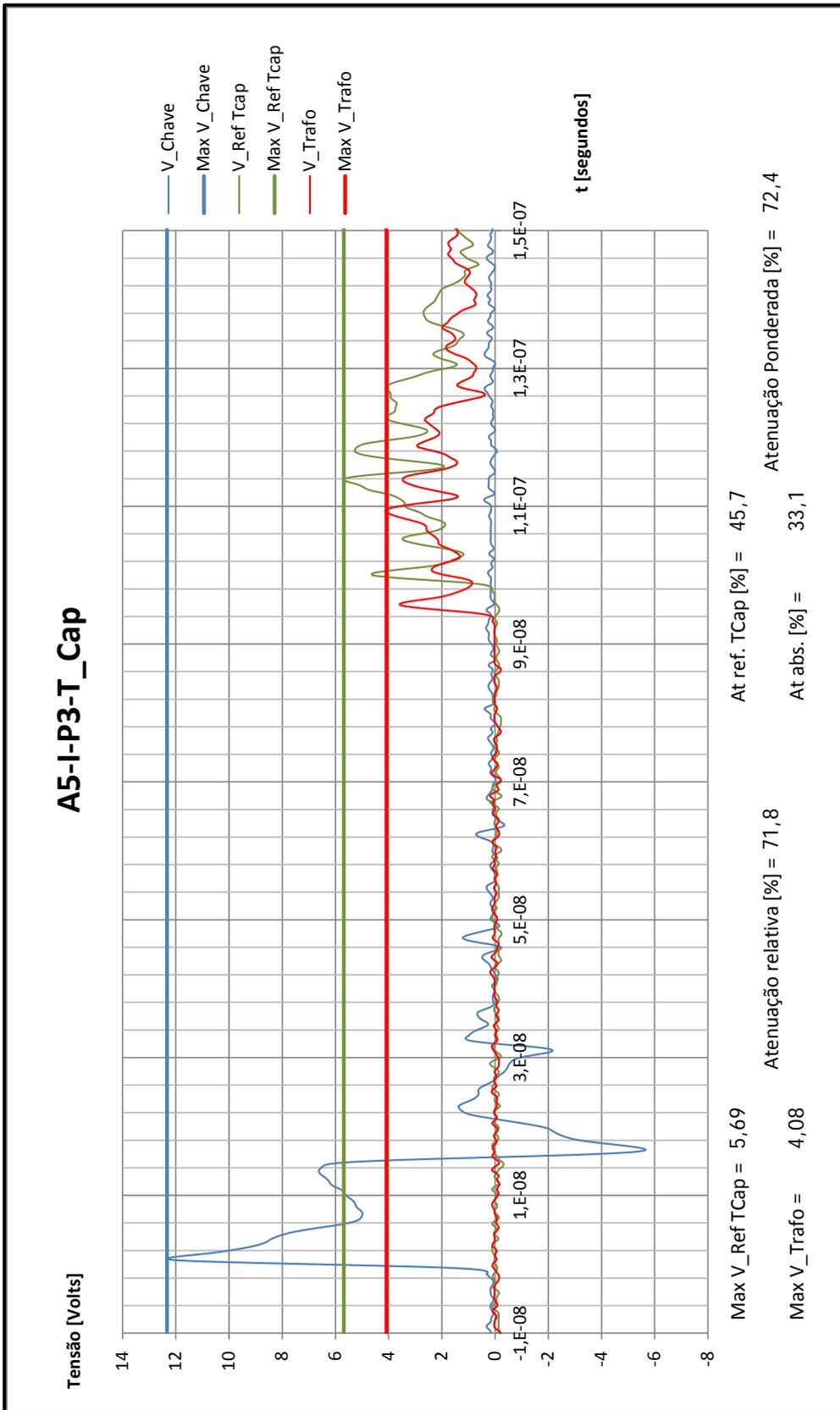


Figura 91 – Oscilograma na condição A5-I-P3-T_Cap

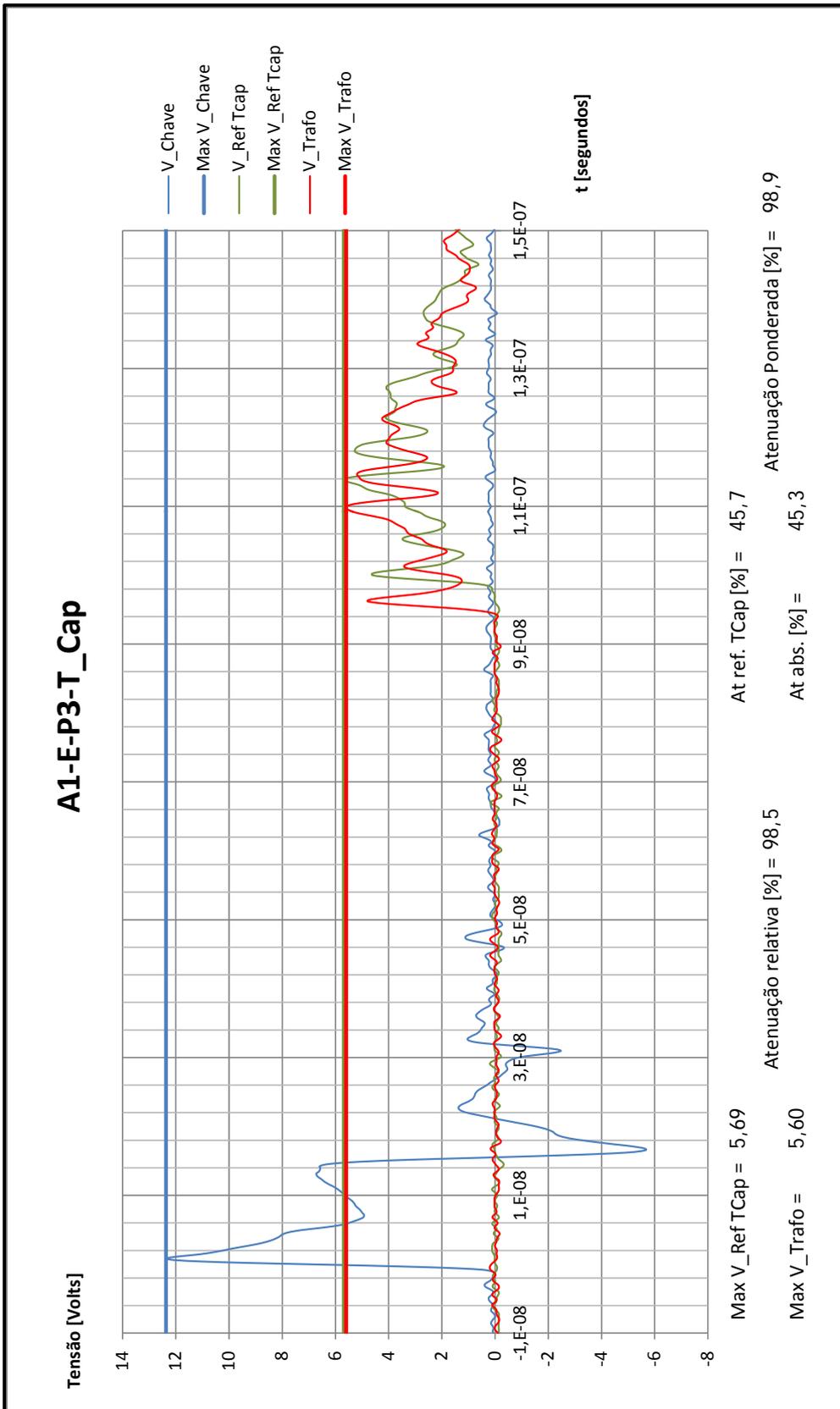


Figura 92 – Oscilograma na condição A1-E-P3-T_Cap

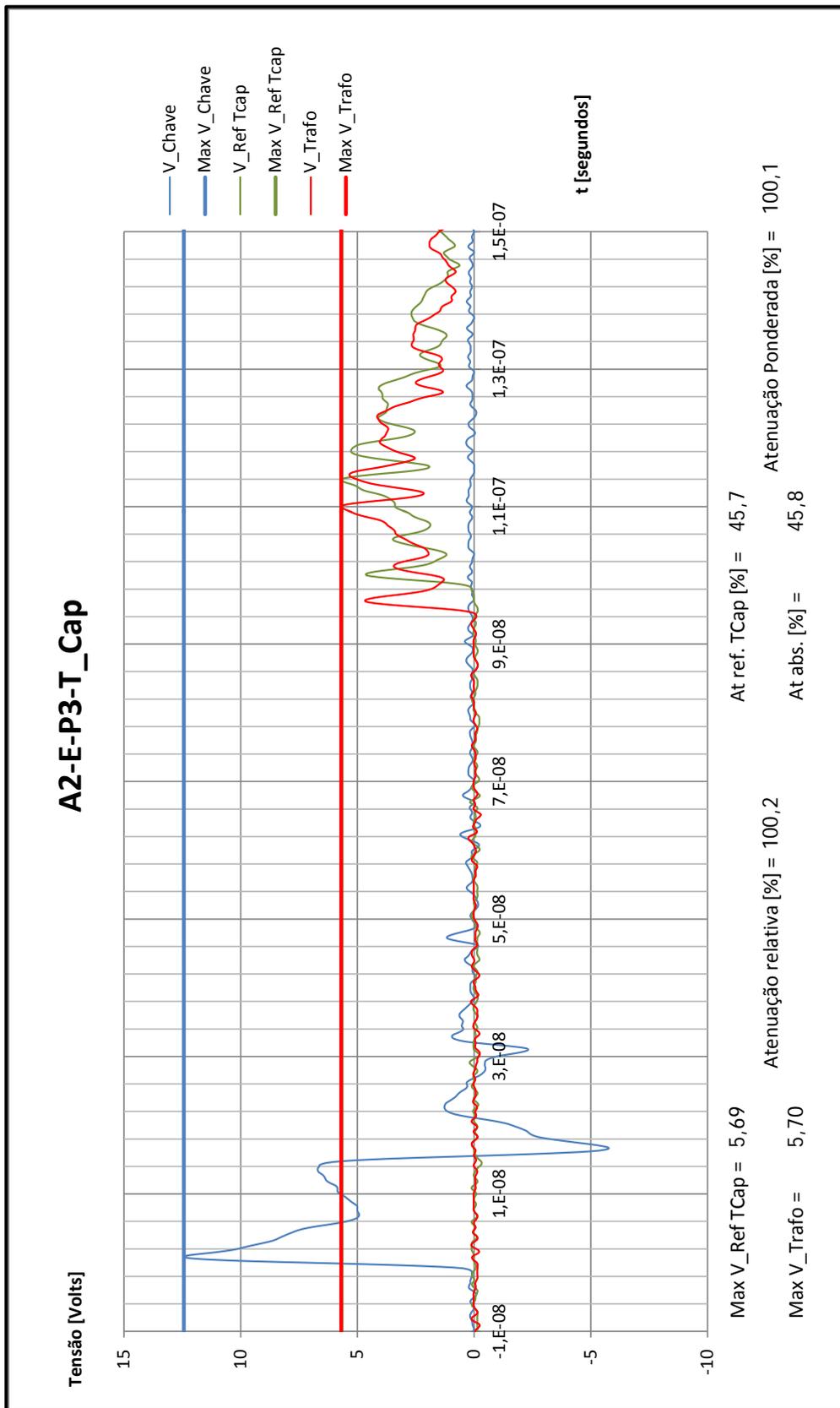


Figura 93 – Oscilograma na condição A2-E-P3-T_Cap

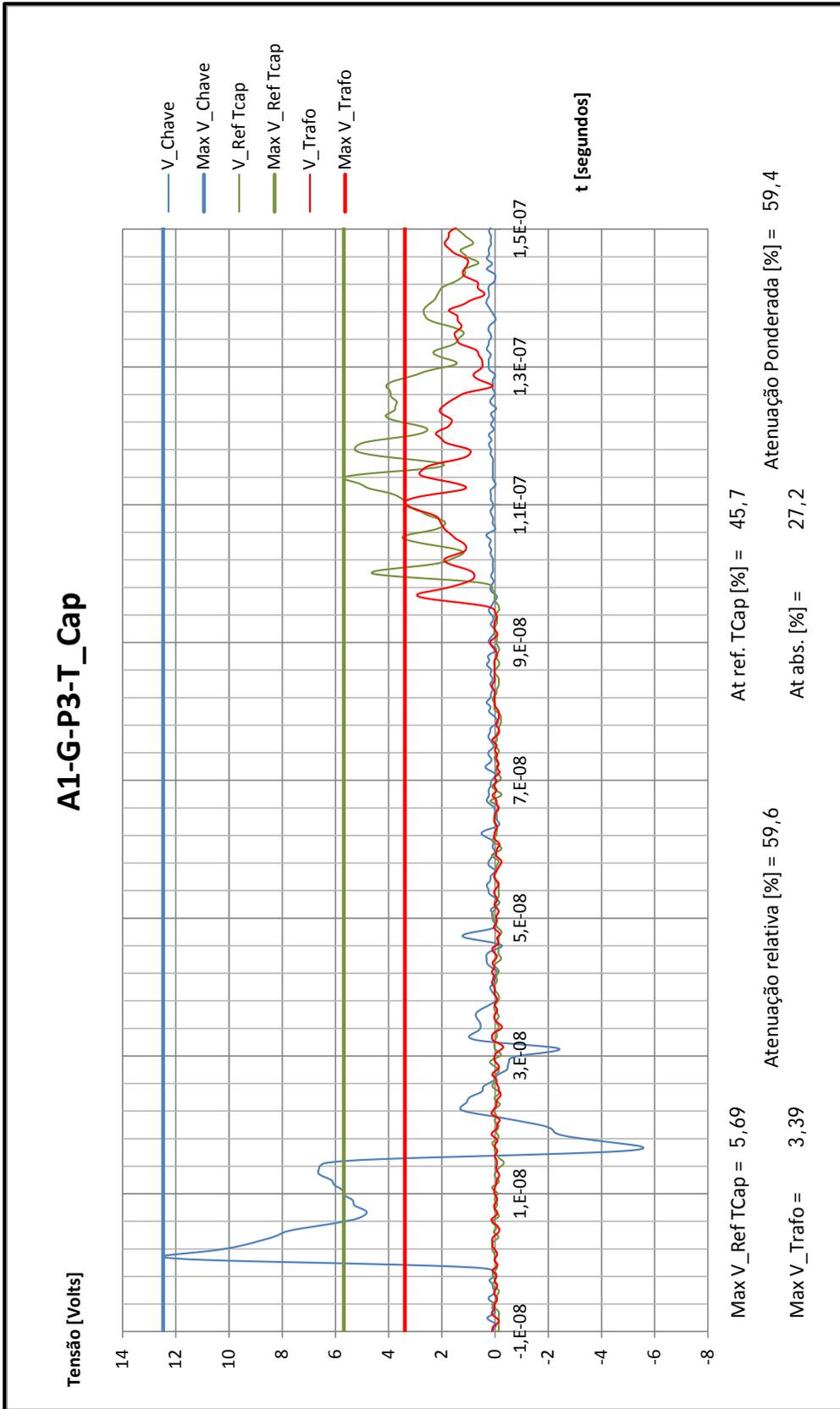


Figura 94 – Oscilograma na condição A1-G-P3-T_Cap

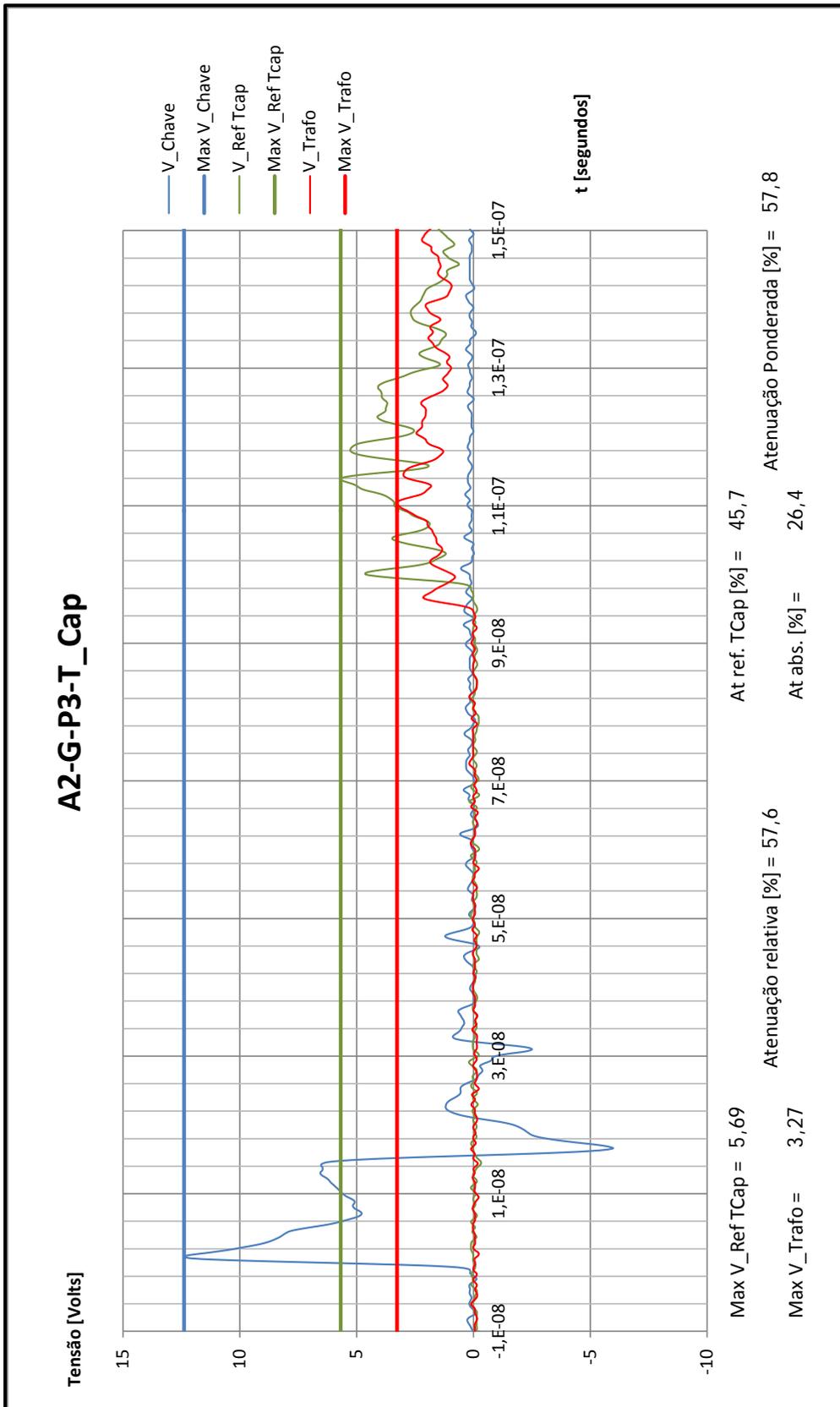


Figura 95 – Oscilograma na condição A2-G-P3-T_Cap

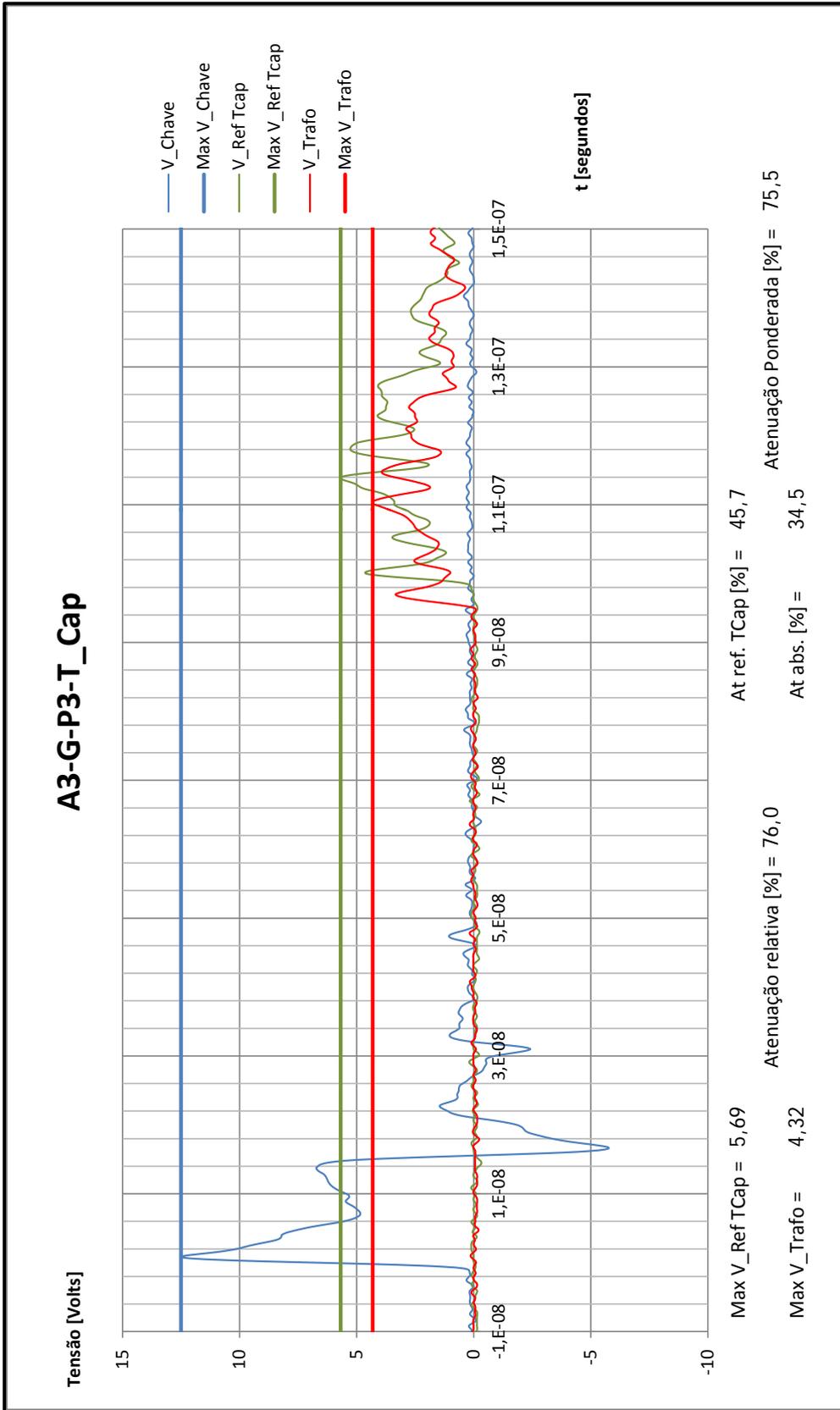


Figura 96 – Oscilograma na condição A3-G-P3-T_Cap

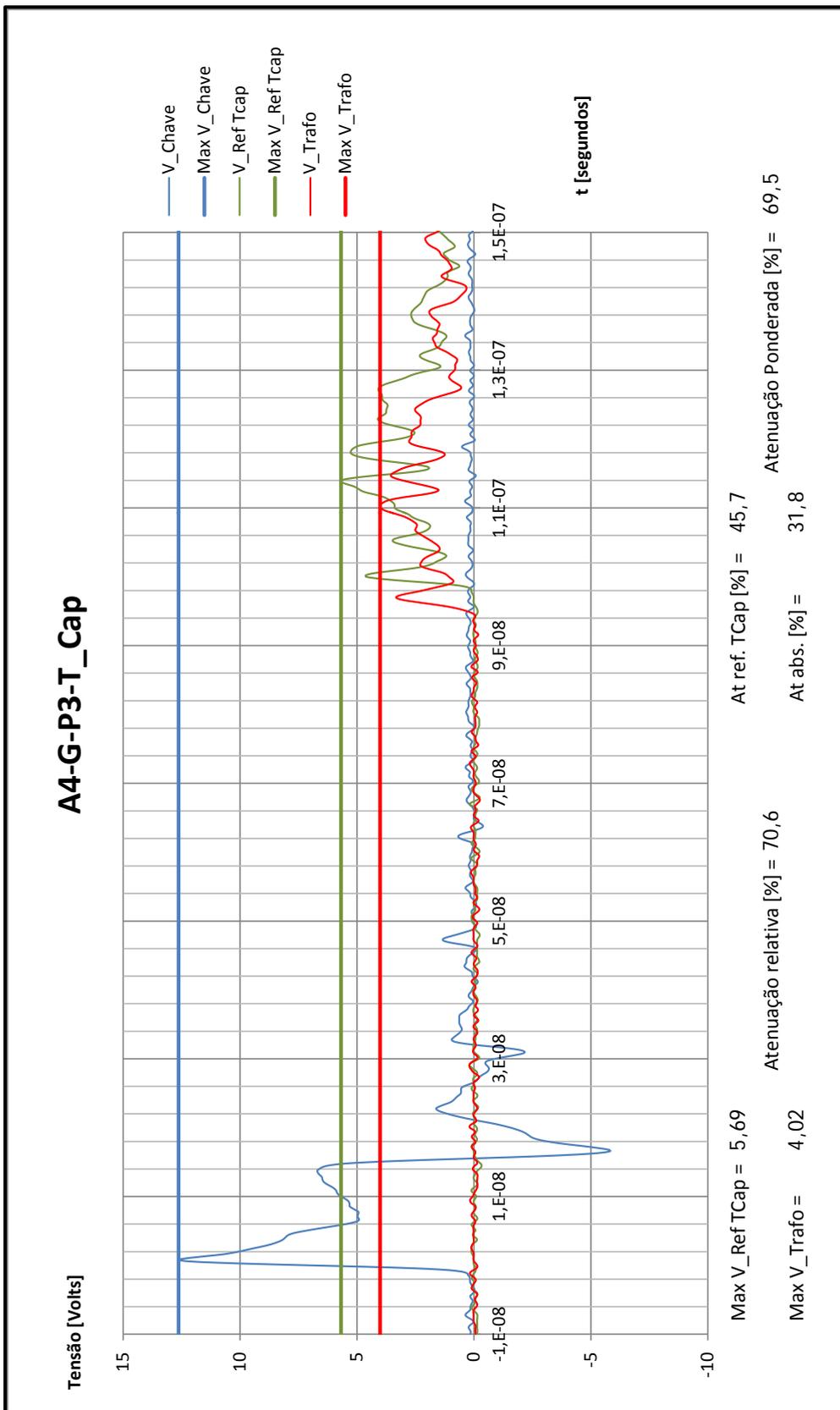


Figura 97 – Oscilograma na condição A4-G-P3-T_Cap

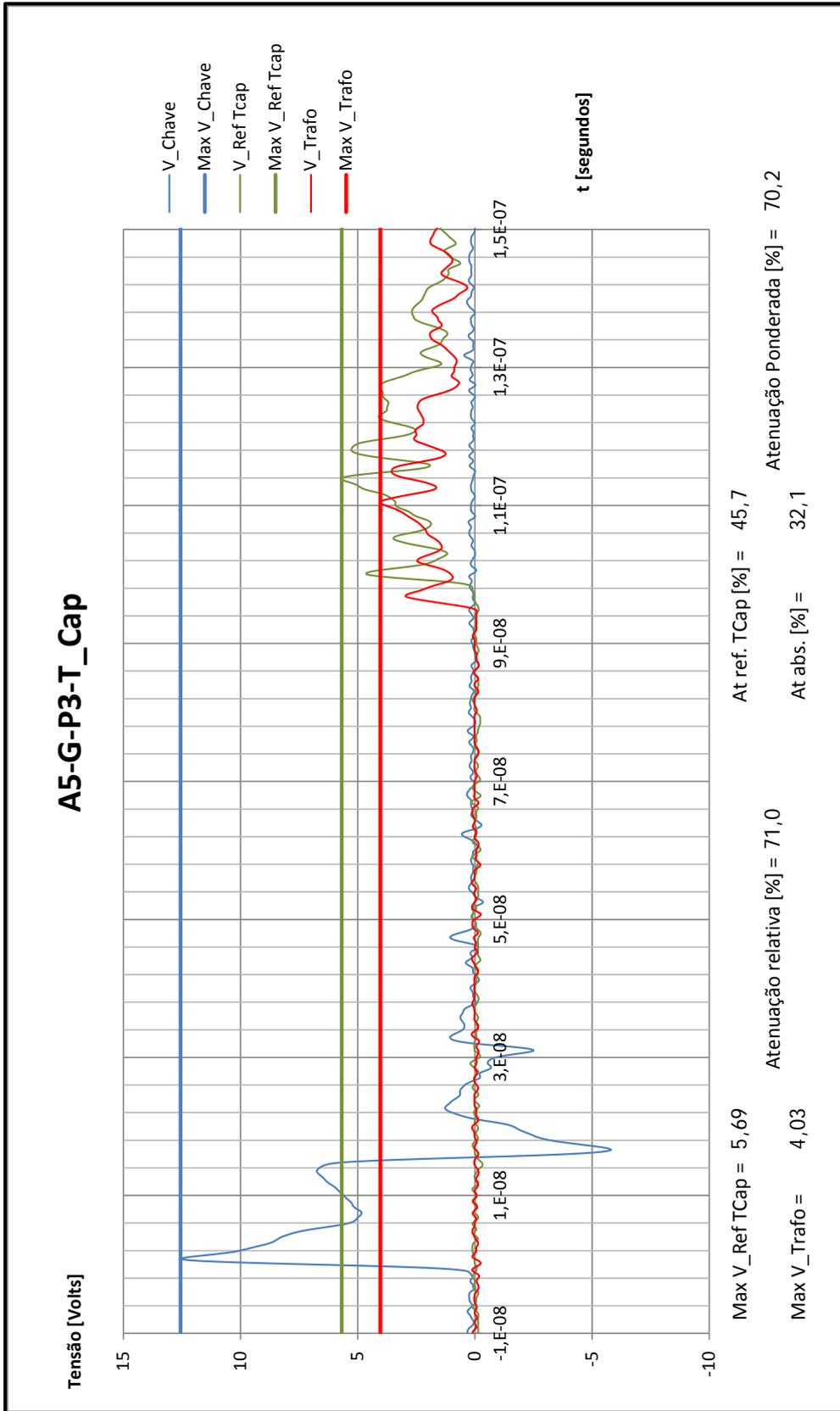


Figura 98 – Oscilograma na condição A5-G-P3-T_Cap

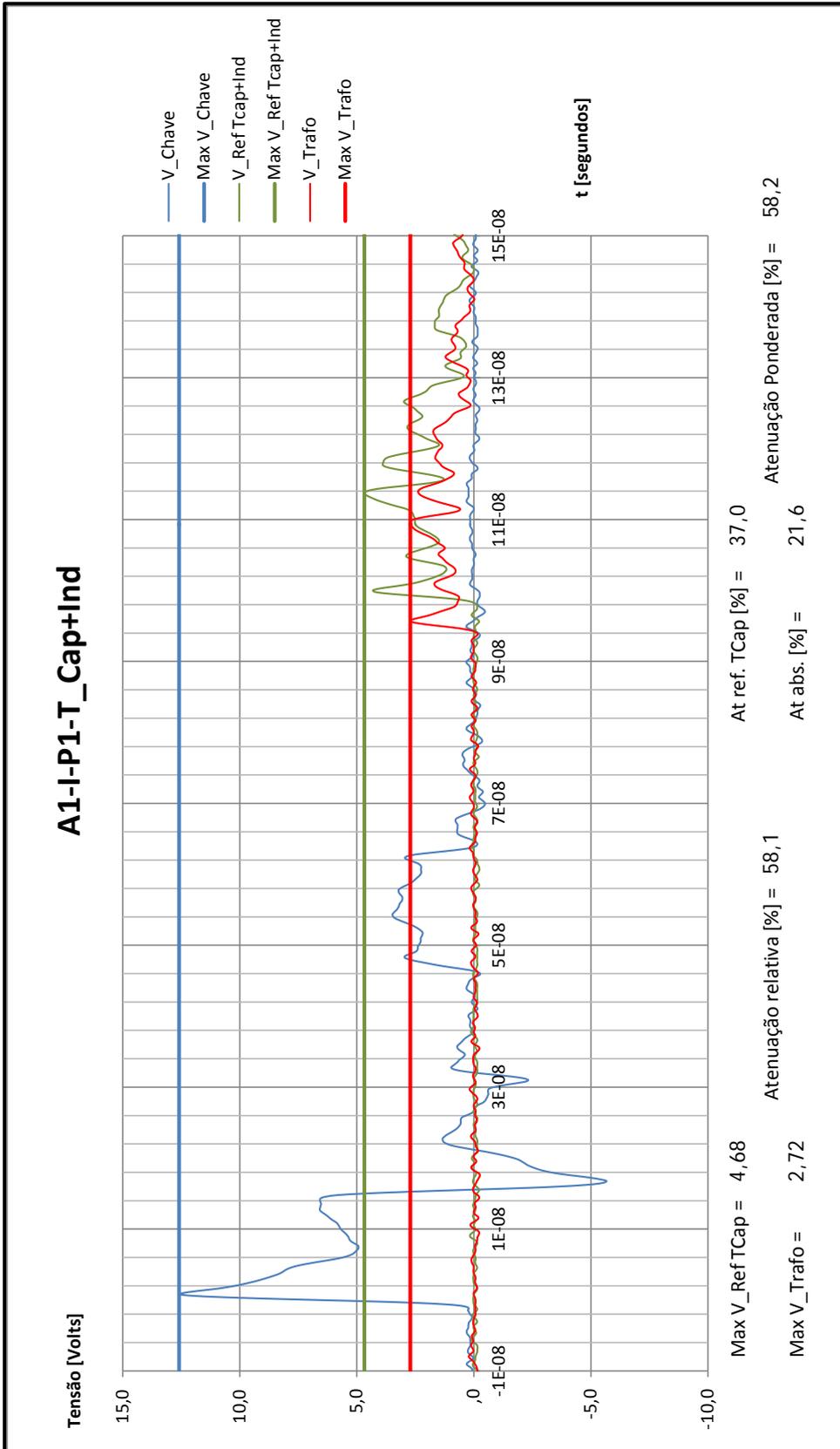


Figura 99 – Oscilograma na condição A1-I-P1-T_Cap+Ind

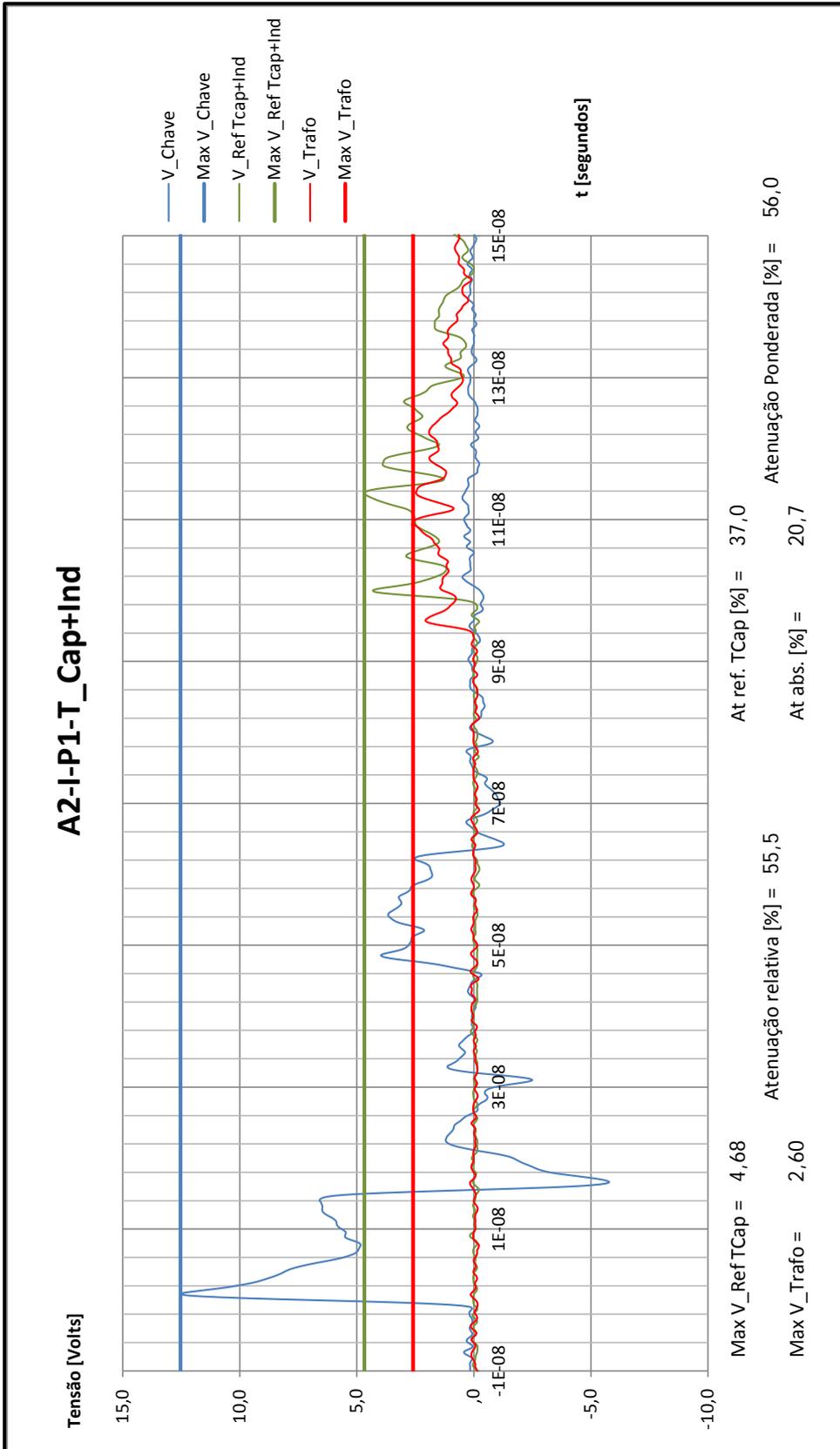


Figura 100 – Oscilograma na condição A2-I-P1-T_Cap+Ind

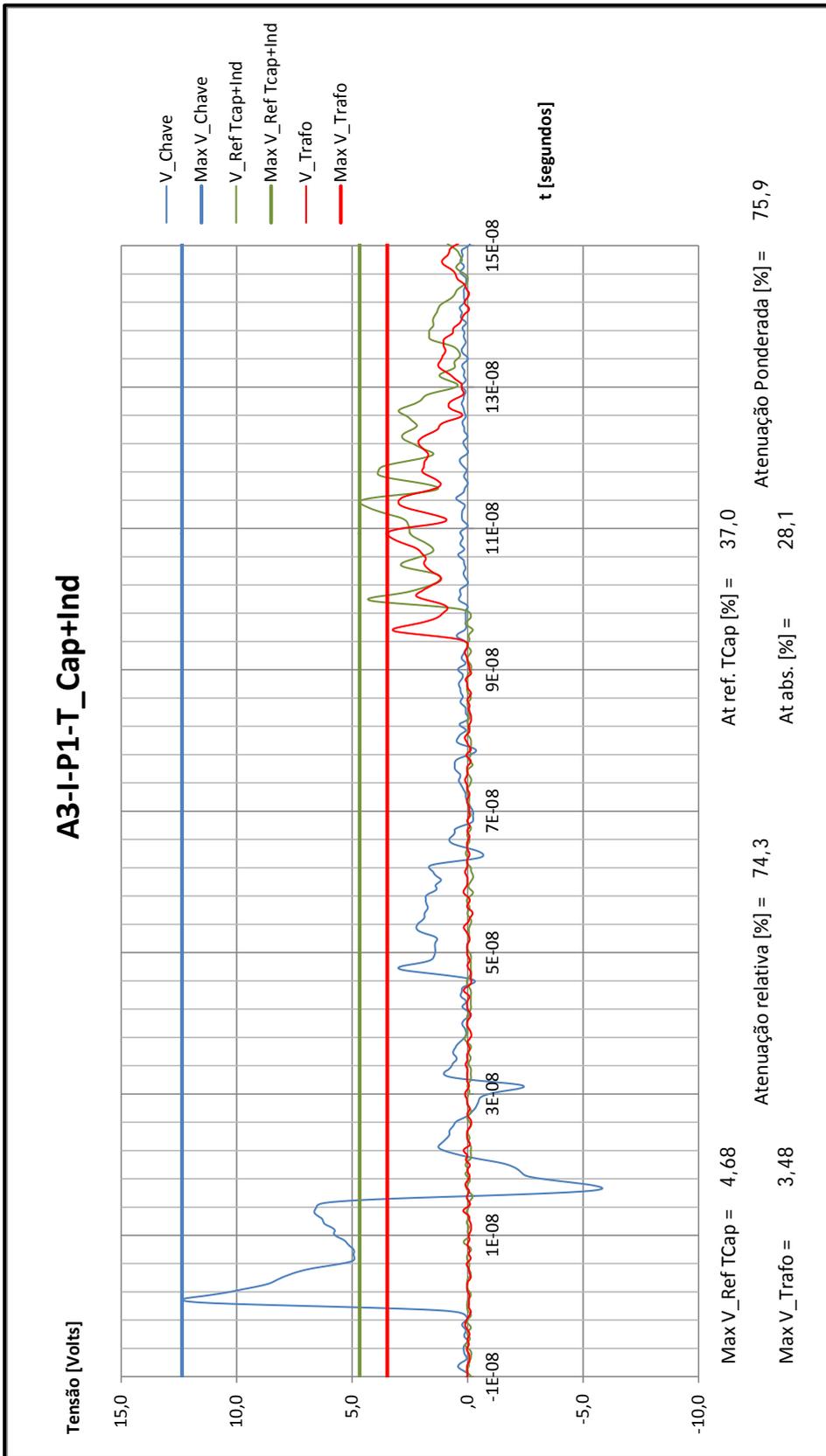


Figura 101 – Oscilograma na condição A3-I-P1-T_Cap+Ind

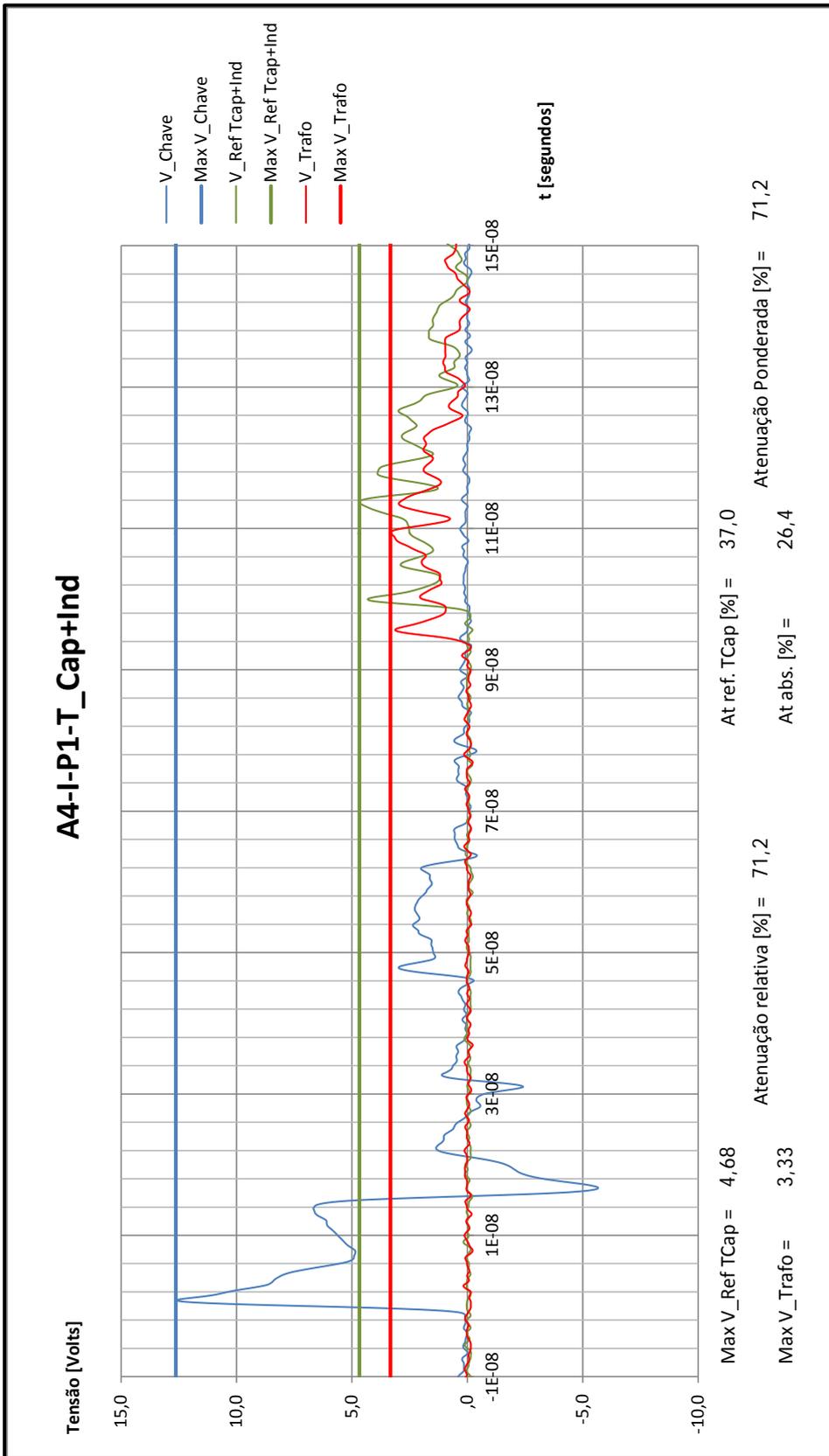


Figura 102 – Oscilograma na condição A4-I-P1-T_Cap+Ind

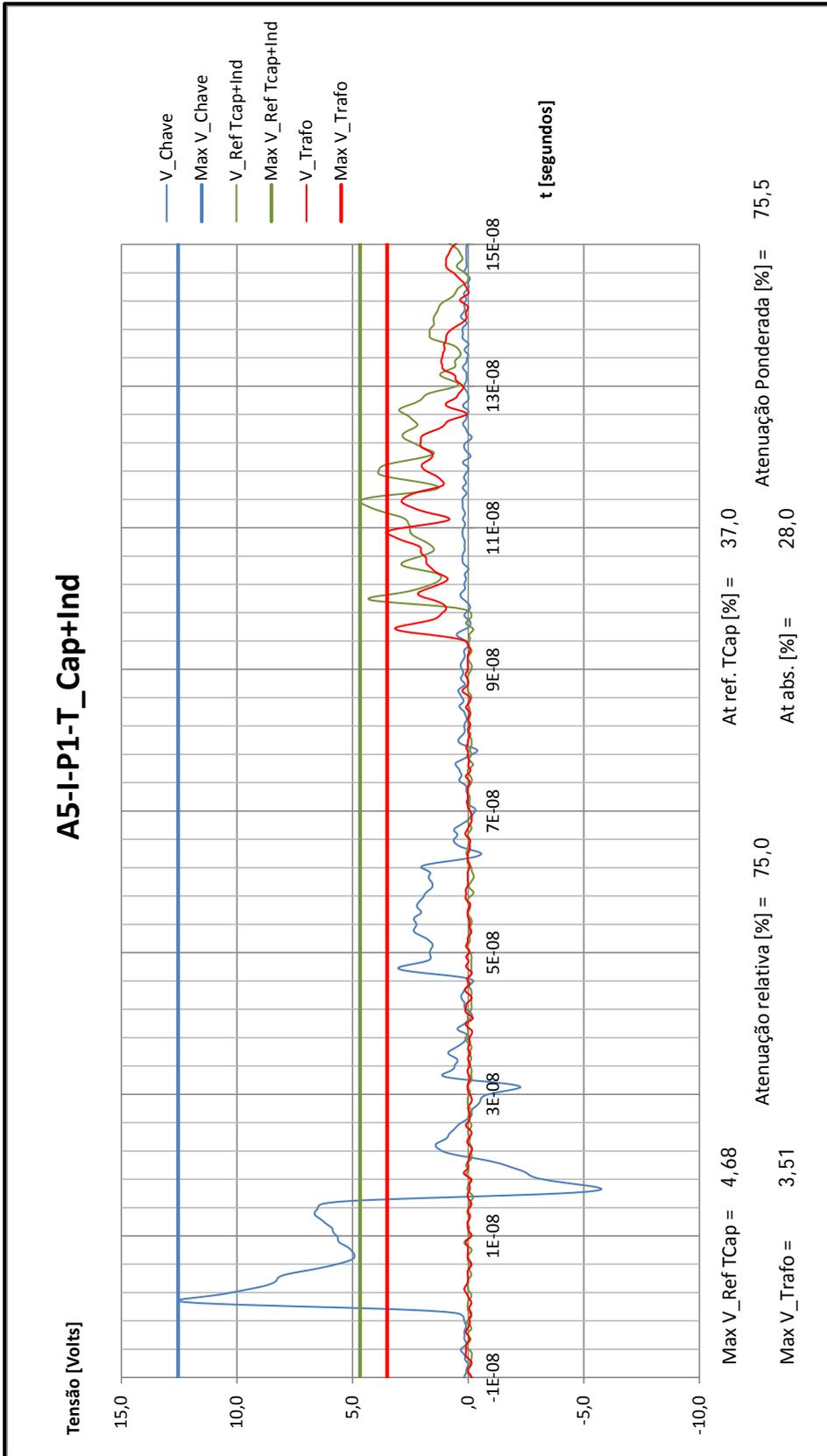


Figura 103 – Oscilograma na condição A5-I-P1-T_Cap+Ind

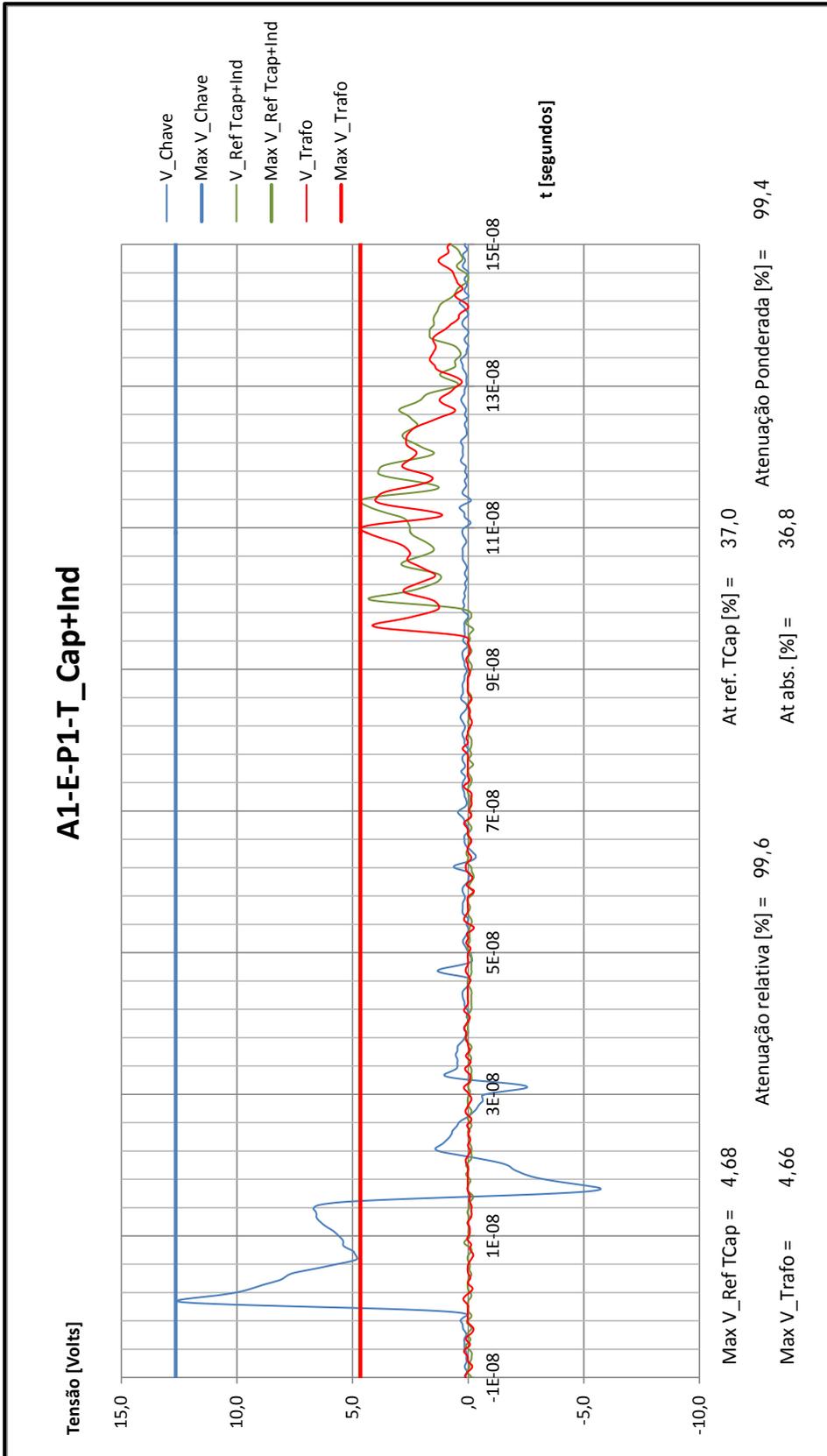


Figura 104 – Oscilograma na condição A1-E-P1-T_Cap+Ind

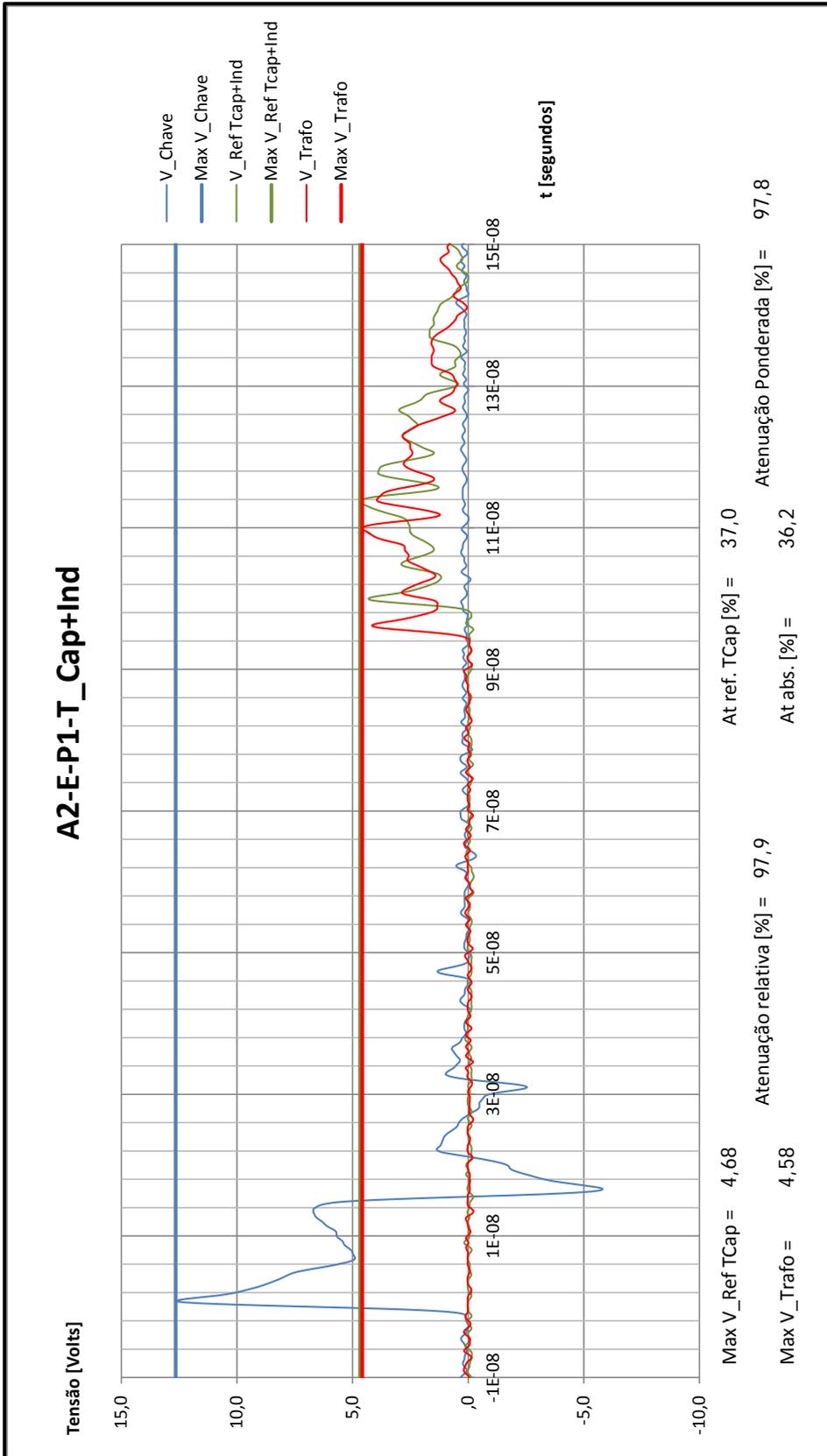


Figura 105 – Oscilograma na condição A2-E-P1-T_Cap+Ind

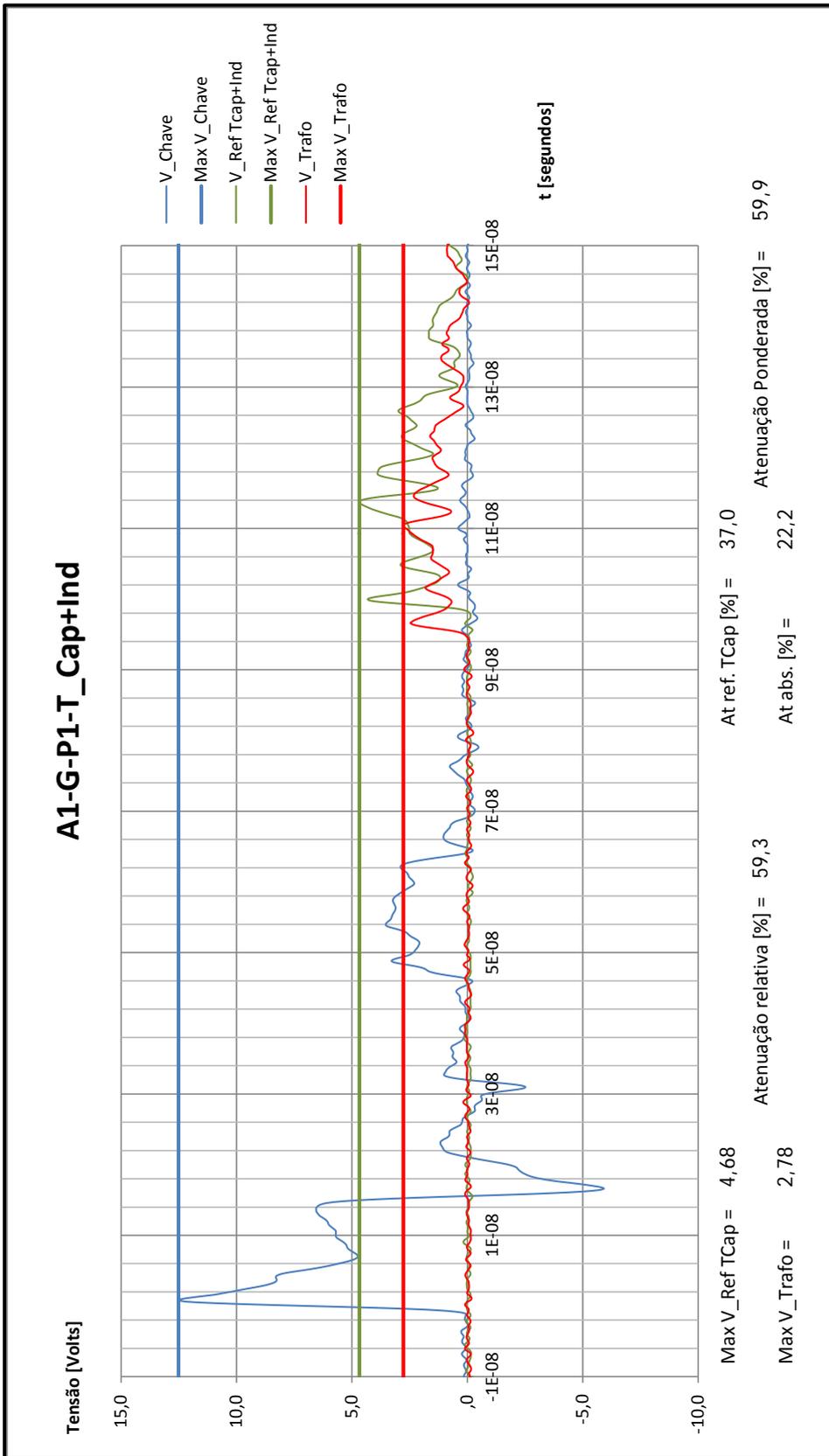


Figura 106 – Oscilograma na condição A1-G-P1-T_Cap+Ind

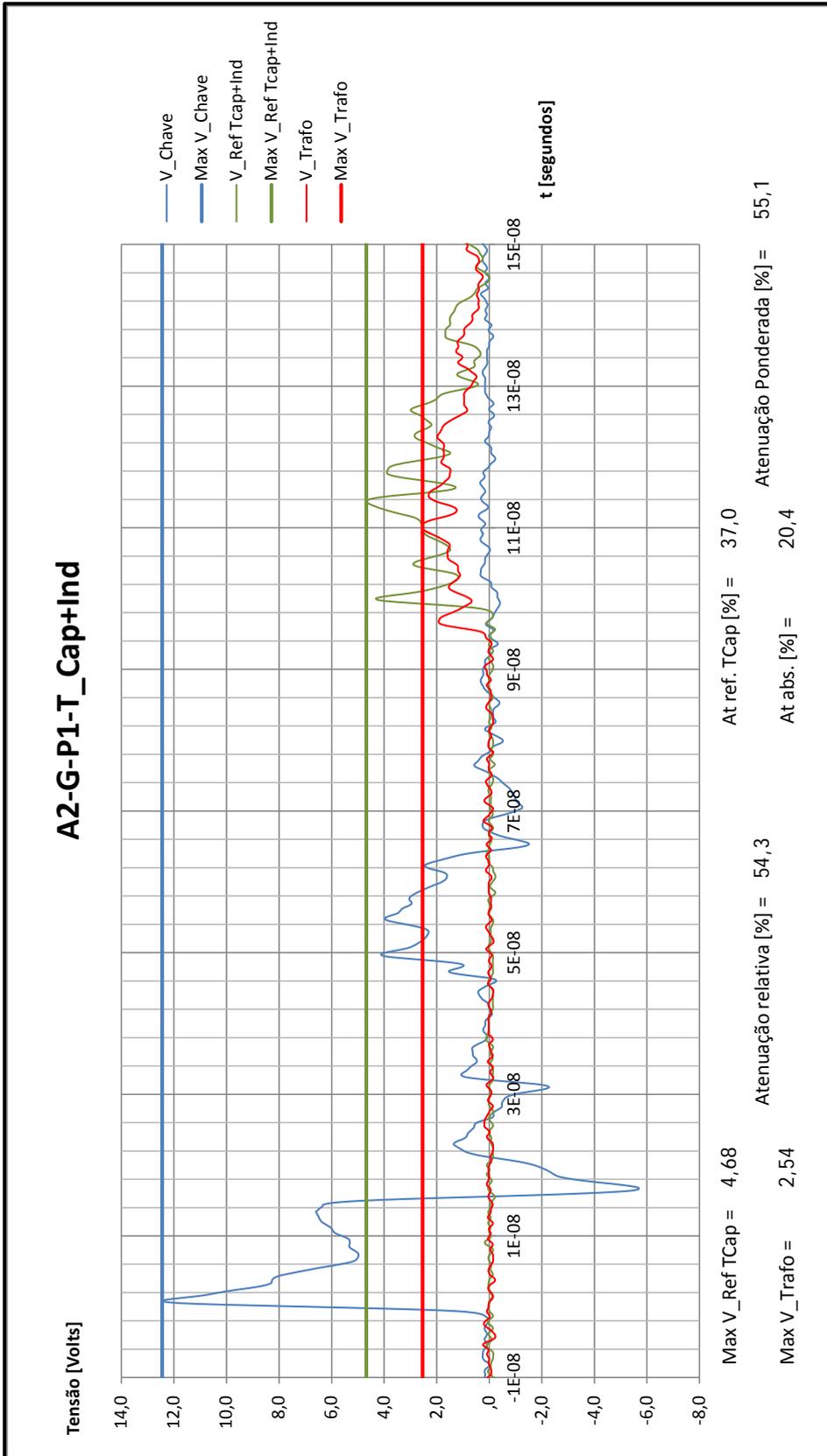


Figura 107 – Oscilograma na condição A2-G-P1-T_Cap+Ind

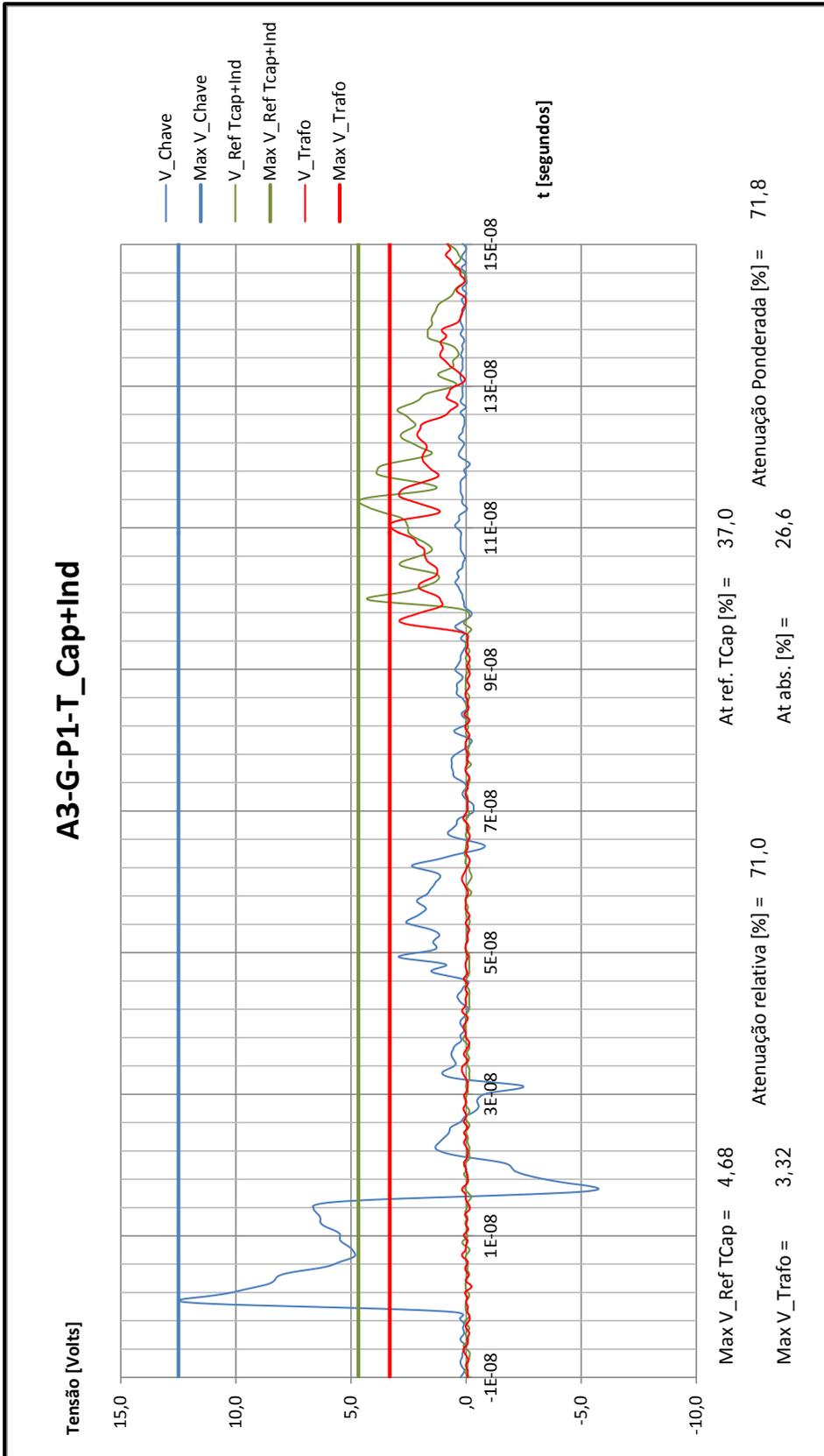


Figura 108 – Oscilograma na condição A3-G-P1-T_Cap+Ind

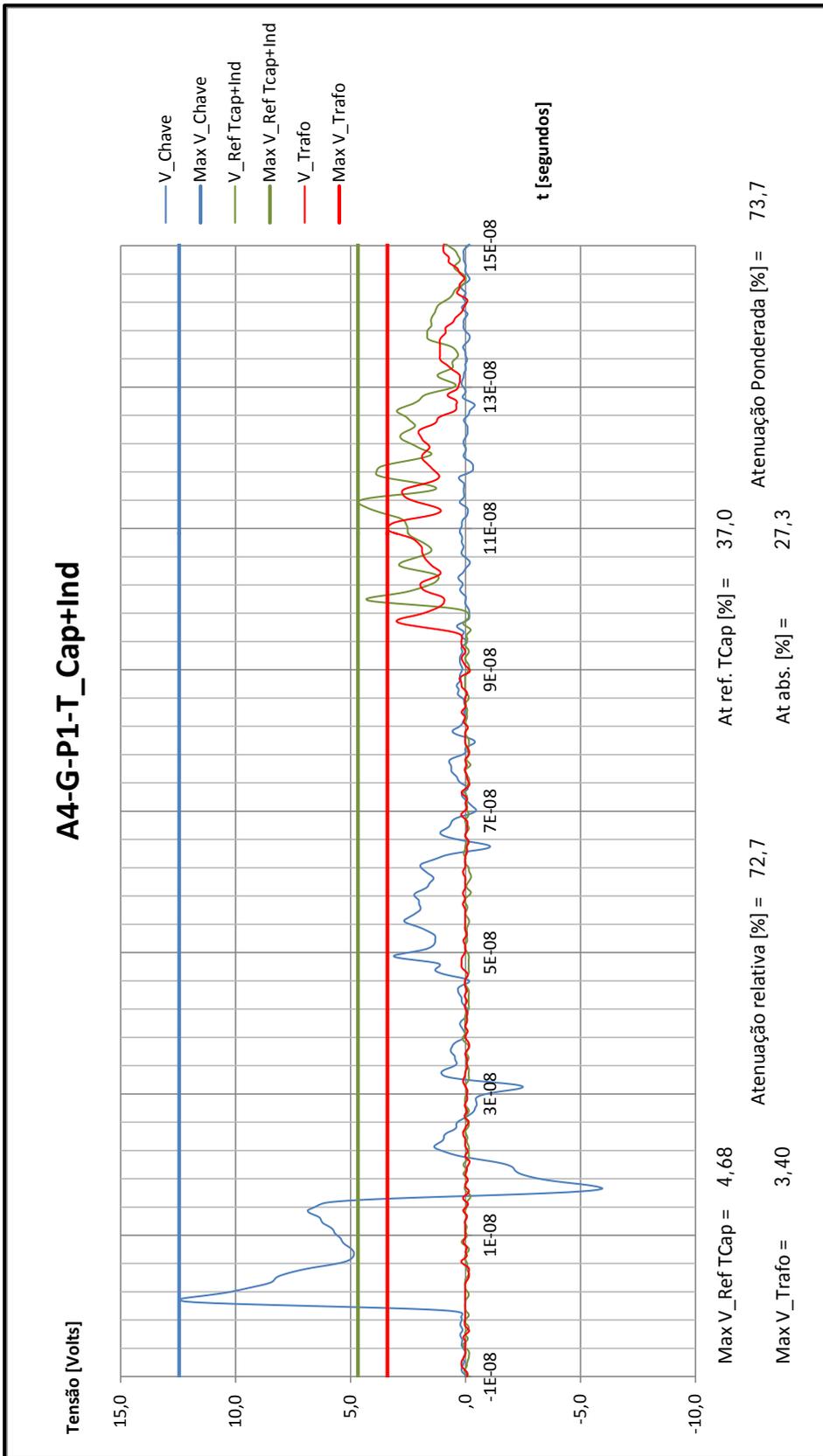


Figura 109 – Oscilograma na condição A4-G-P1-T_Cap+Ind

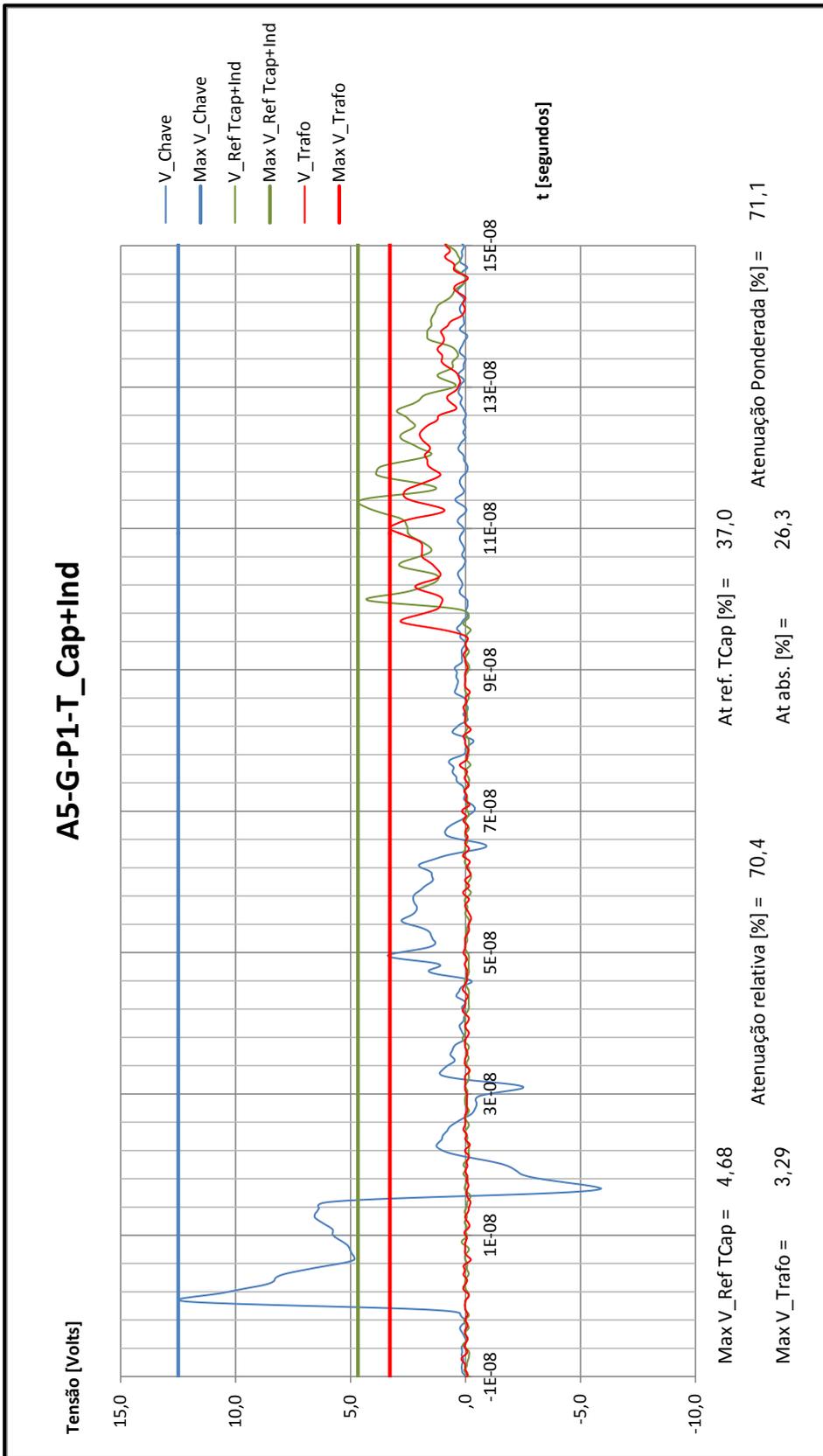


Figura 110 – Oscilograma na condição A5-G-P1-T_Cap+Ind

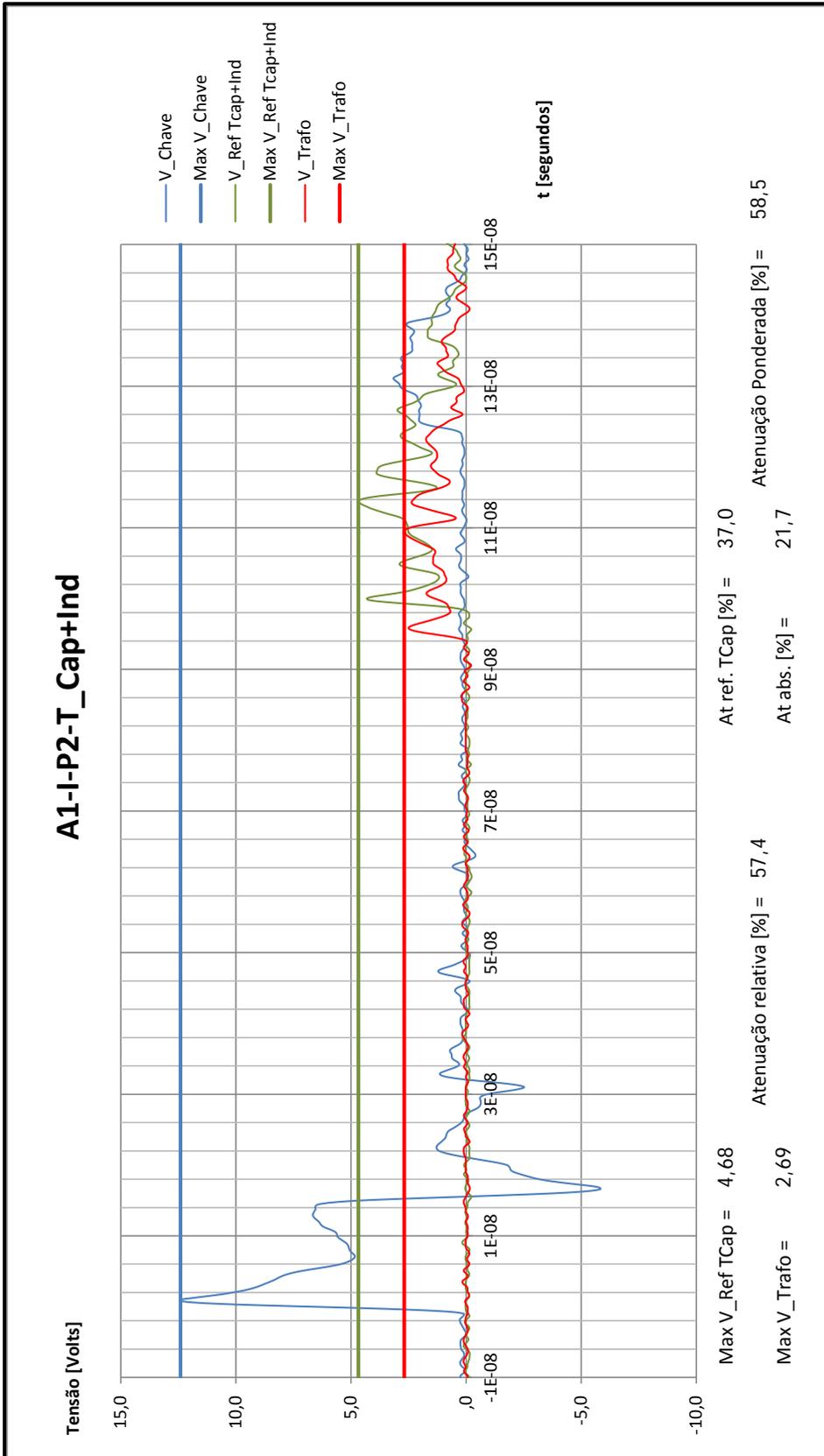


Figura 111 – Oscilograma na condição A1-I-P2-T_Cap+Ind

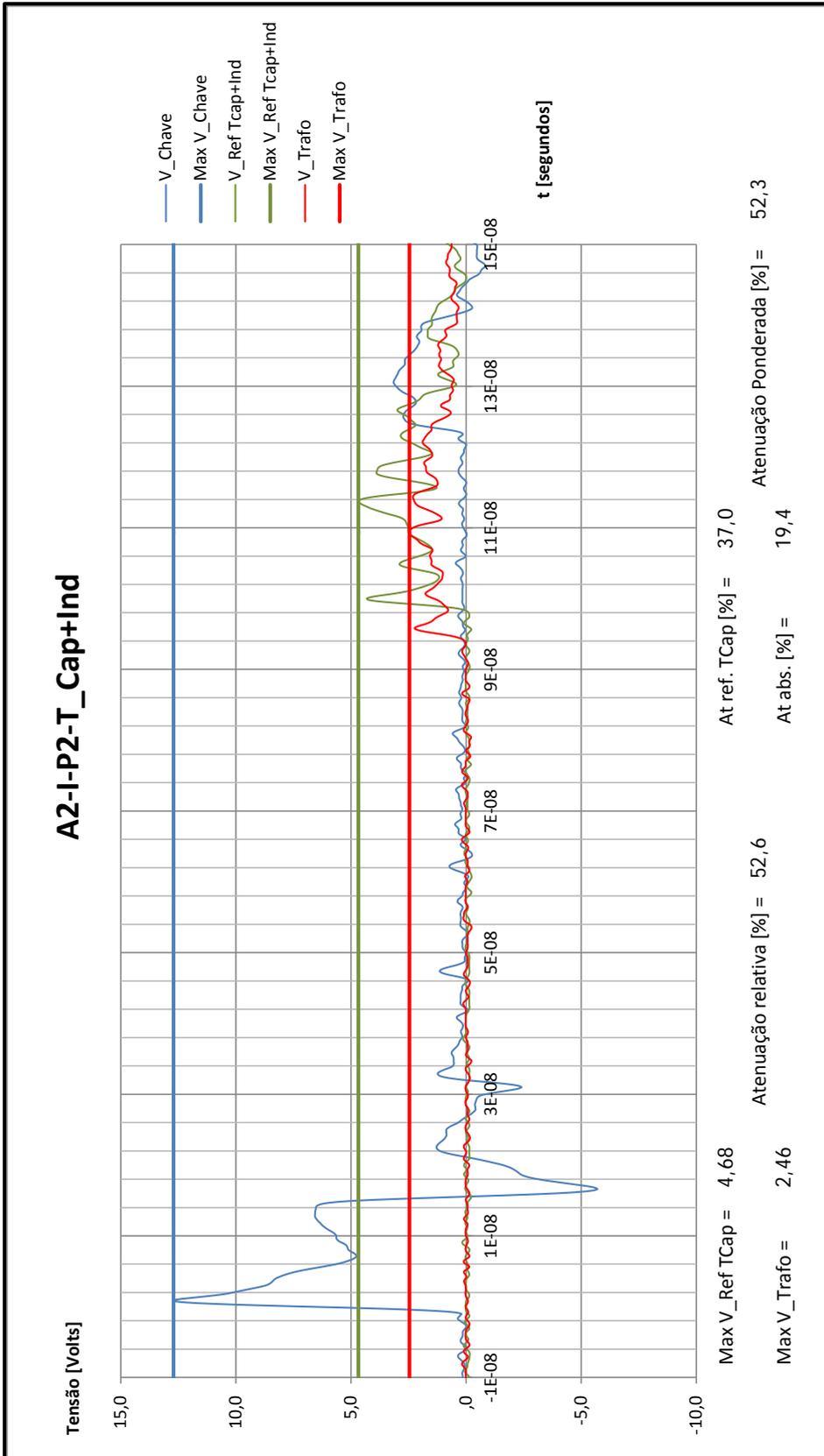


Figura 112 – Oscilograma na condição A2-I-P2-T_Cap+Ind

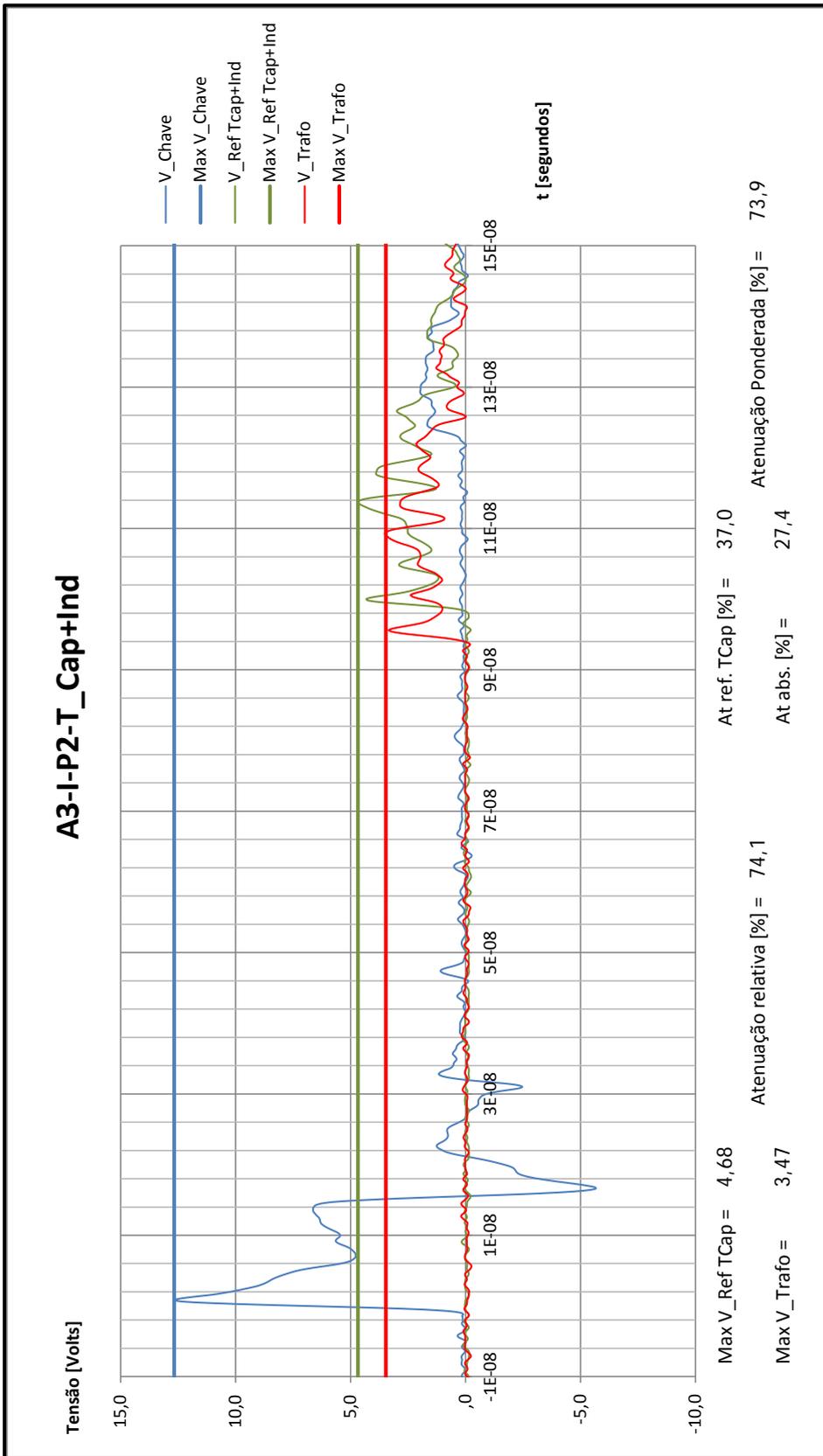


Figura 113 – Oscilograma na condição A3-I-P2-T_Cap+Ind

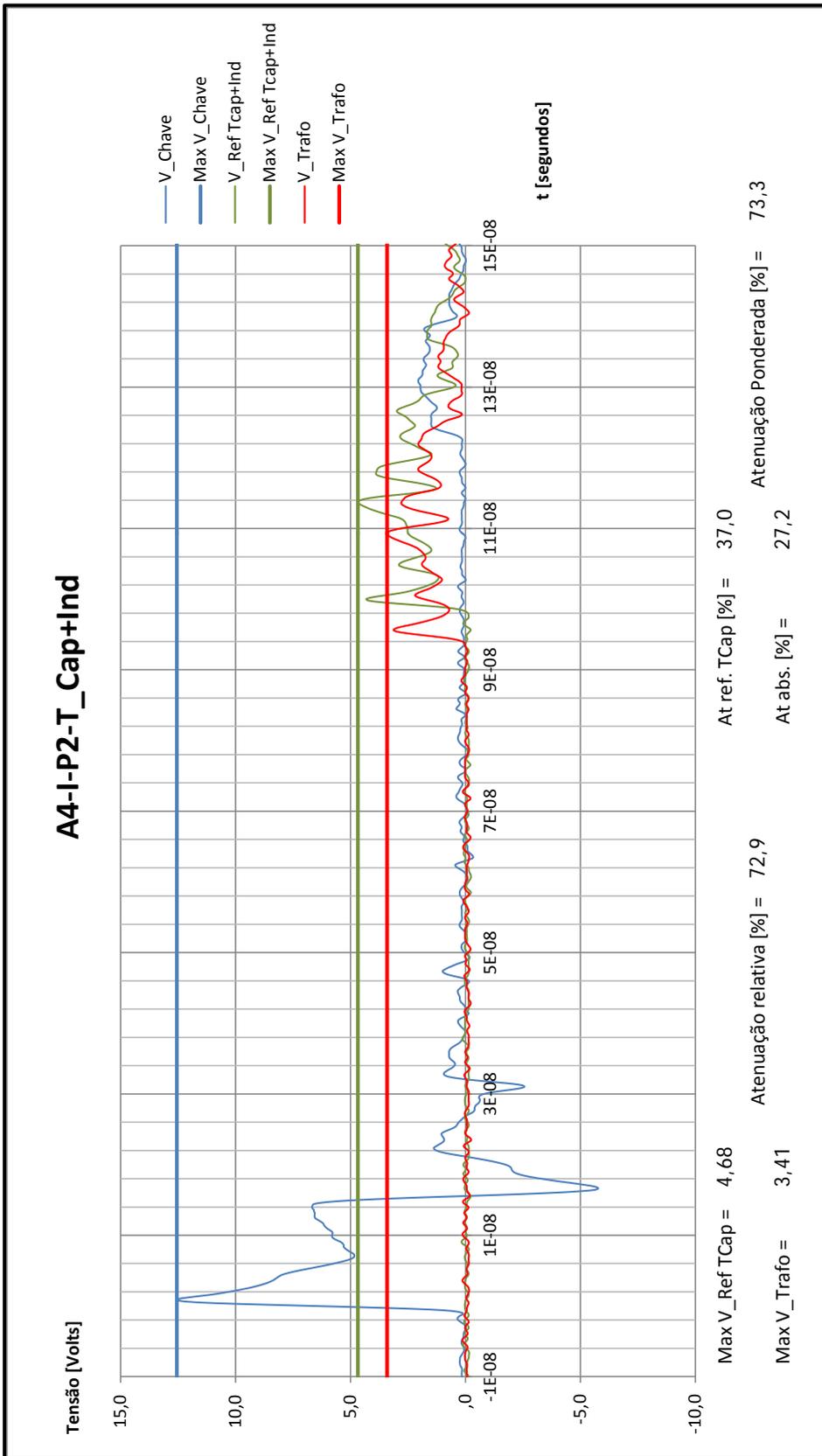


Figura 114 – Oscilograma na condição A4-I-P2-T_Cap+Ind

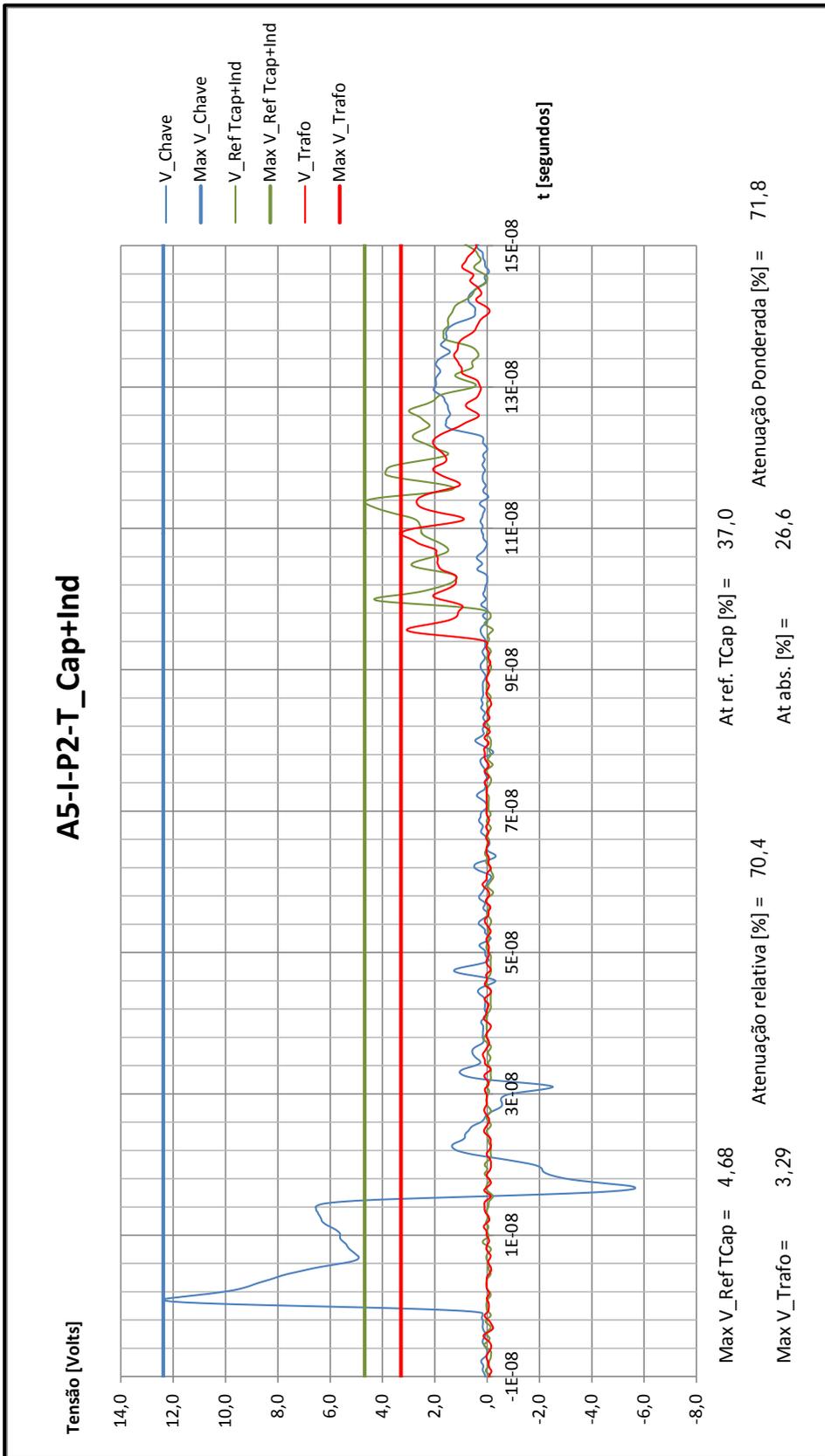


Figura 115 – Oscilograma na condição A5-I-P2-T_Cap+Ind

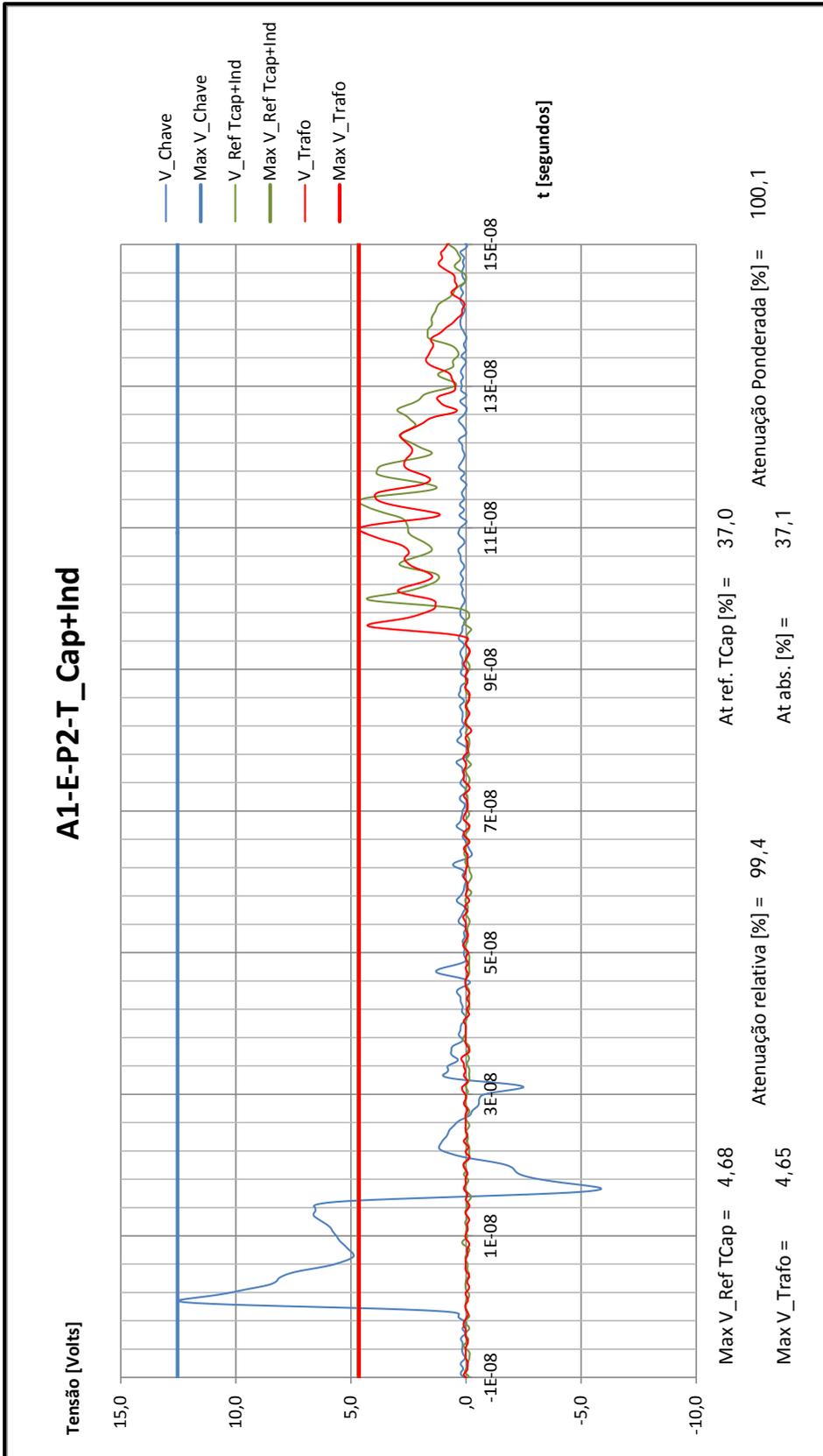


Figura 116 – Oscilograma na condição A1-E-P2-T_Cap+Ind

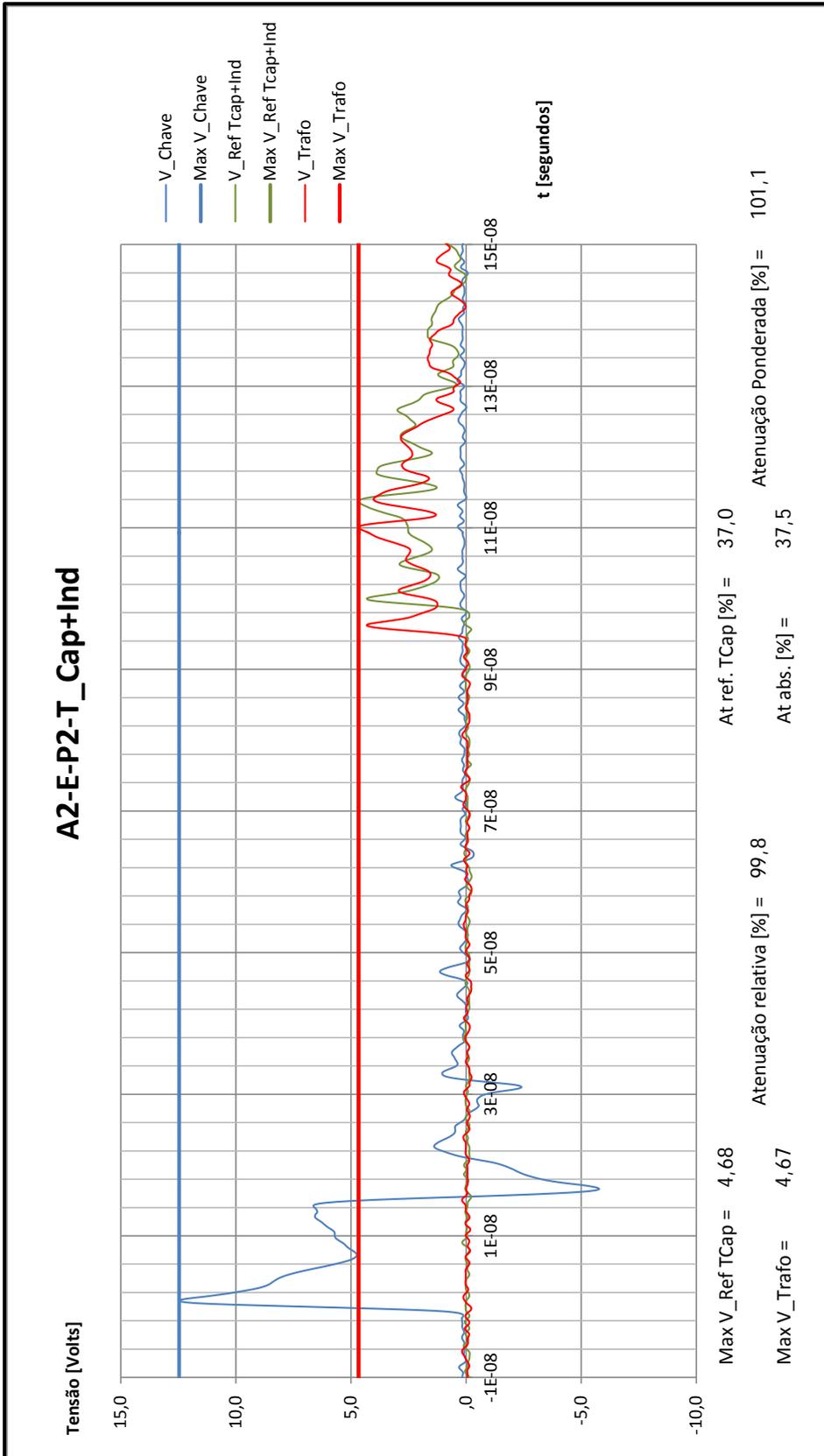


Figura 117 – Oscilograma na condição A2-E-P2-T_Cap+Ind

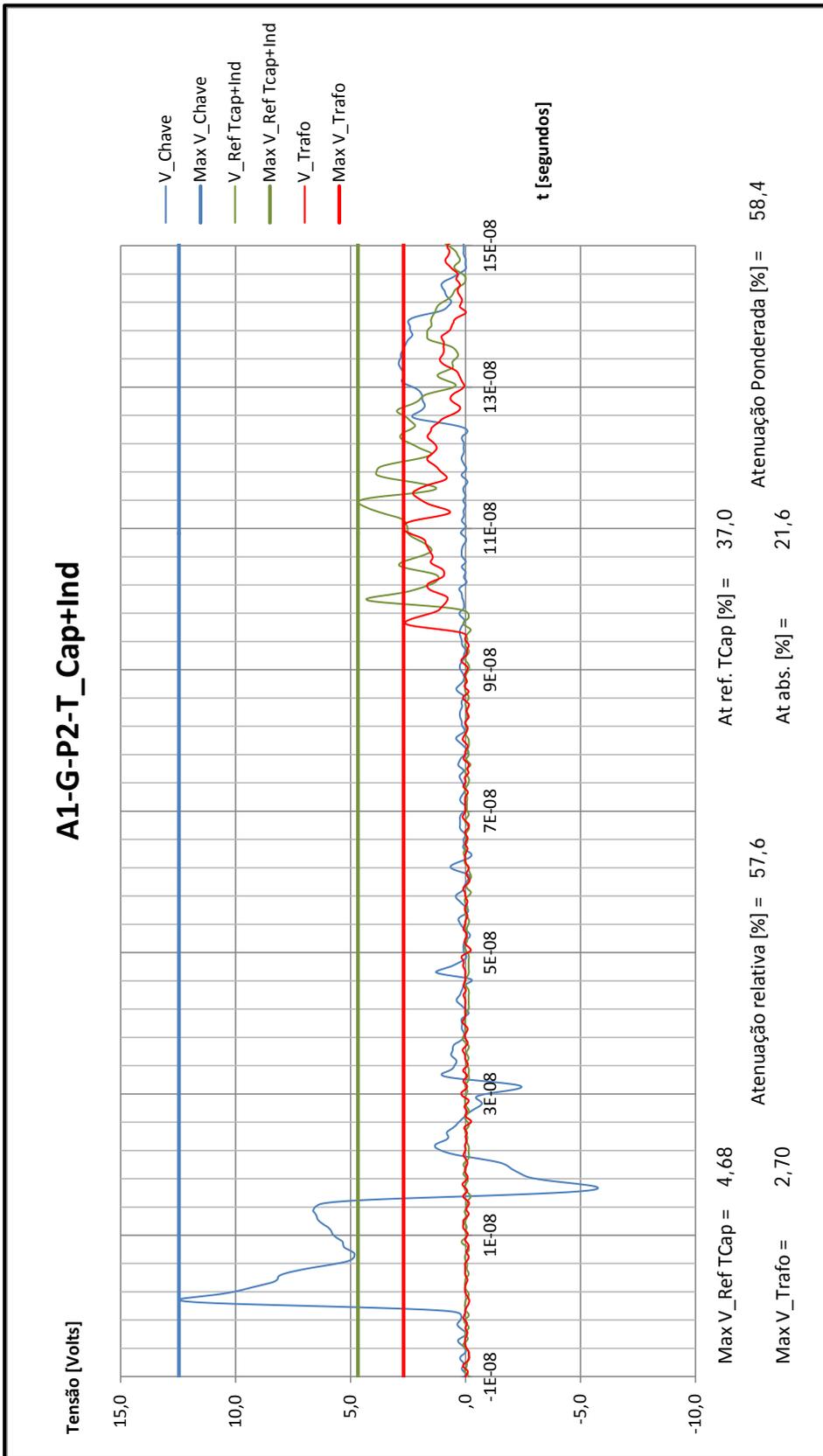


Figura 118 – Oscilograma na condição A1-G-P2-T_Cap+Ind

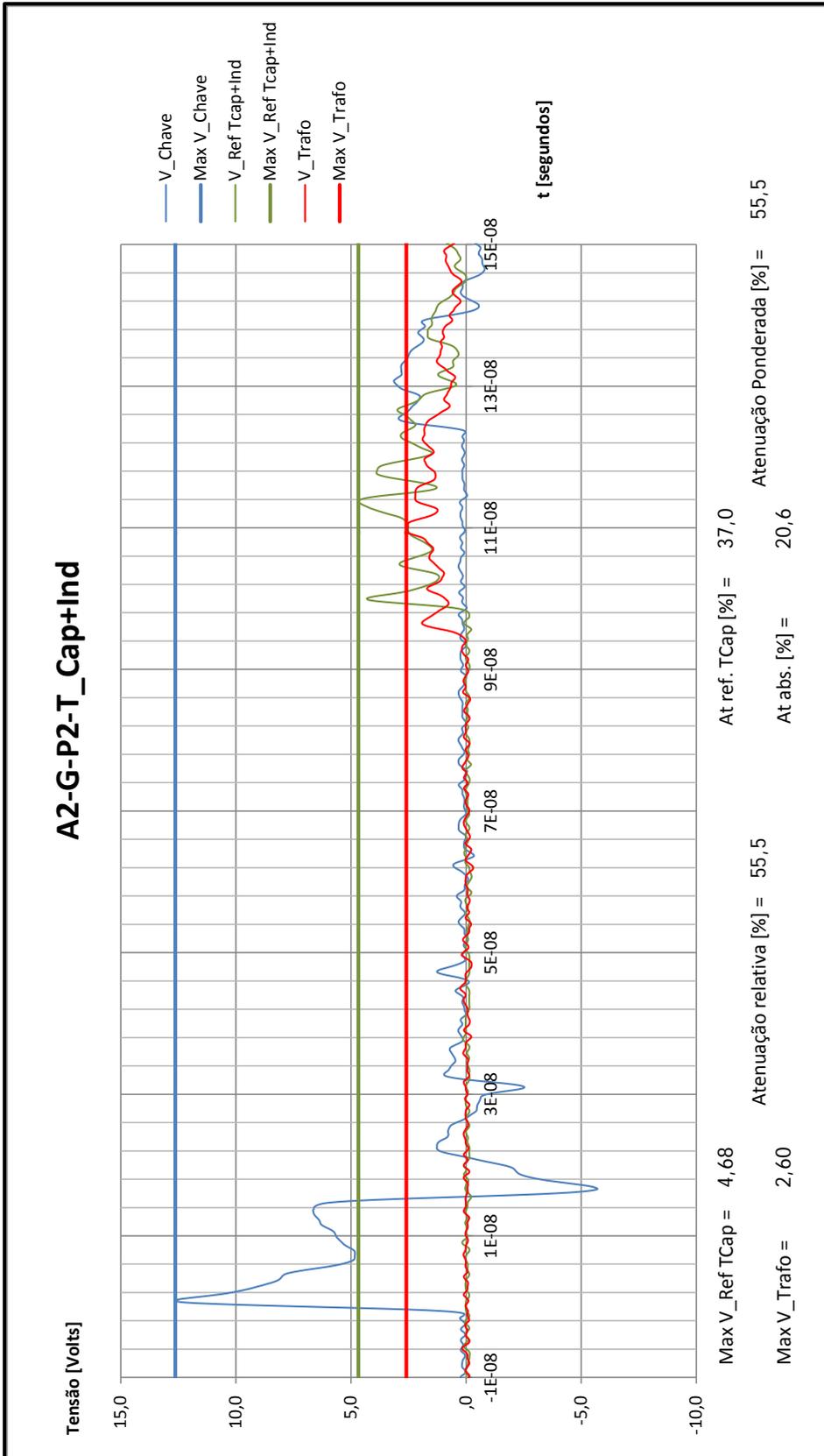


Figura 119 – Oscilograma na condição A2-G-P2-T_Cap+Ind

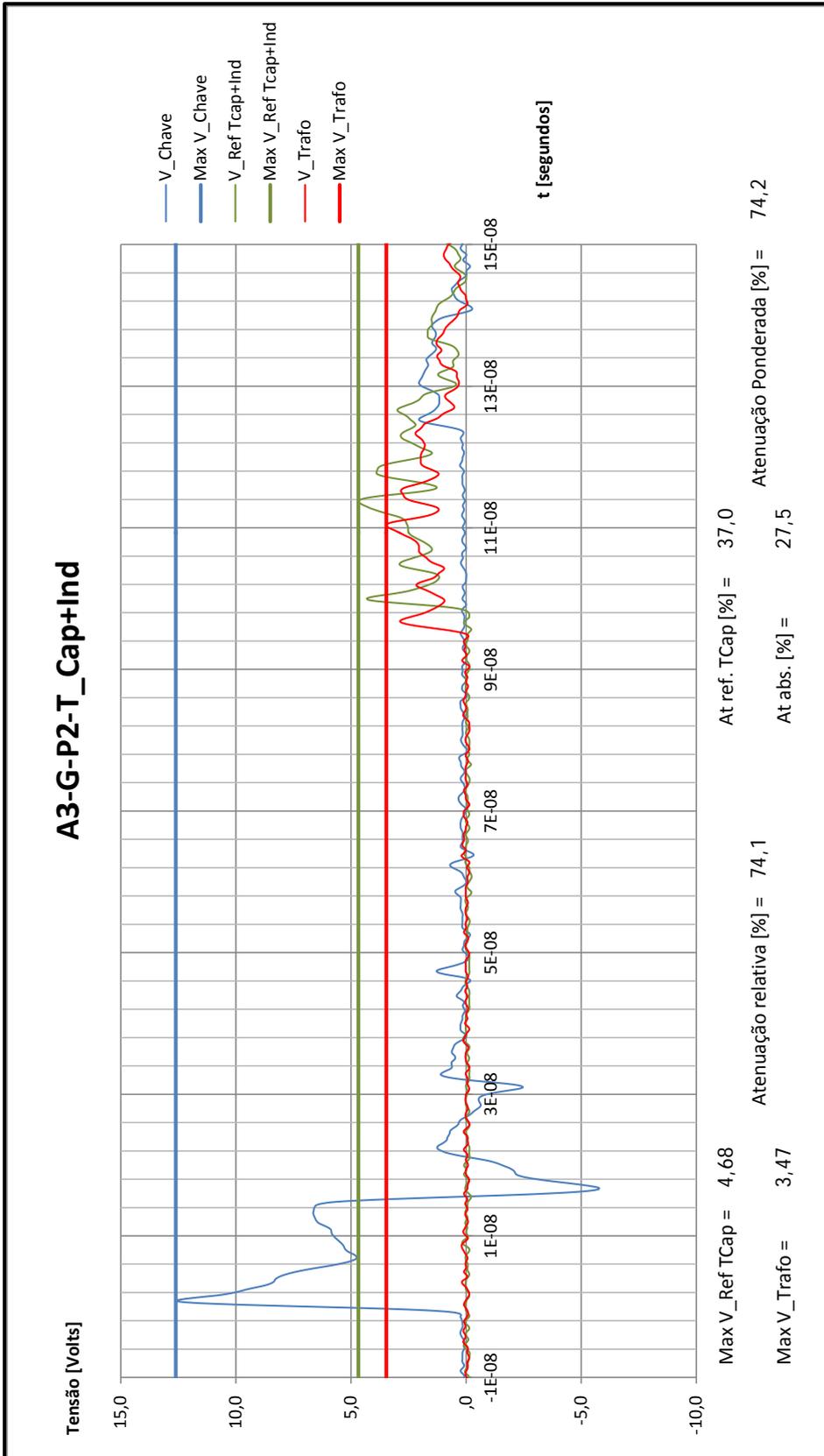


Figura 120 – Oscilograma na condição A3-G-P2-T_Cap+Ind

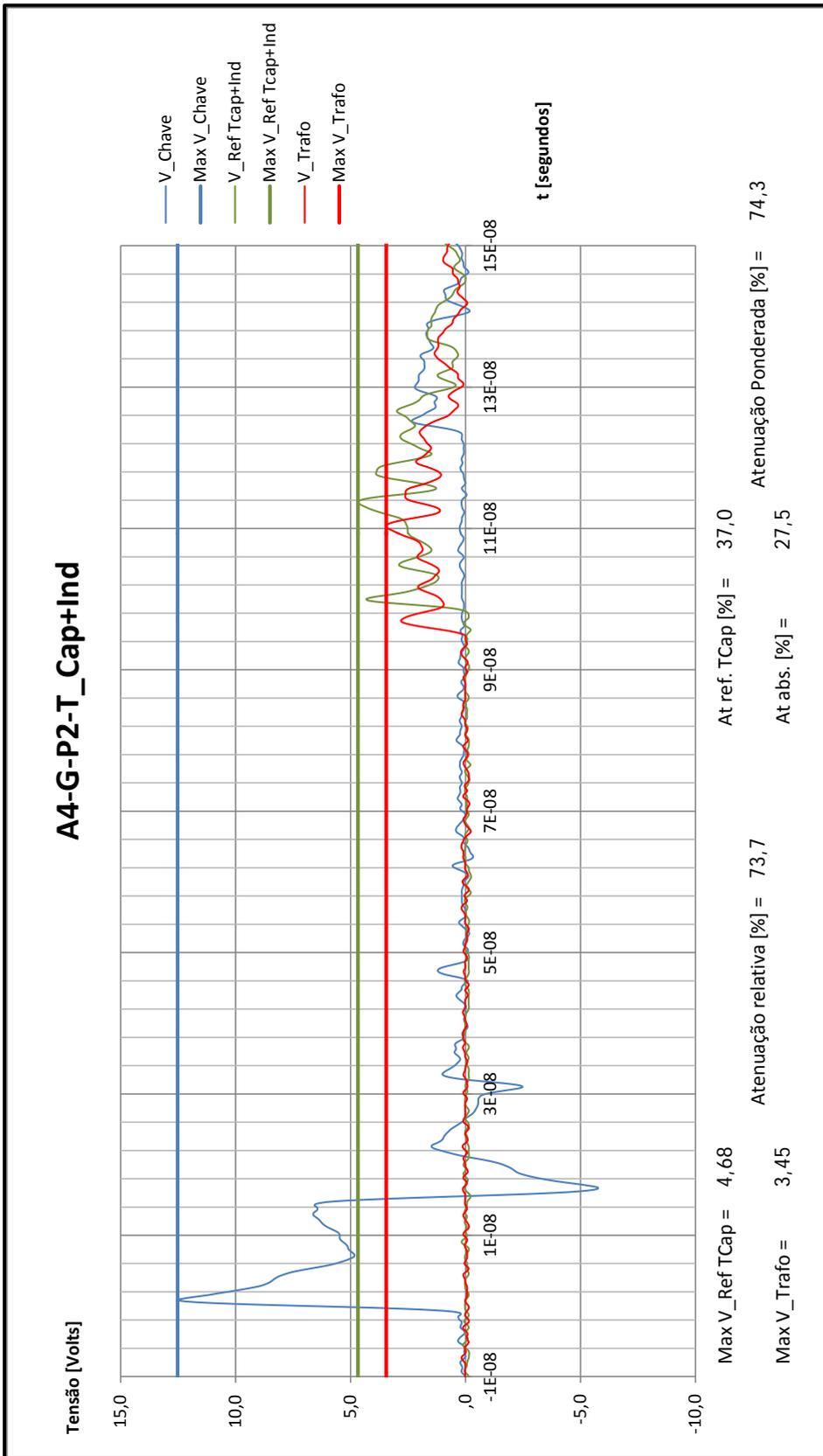


Figura 121 – Oscilograma na condição A4-G-P2-T_Cap+Ind

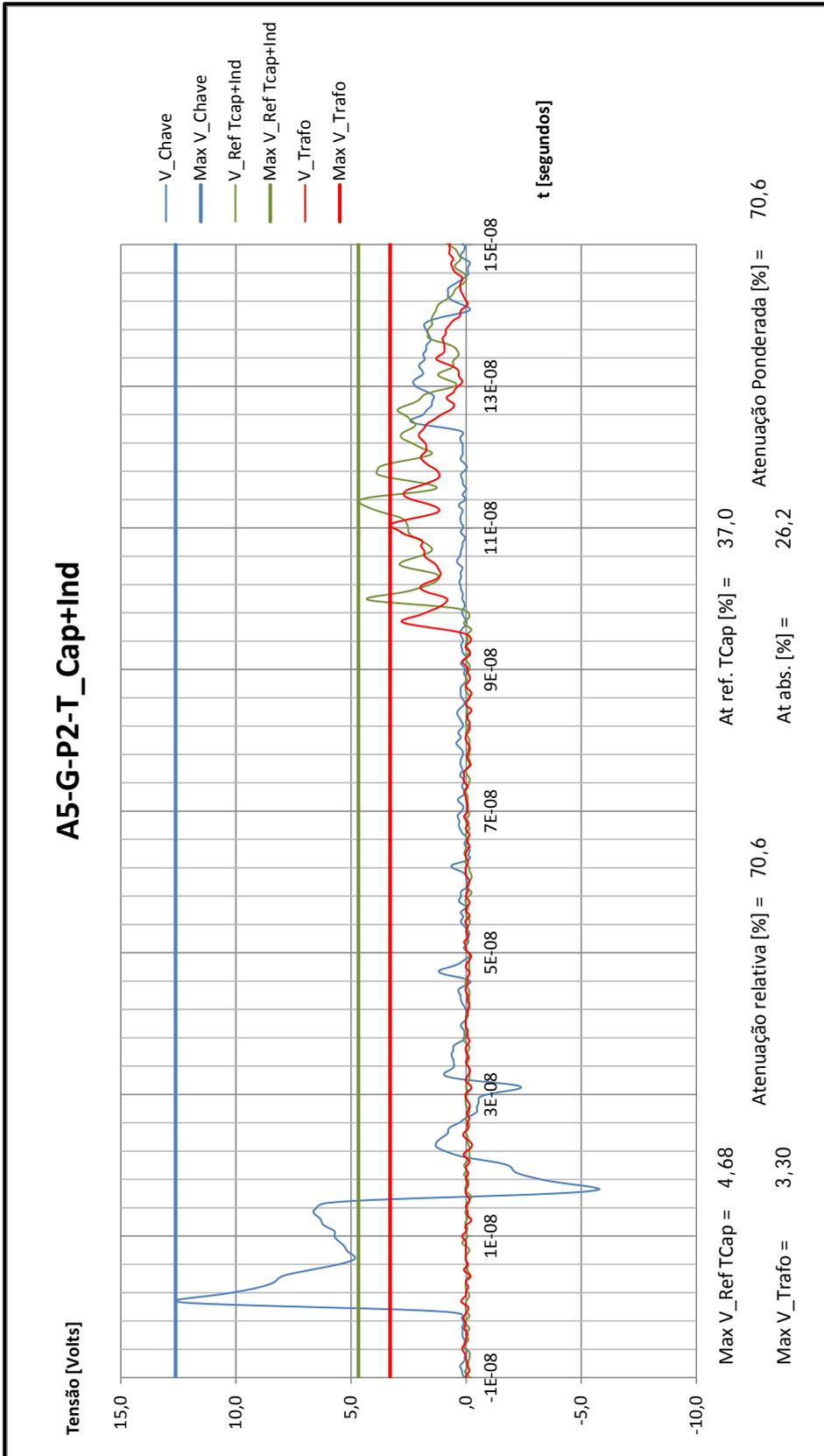


Figura 122 – Oscilograma na condição A5-G-P2-T_Cap+Ind

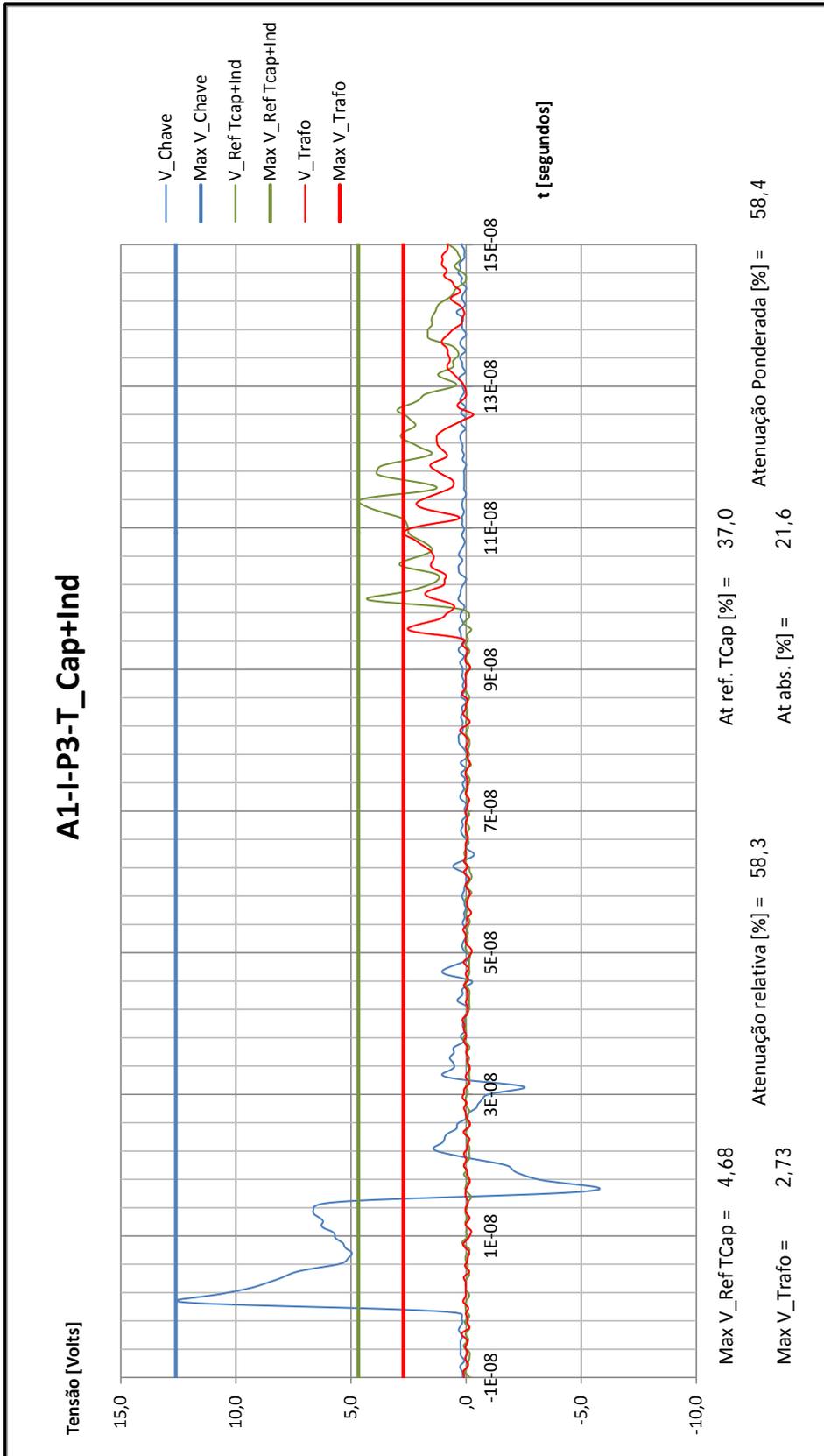


Figura 123 – Oscilograma na condição A1-I-P3-T_Cap+Ind

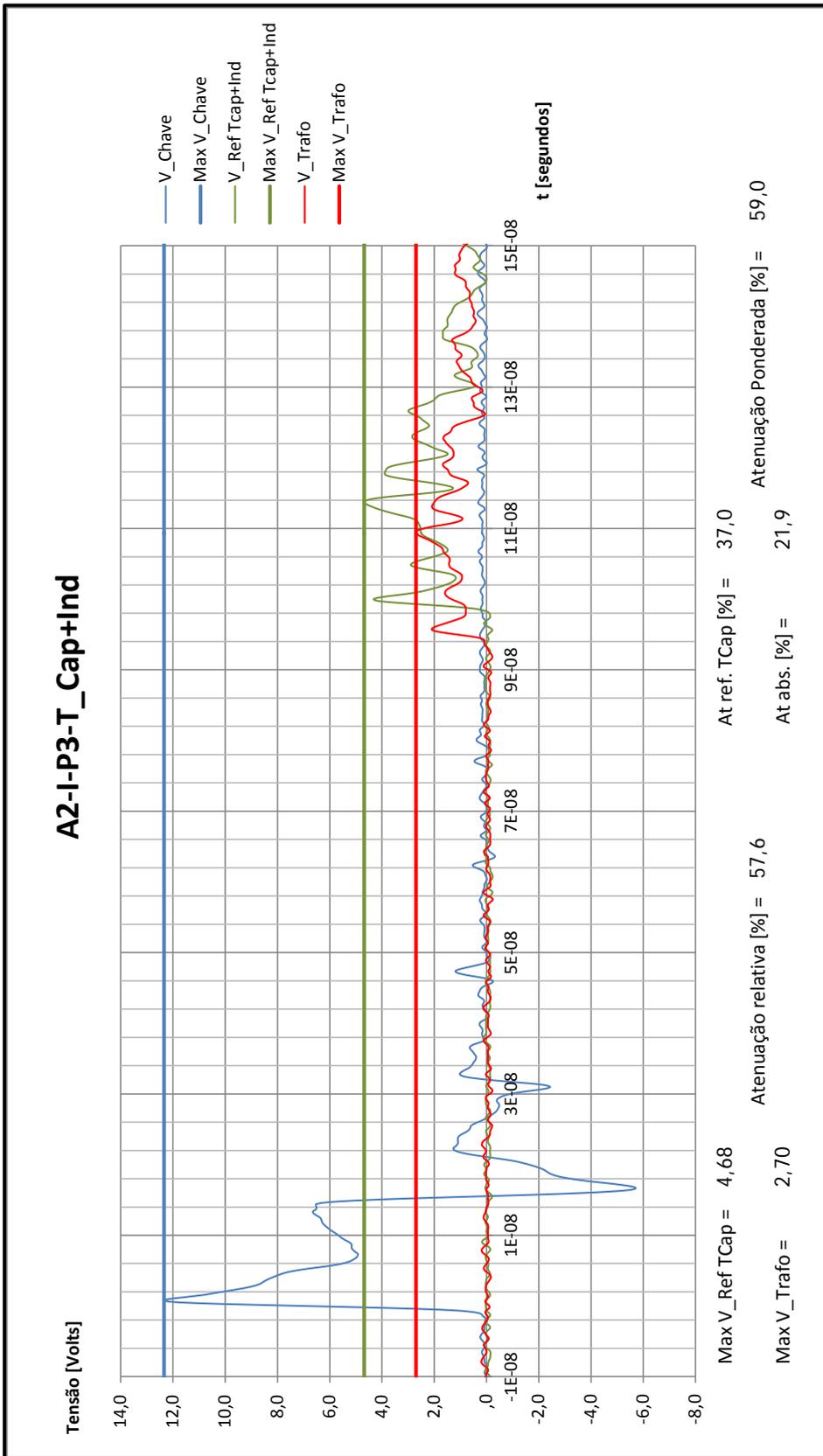


Figura 124 – Oscilograma na condição A2-I-P3-T_Cap+Ind

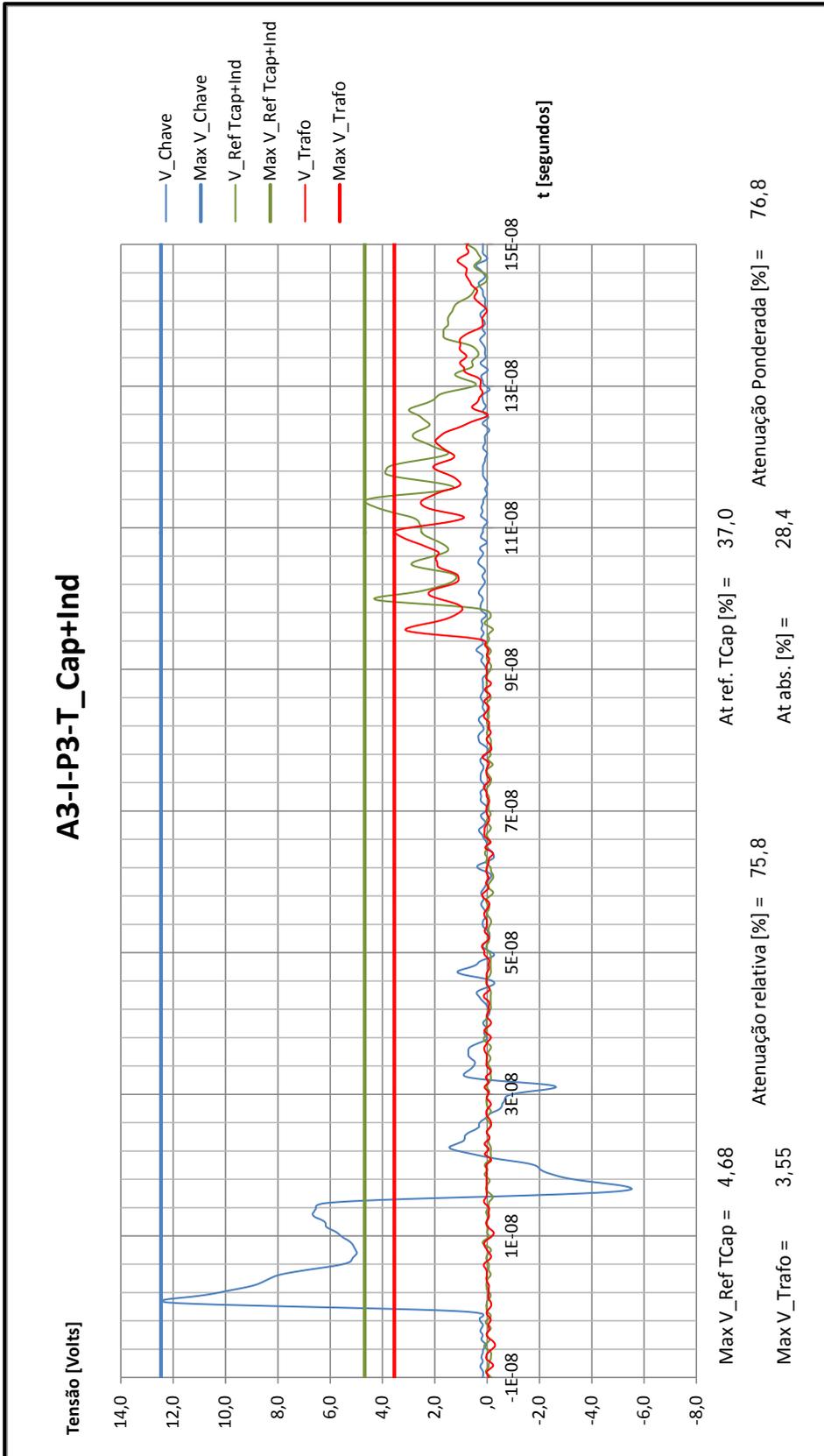


Figura 125 – Oscilograma na condição A3-I-P3-T_Cap+Ind

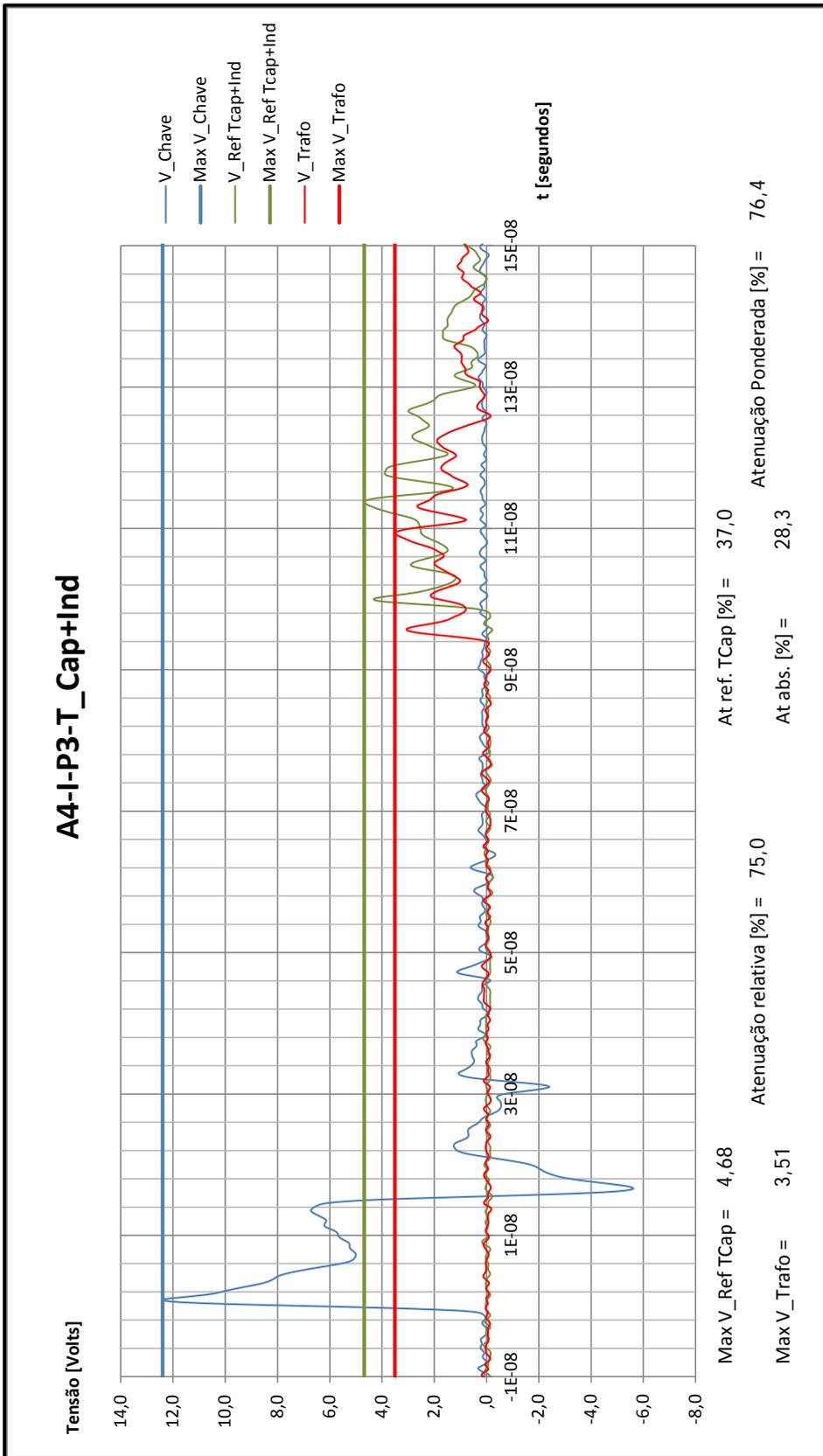


Figura 126 – Oscilograma na condição A4-I-P3-T_Cap+Ind

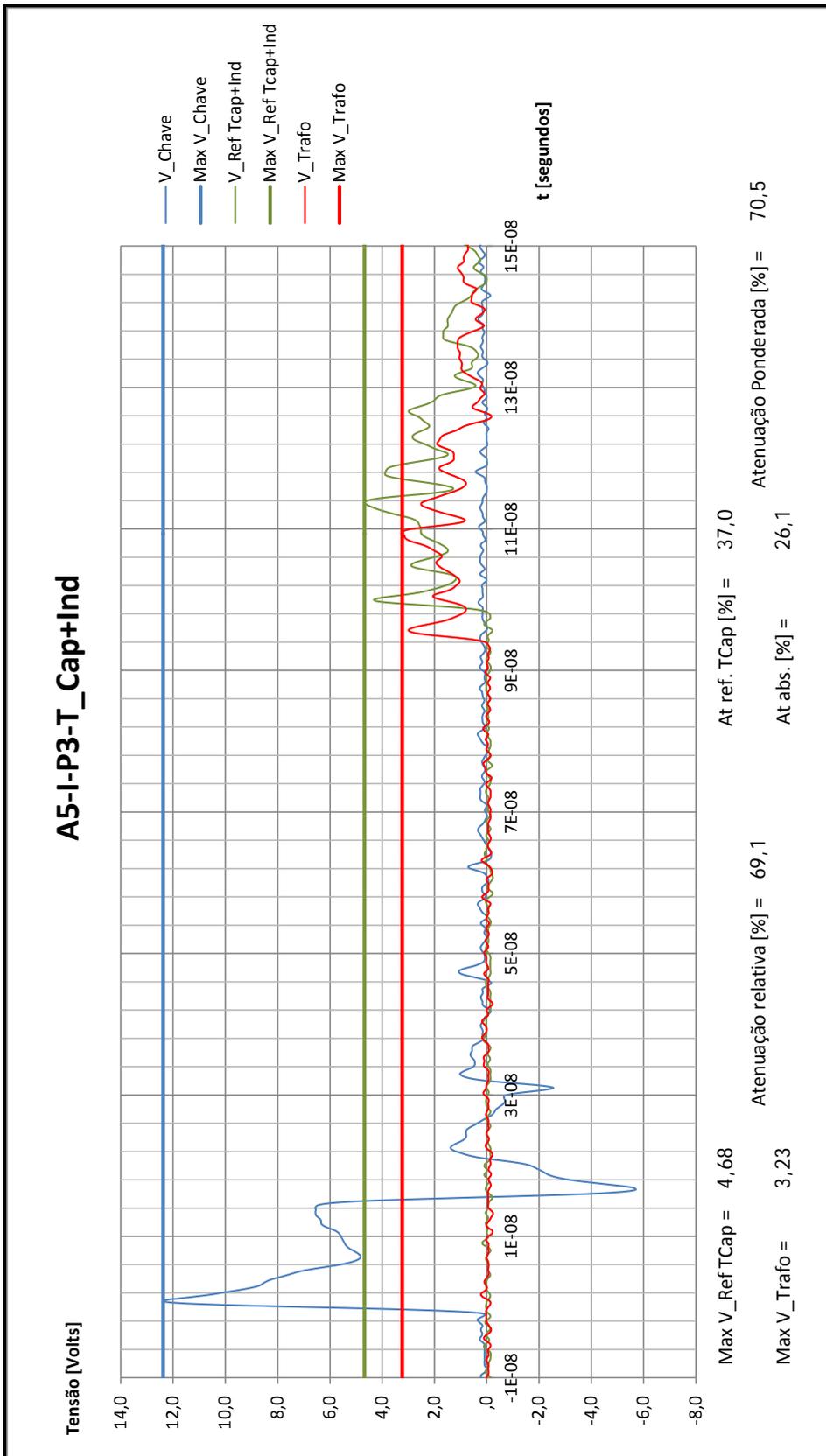


Figura 127 – Oscilograma na condição A5-I-P3-T_Cap+Ind

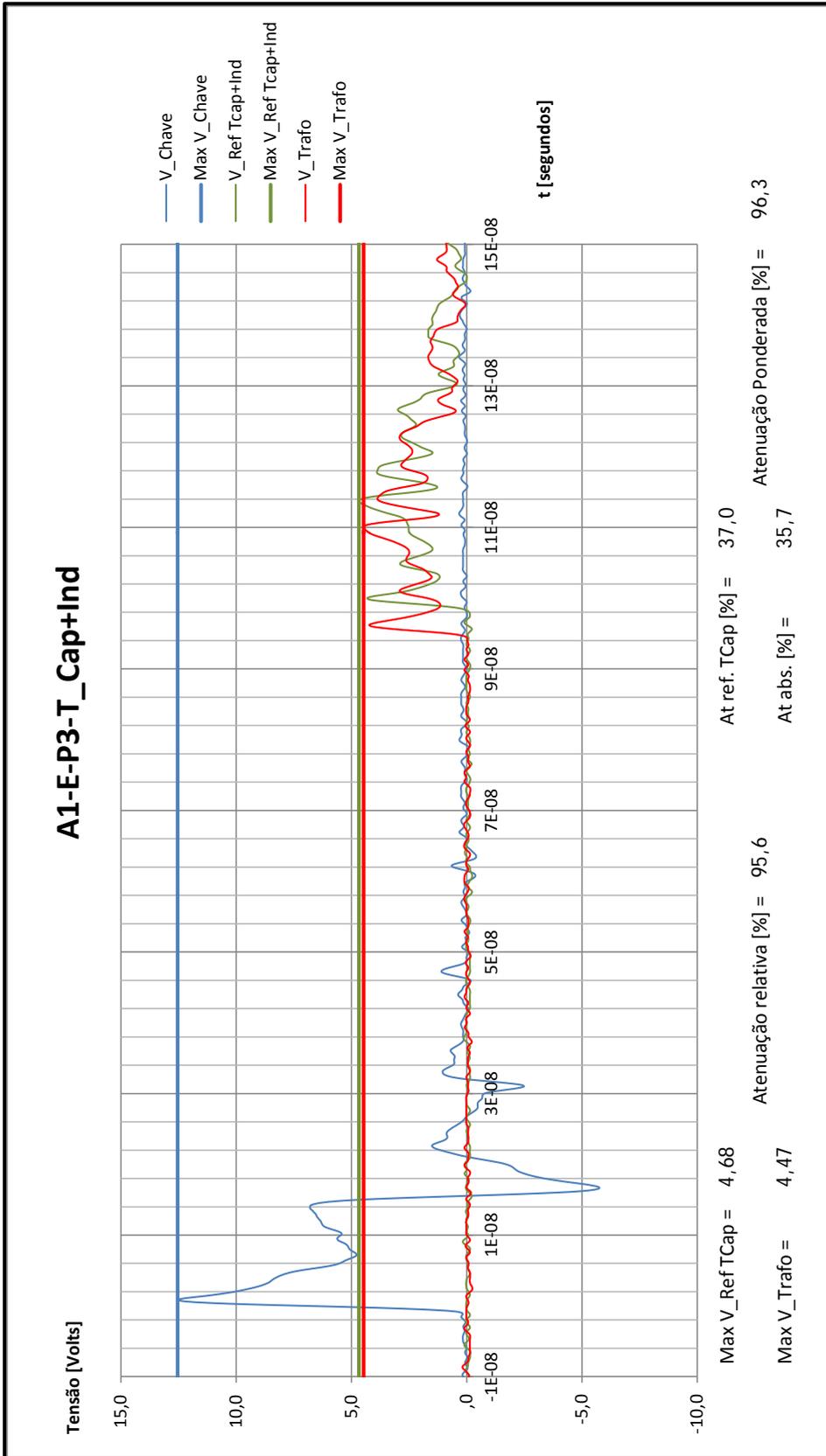


Figura 128 – Oscilograma na condição A1-E-P3-T_Cap+Ind

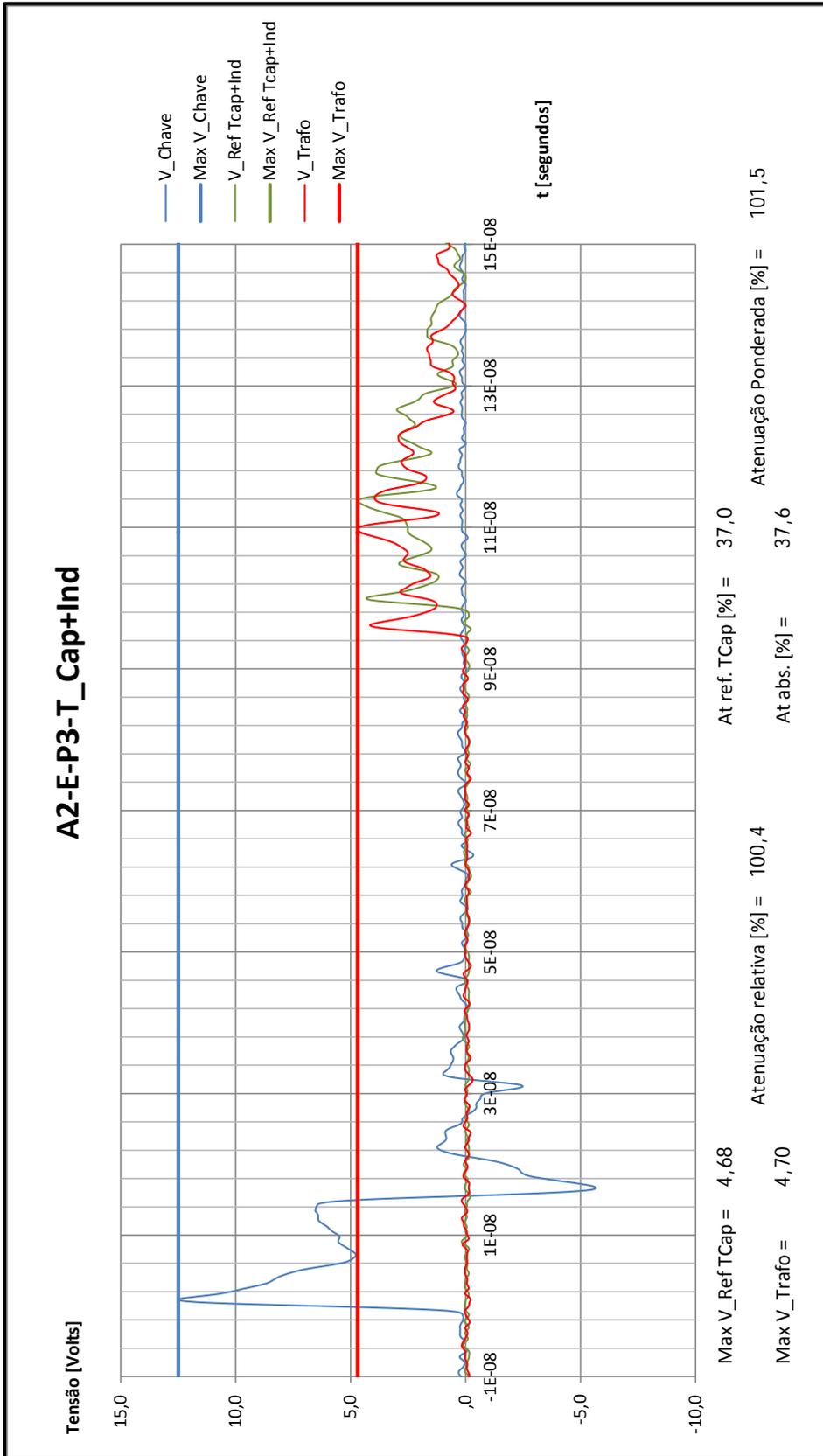


Figura 129 – Oscilograma na condição A2-E-P3-T_Cap+Ind

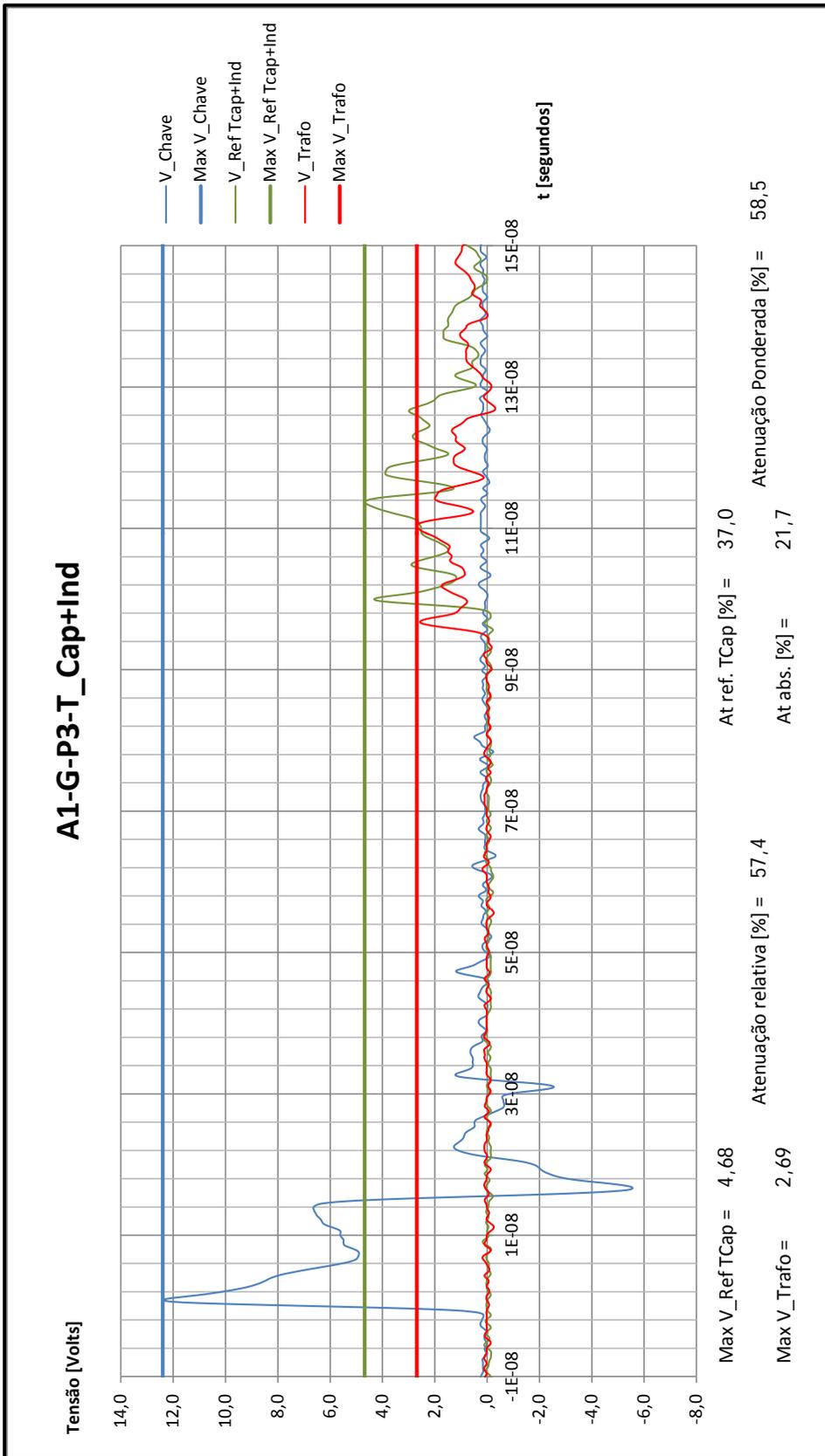


Figura 130 – Oscilograma na condição A1-G-P3-T_Cap+Ind

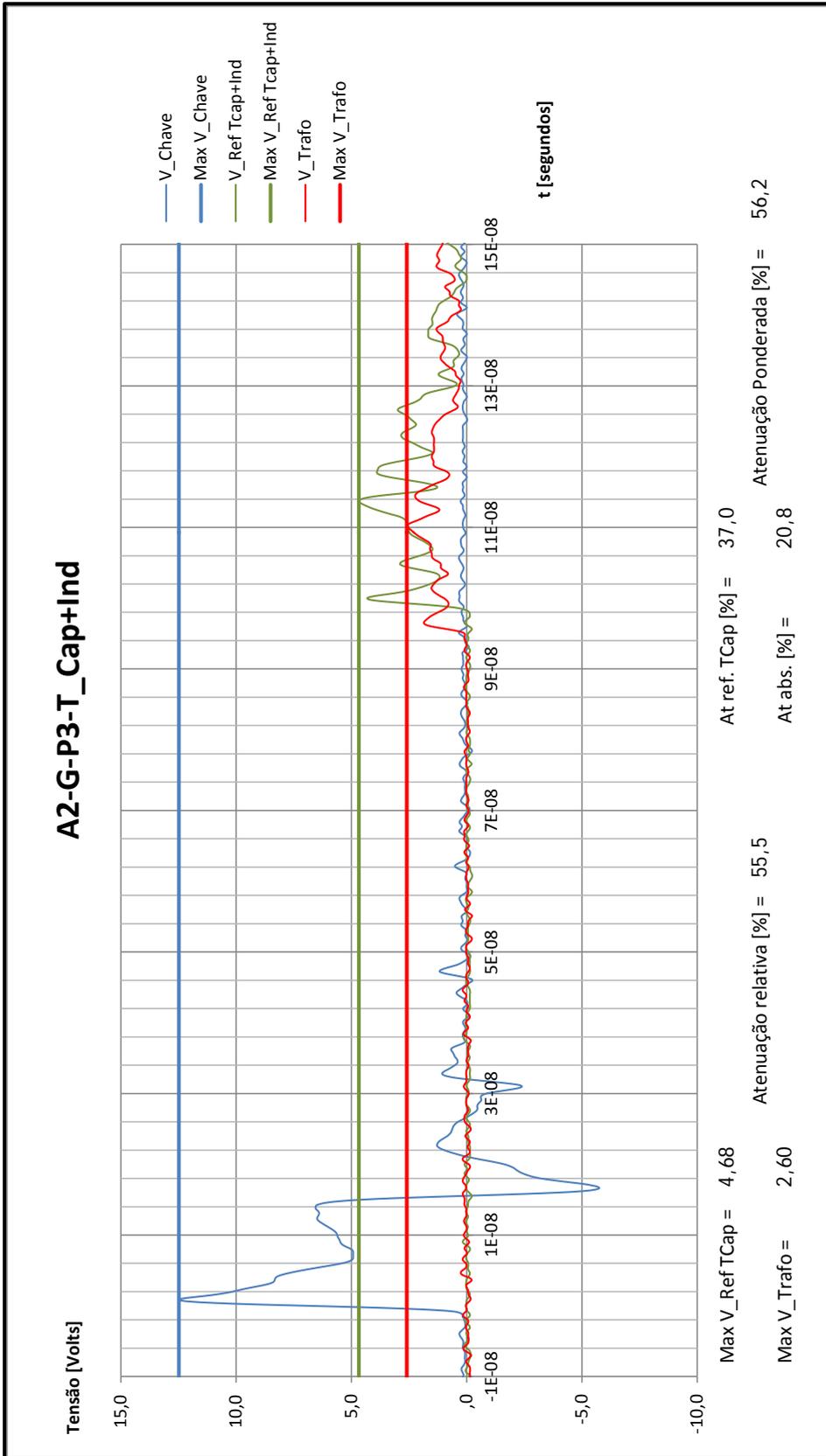


Figura 131 – Oscilograma na condição A2-G-P3-T_Cap+Ind

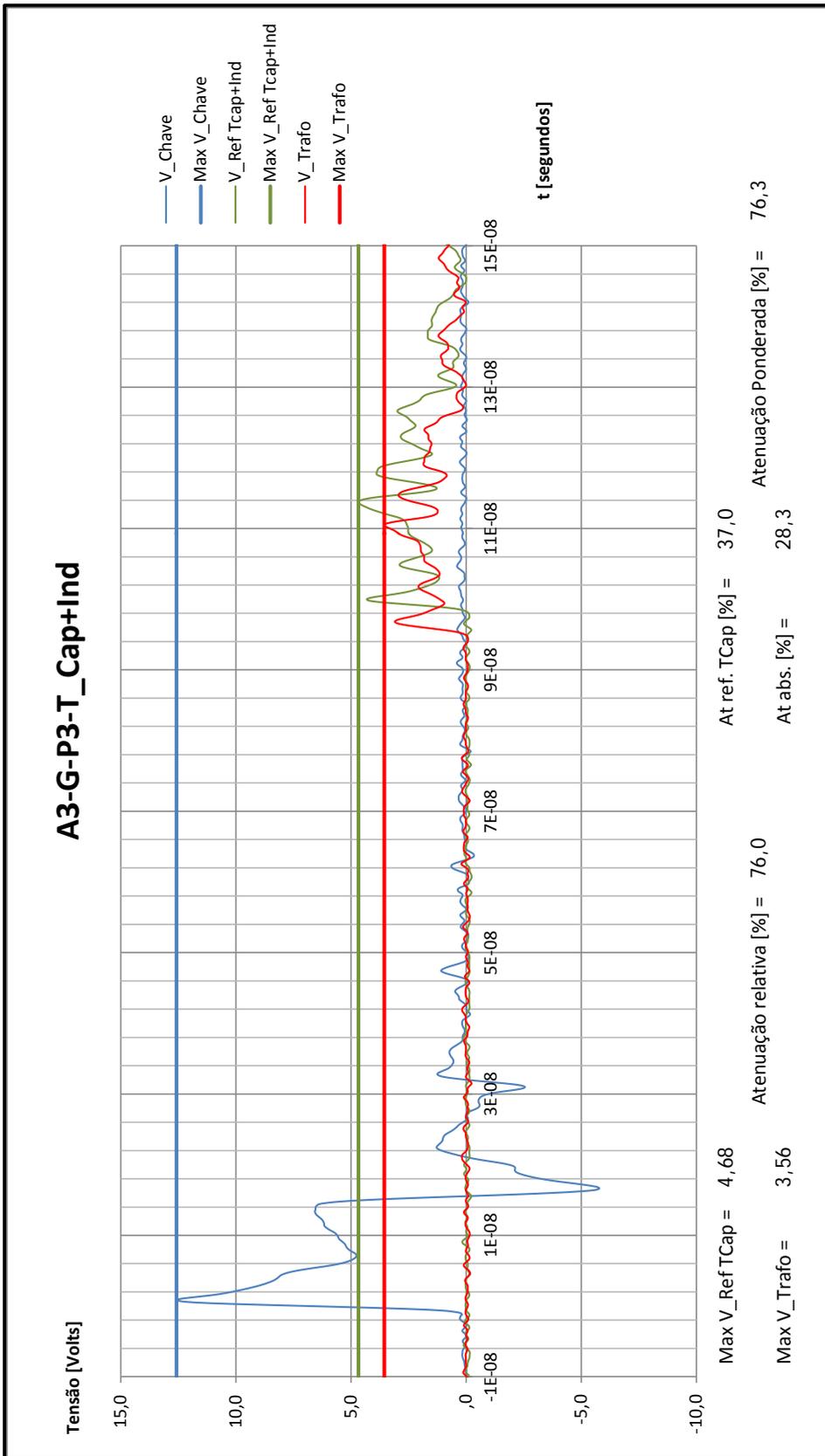


Figura 132 – Oscilograma na condição A3-G-P3-T_Cap+Ind

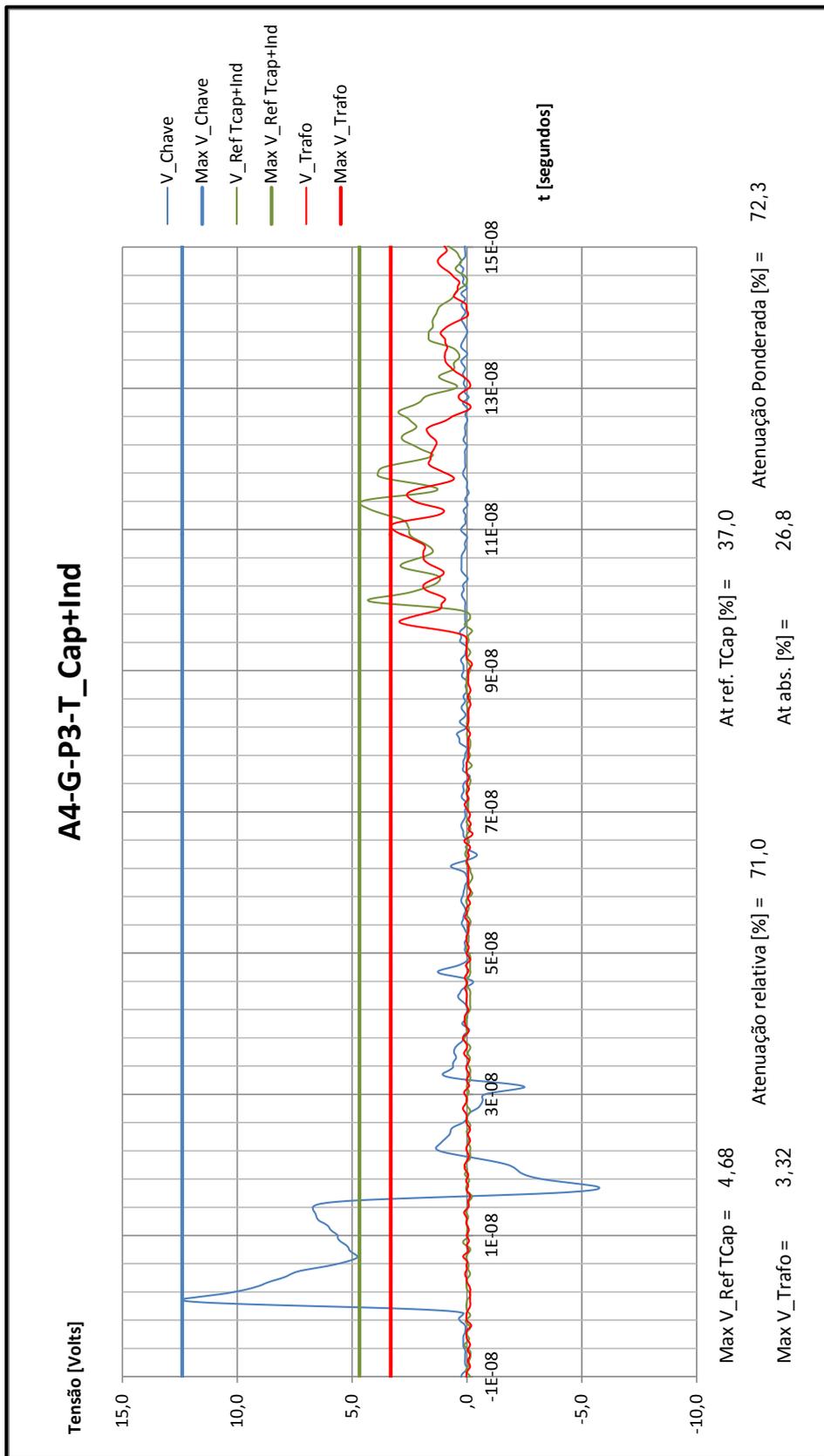


Figura 133 – Oscilograma na condição A4-G-P3-T_Cap+Ind

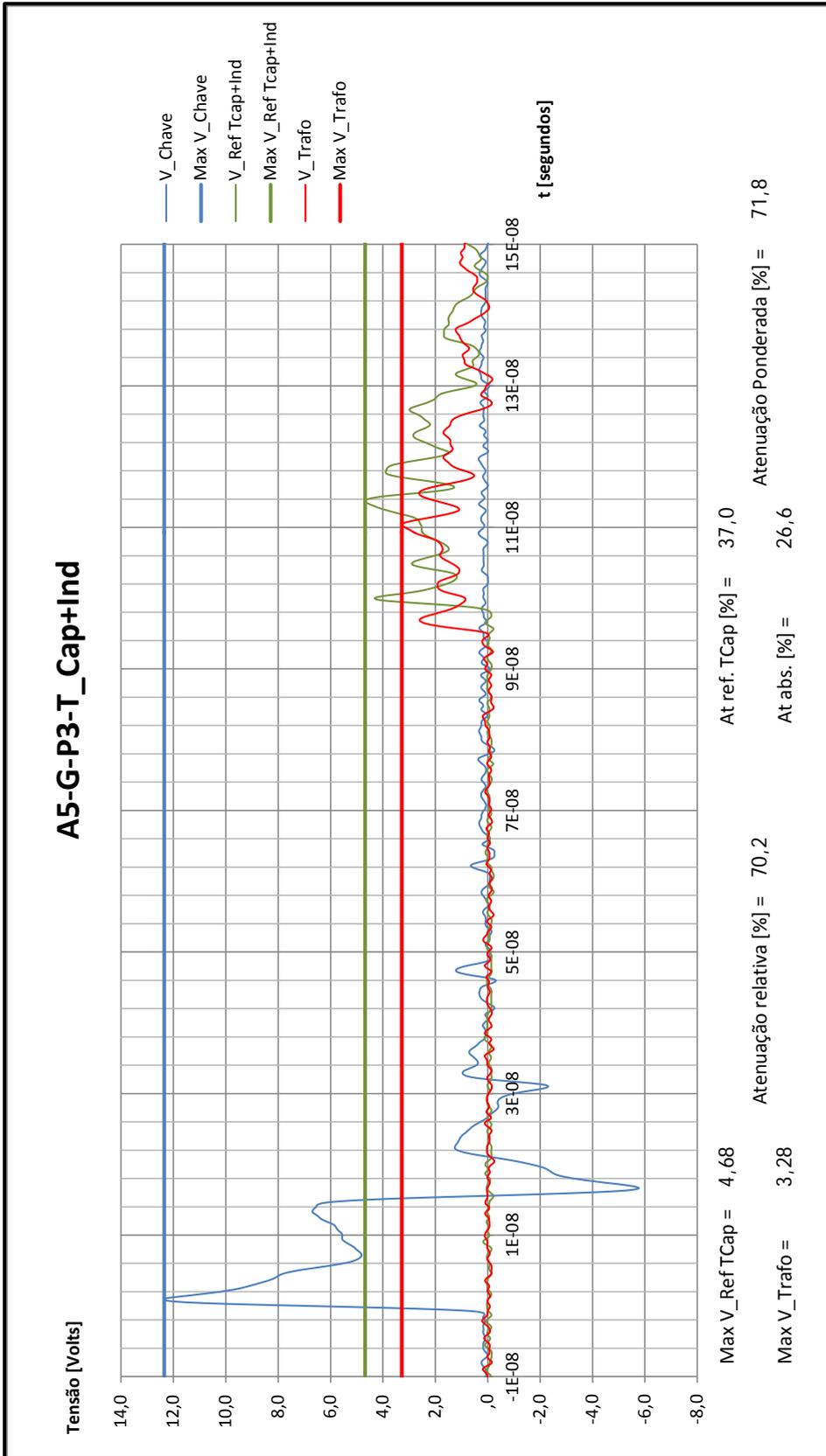


Figura 134 – Oscilograma na condição A5-G-P3-T_Cap+Ind

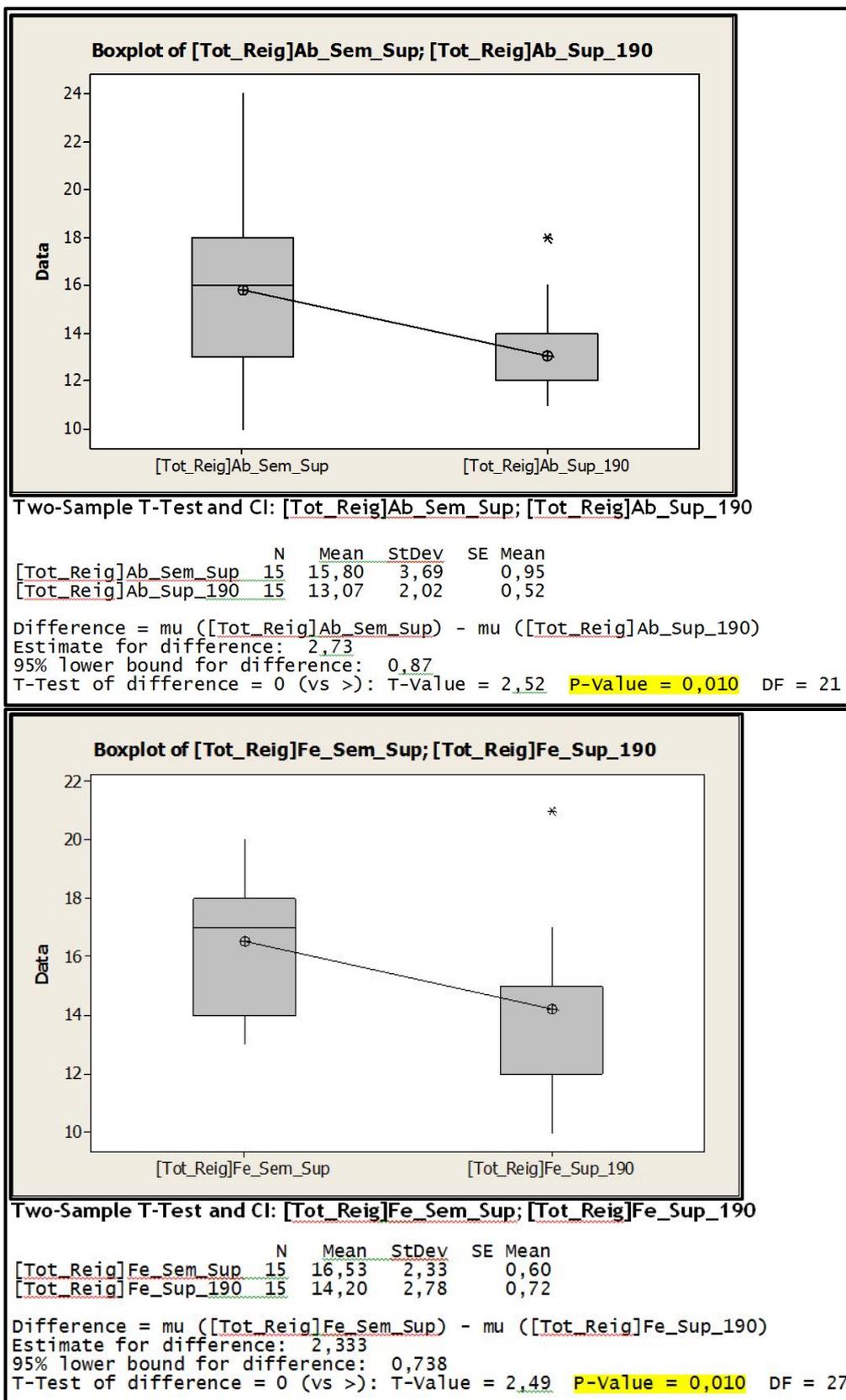


Figura 135 – Notação de saída para o aplicativo “Two-Sample T-Test” do Minitab.
 Acima, Tot_Reig sem supressor x Tot_Reig com supressor S_190 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Tot_Reig sem supressor x Tot_Reig com supressor S_190 (15 manobras de fechamento)

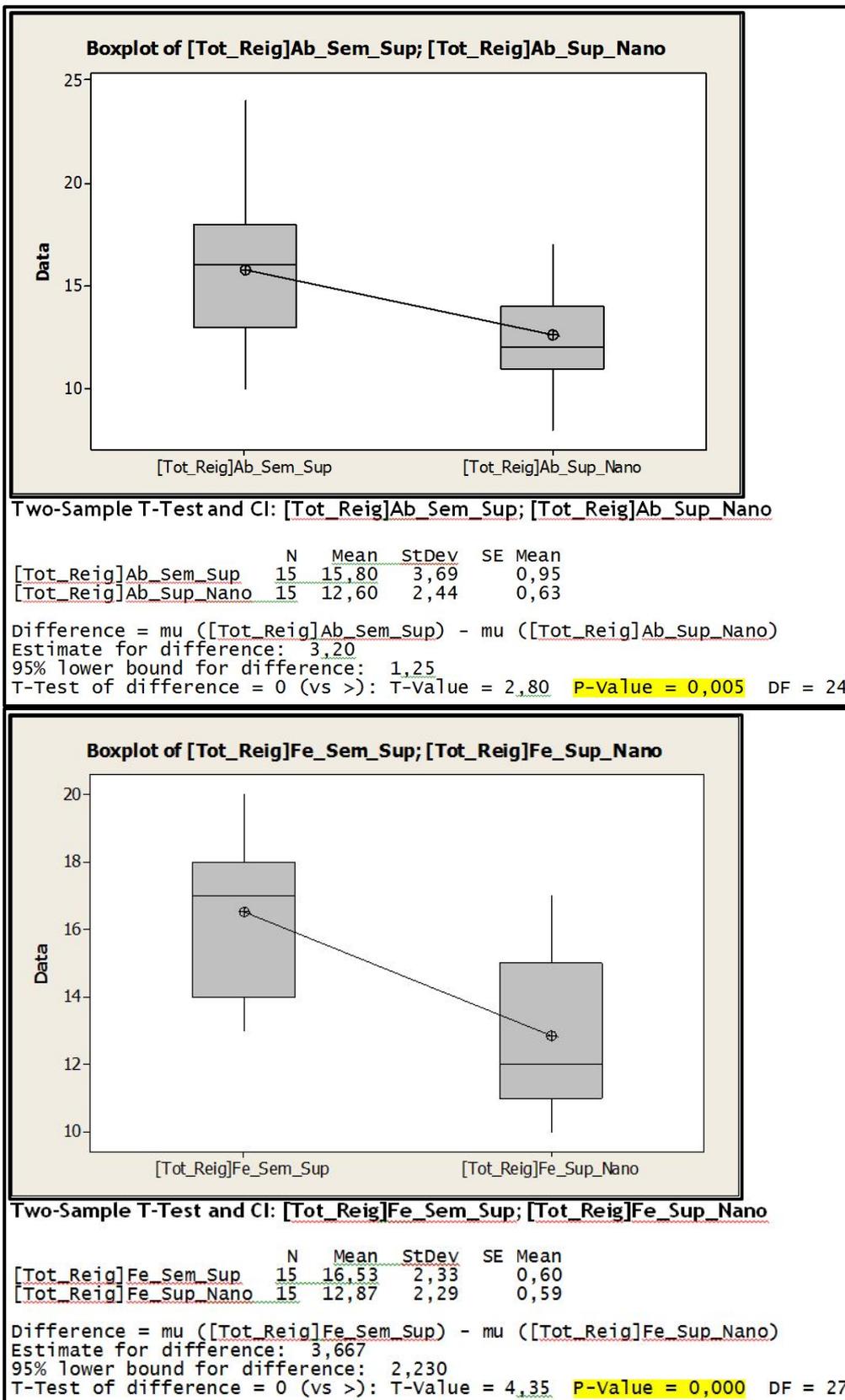


Figura 136 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Tot_Reig sem supressor x Tot_Reig com supressor S_Nano (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Tot_Reig sem supressor x Tot_Reig com supressor S_Nano (15 manobras de fechamento)

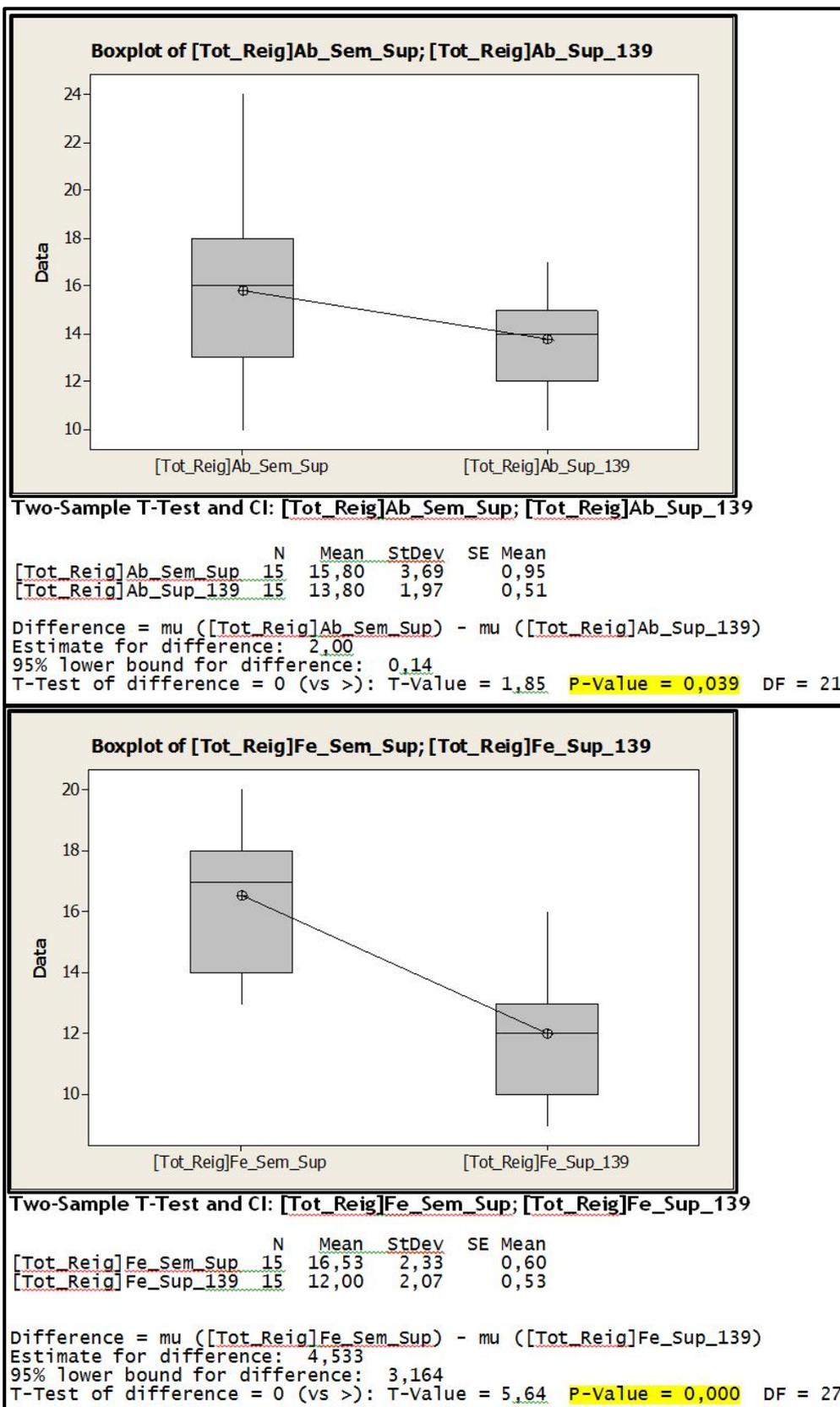


Figura 137 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Tot_Reig sem supressor x Tot_Reig com supressor S_139 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Tot_Reig sem supressor x Tot_Reig com supressor S_139 (15 manobras de fechamento)

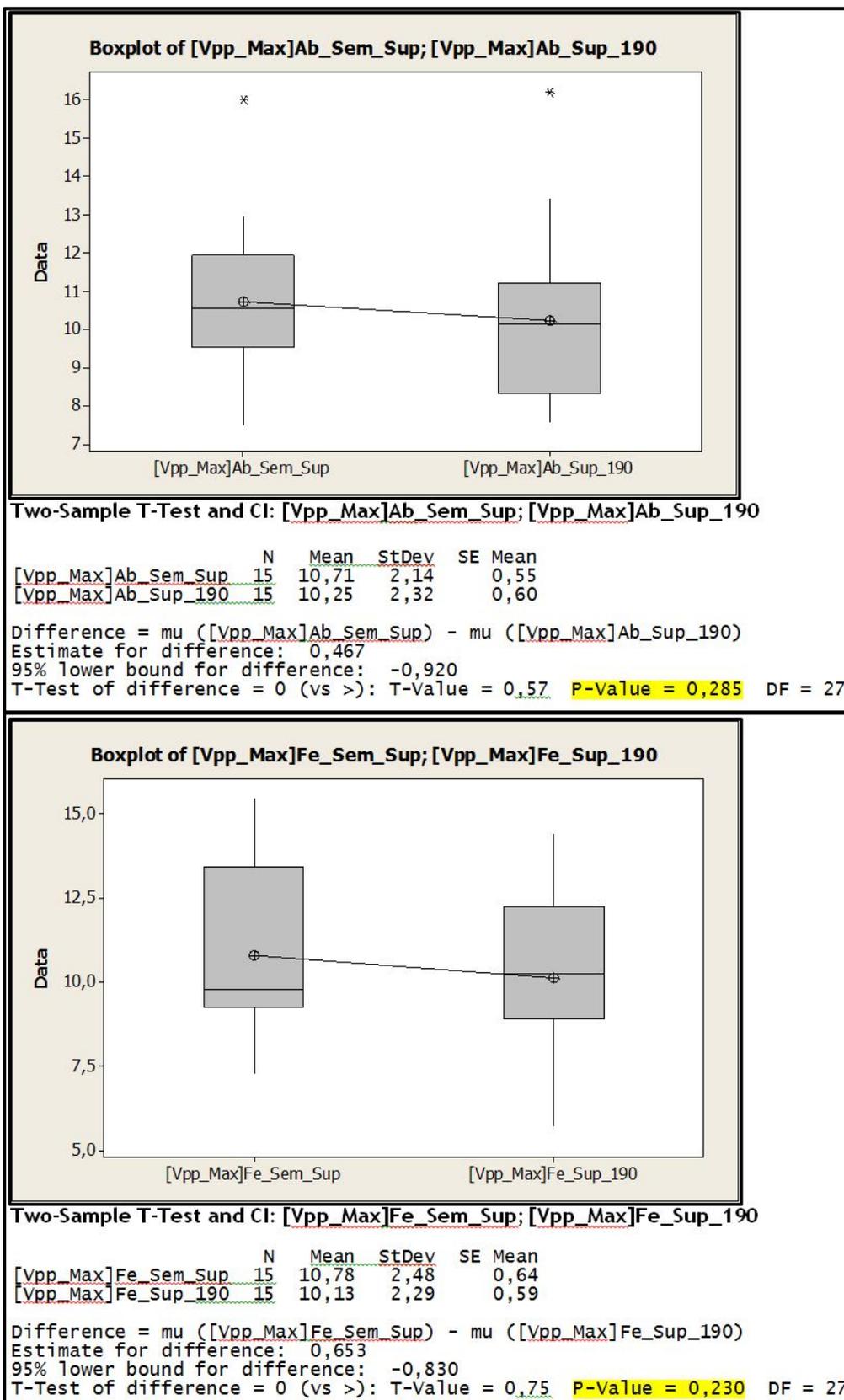


Figura 138 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vpp_Max sem supressor x Vpp_Max com supressor S_190 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vpp_Max sem supressor x Vpp_Max com supressor S_190 (15 manobras de fechamento)

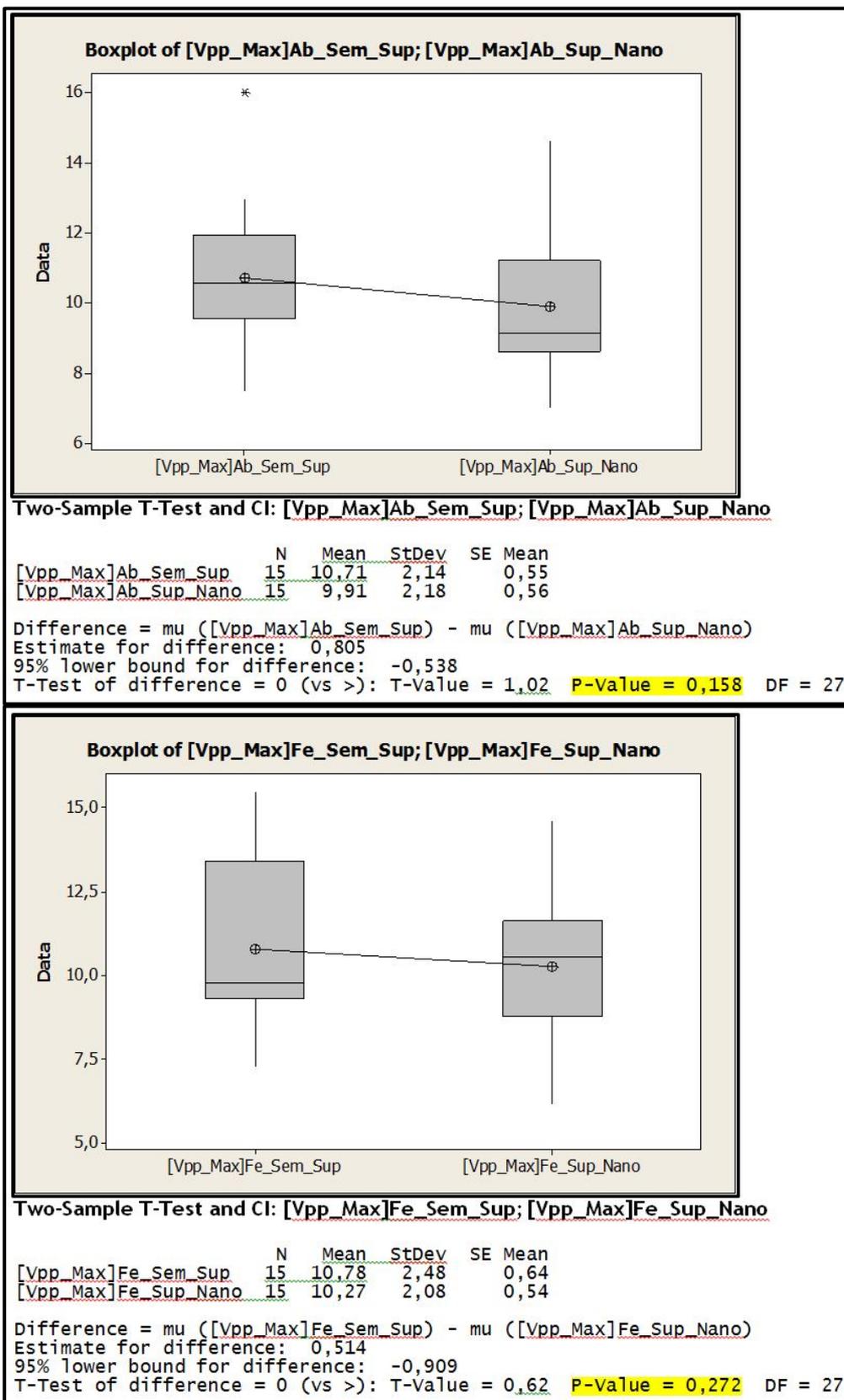


Figura 139 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vpp_Max sem supressor x Vpp_Max com supressor S_Nano (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vpp_Max sem supressor x Vpp_Max com supressor S_Nano (15 manobras de fechamento)

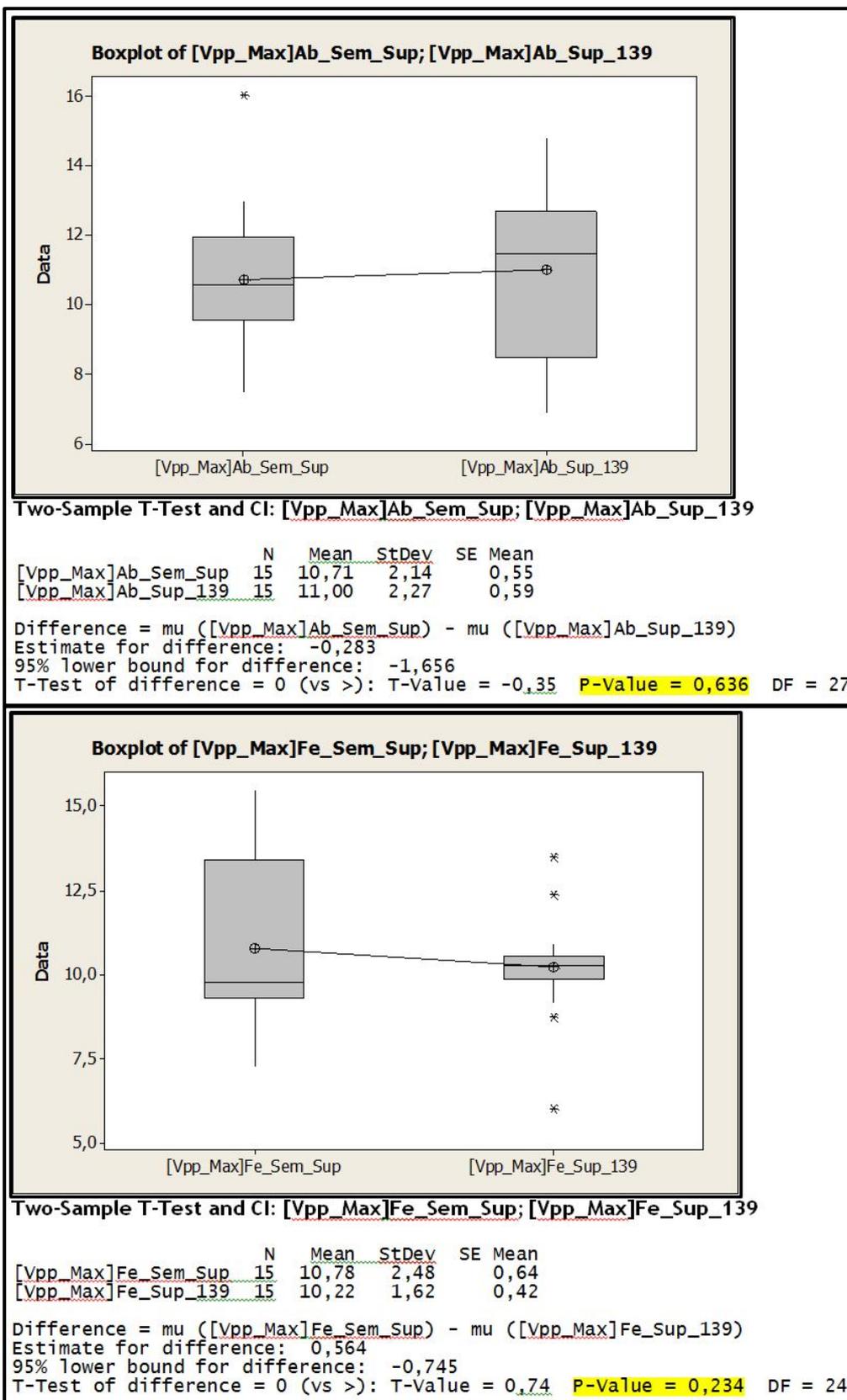


Figura 140 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vpp_Max sem supressor x Vpp_Max com supressor S_139 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vpp_Max sem supressor x Vpp_Max com supressor S_139 (15 manobras de fechamento)

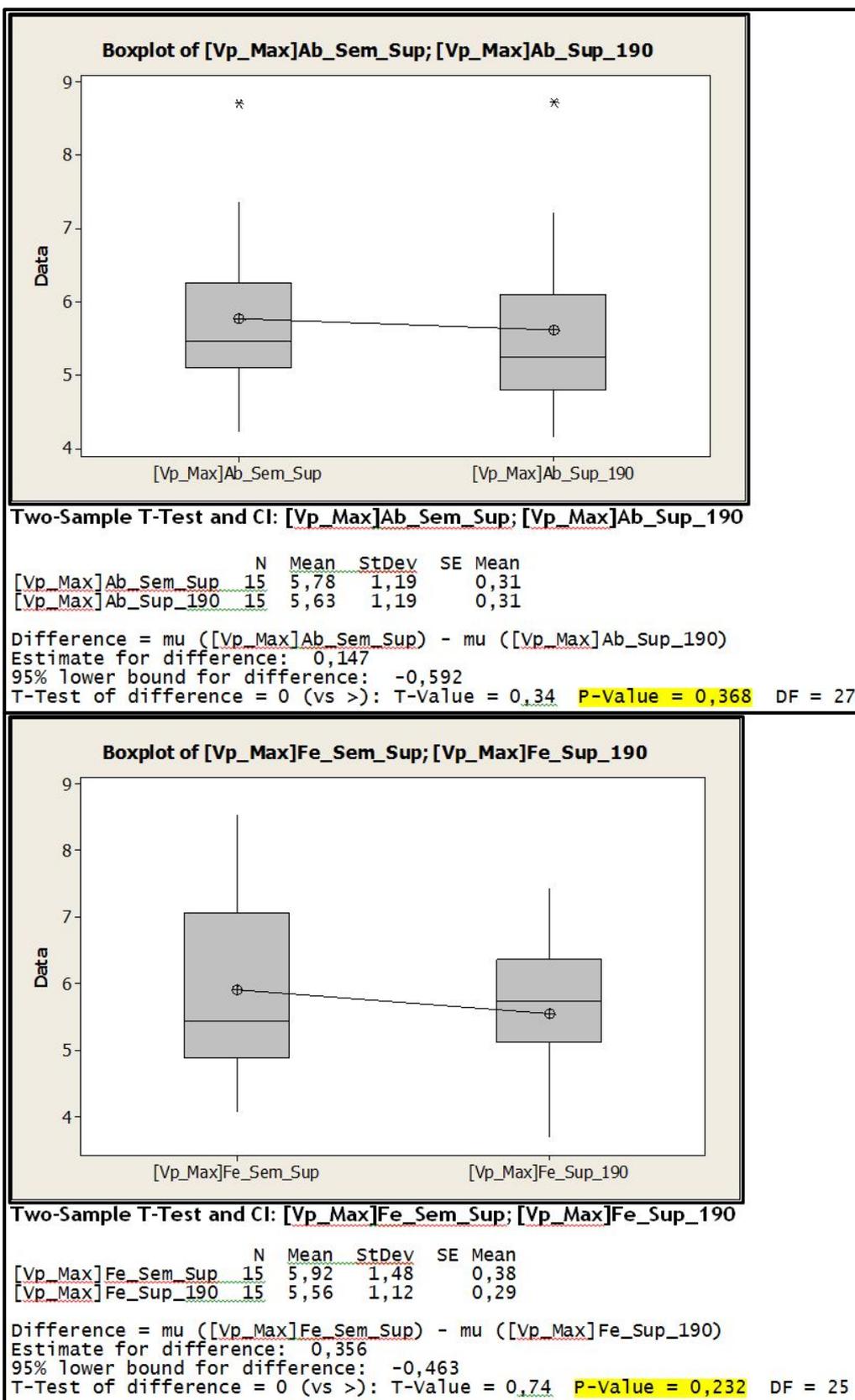


Figura 141 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vp_Max sem supressor x Vp_Max com supressor S_190 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vp_Max sem supressor x Vp_Max com supressor S_190 (15 manobras de fechamento)

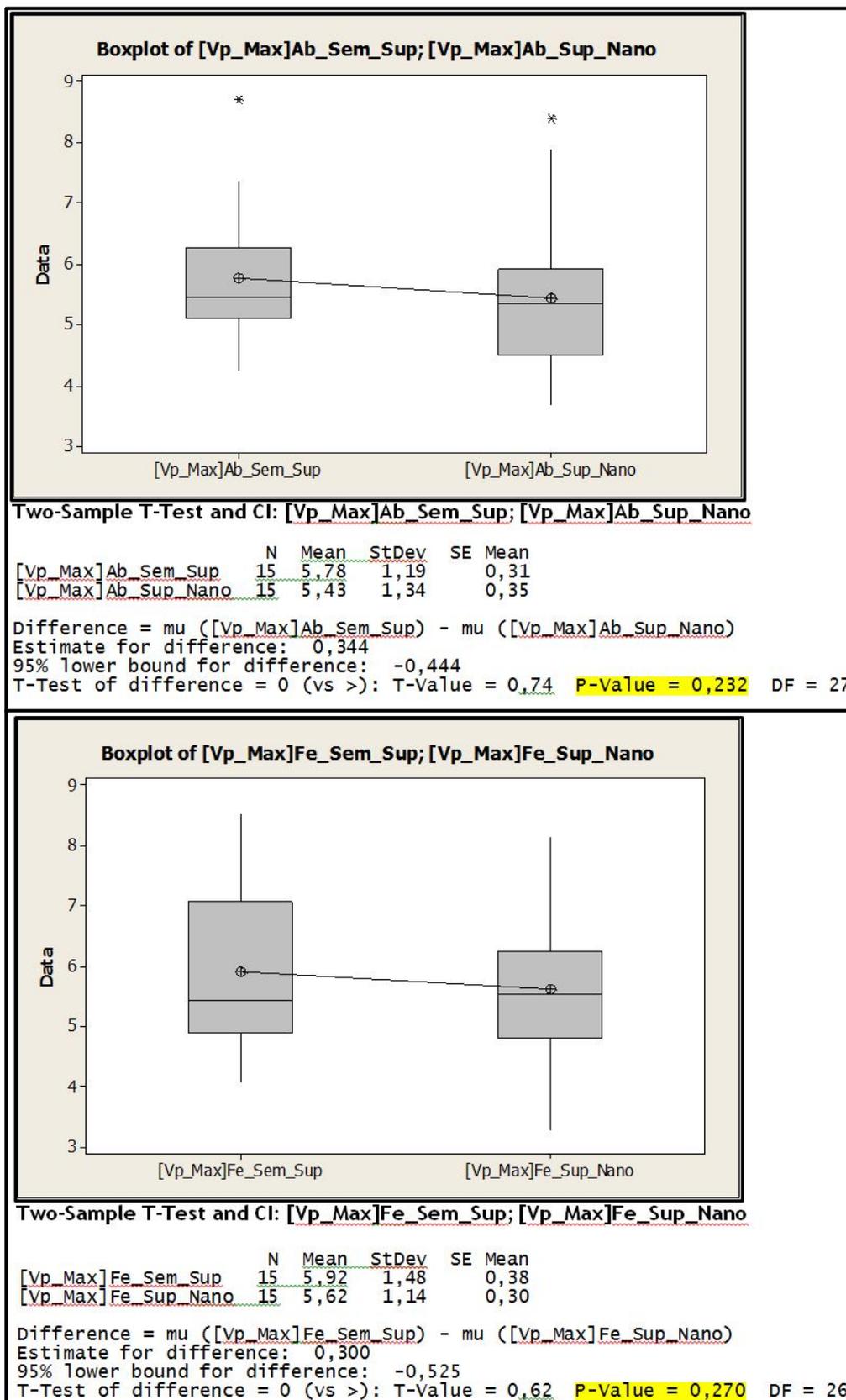


Figura 142 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vp_Max sem supressor x Vp_Max com supressor S_Nano (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vp_Max sem supressor x Vp_Max com supressor S_Nano (15 manobras de fechamento)

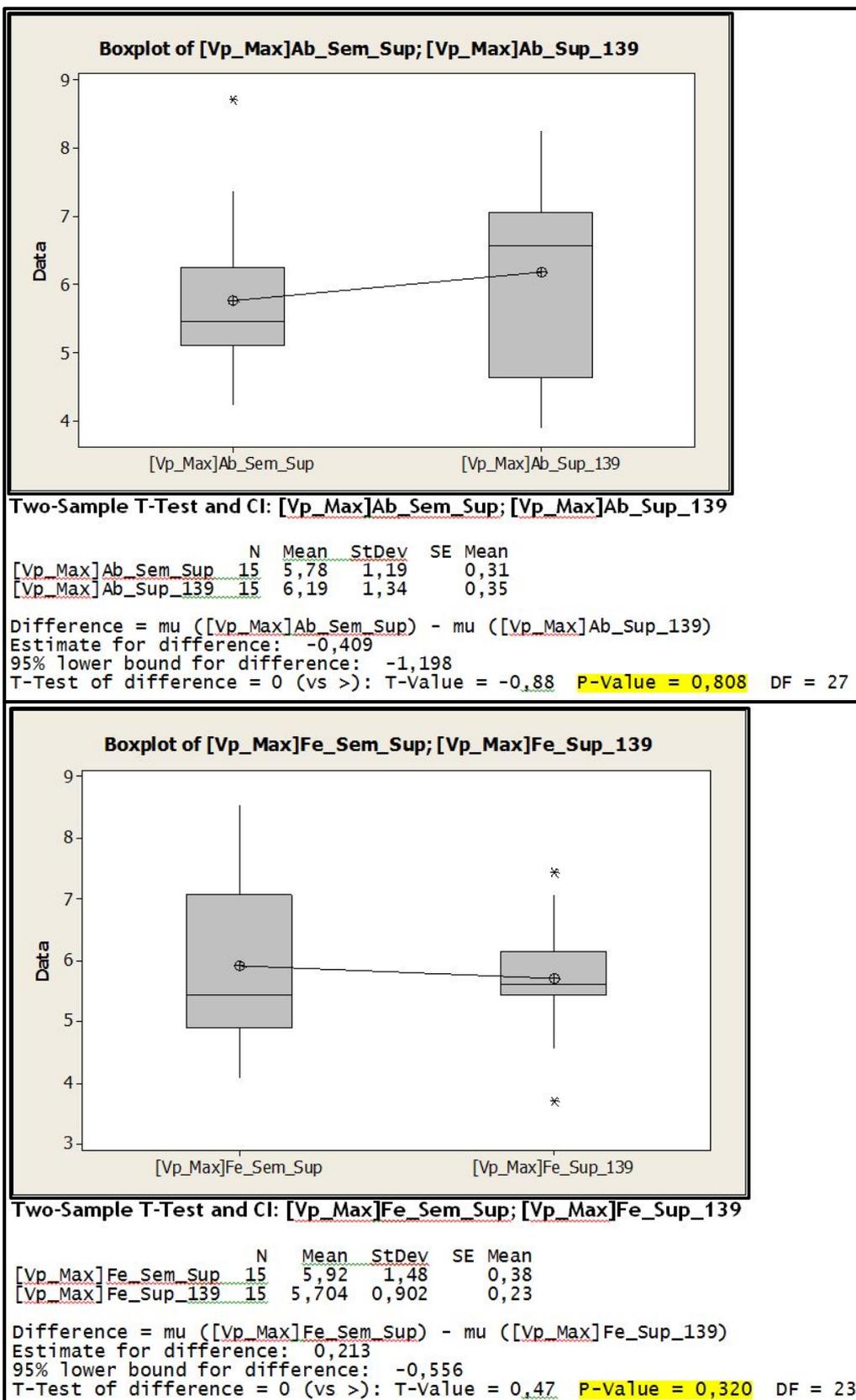


Figura 143 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vp_Max sem supressor x Vp_Max com supressor S_139 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vp_Max sem supressor x Vp_Max com supressor S_139 (15 manobras de fechamento)

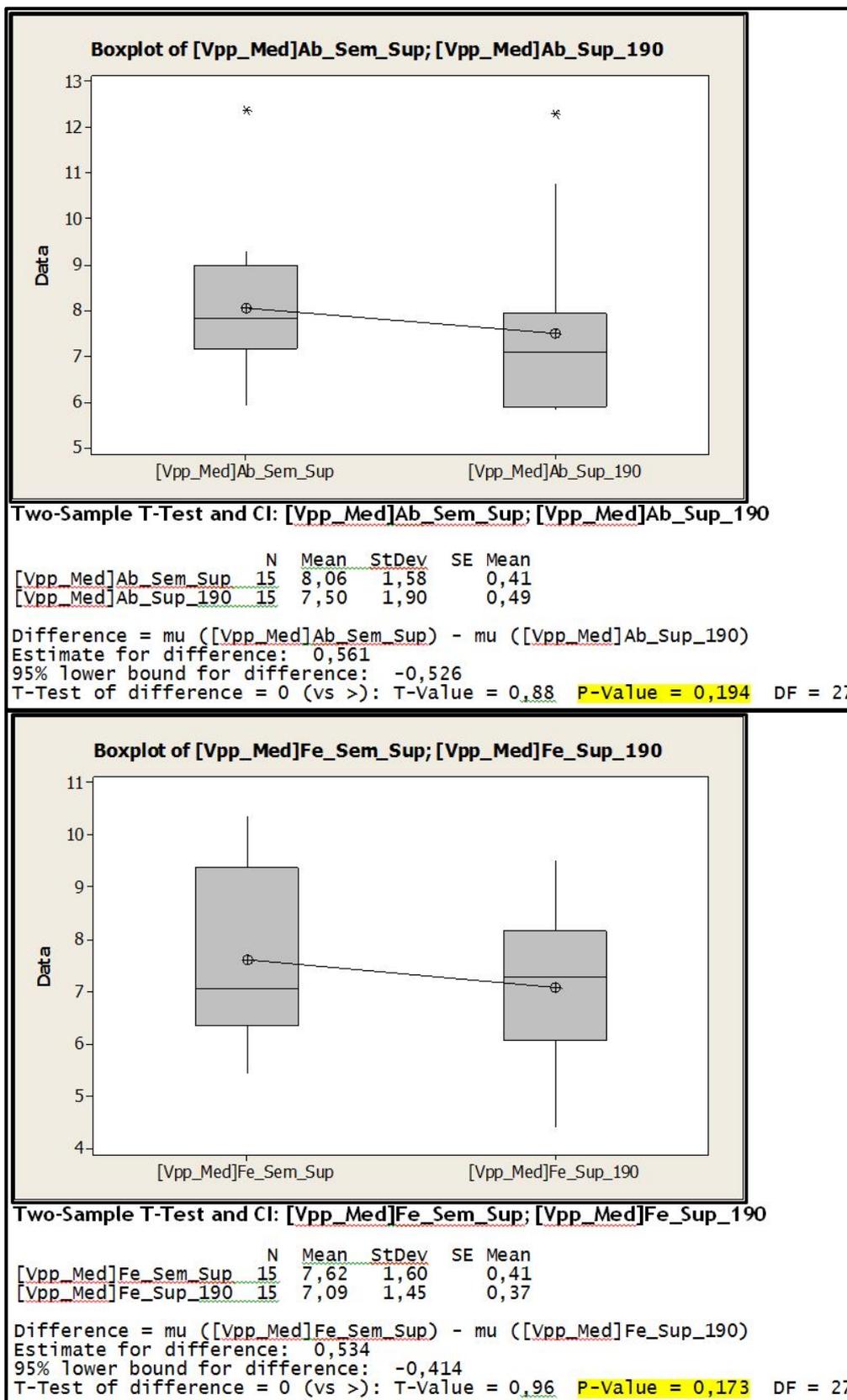


Figura 144 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vpp_Med sem supressor x Vpp_Med com supressor S_190 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vpp_Med sem supressor x Vpp_Med com supressor S_190 (15 manobras de fechamento)

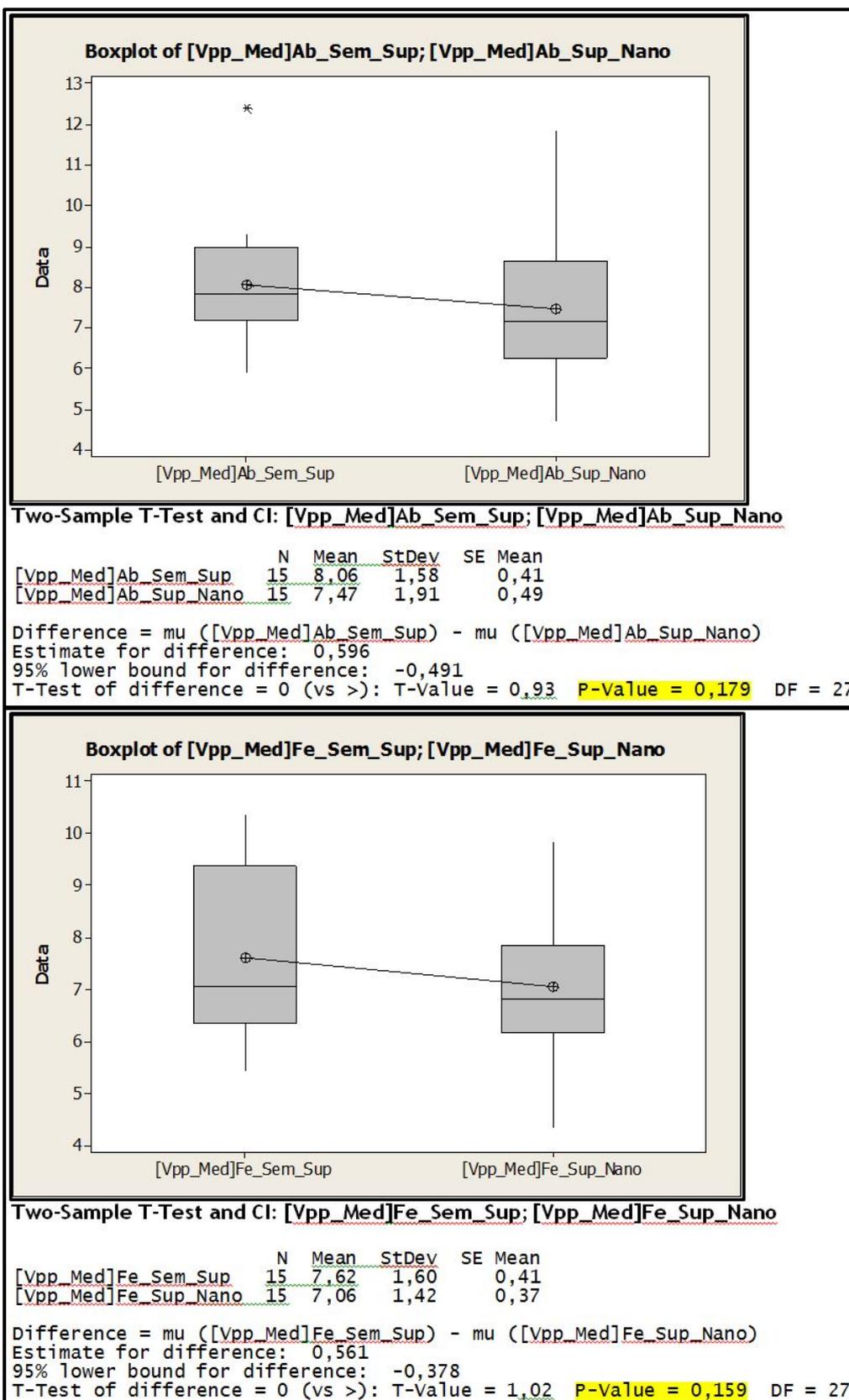


Figura 145 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vpp_Med sem supressor x Vpp_Med com supressor S_Nano (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vpp_Med sem supressor x Vpp_Med com supressor S_Nano (15 manobras de fechamento)

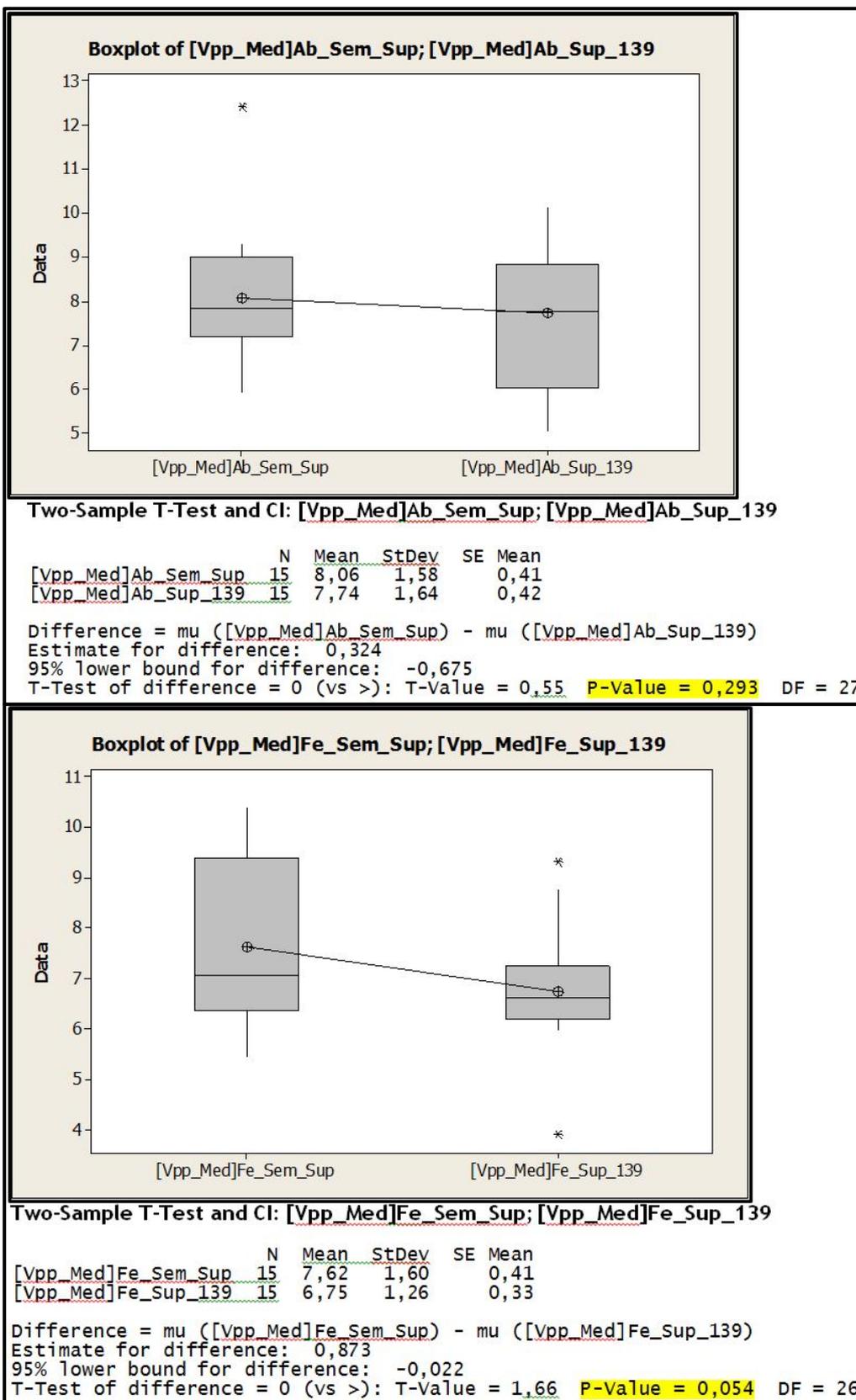


Figura 146 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vpp_Med sem supressor x Vpp_Med com supressor S_139 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vpp_Med sem supressor x Vpp_Med com supressor S_139 (15 manobras de fechamento)

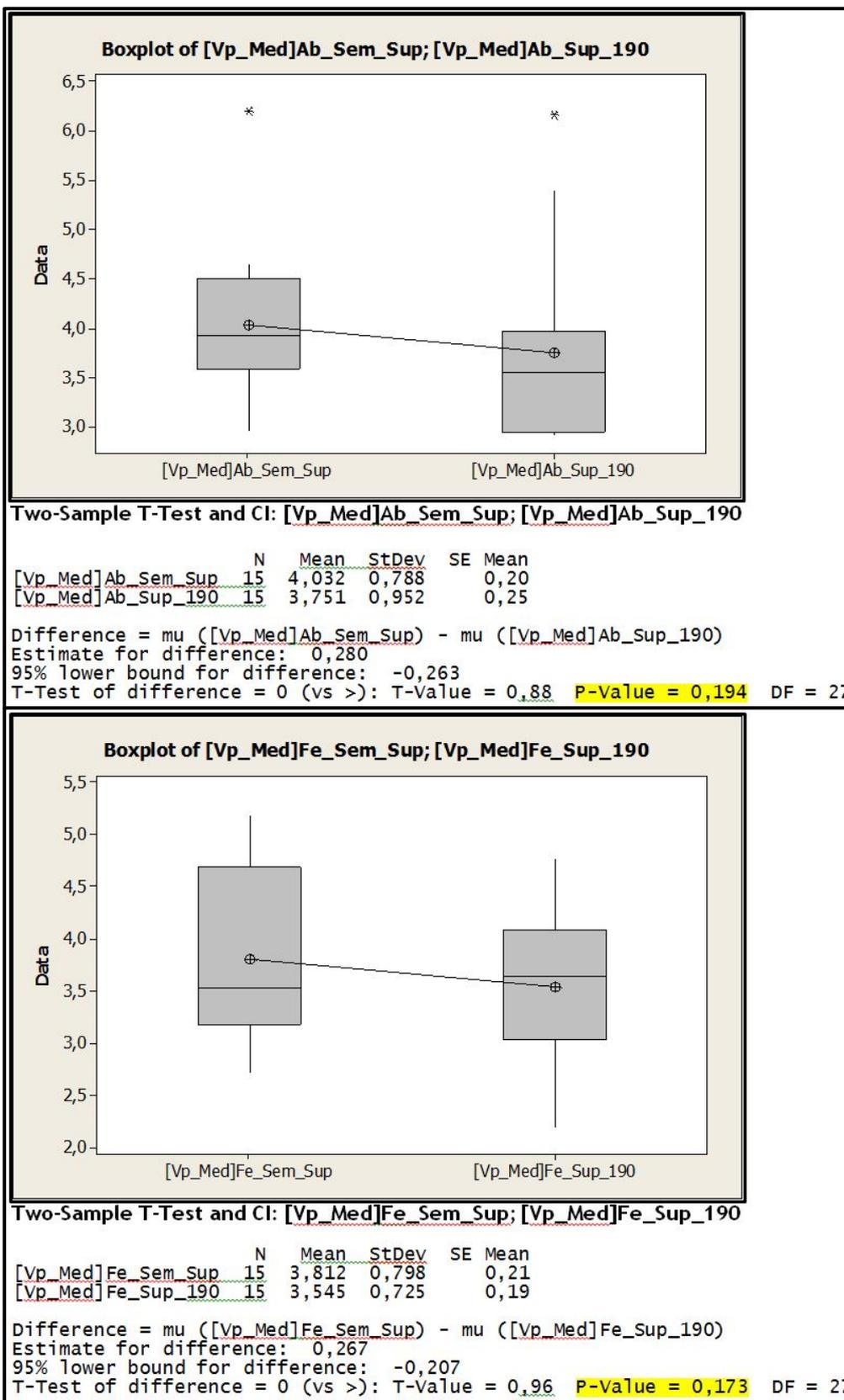


Figura 147 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vp_Med sem supressor x Vp_Med com supressor S_190 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vp_Med sem supressor x Vp_Med com supressor S_190 (15 manobras de fechamento)

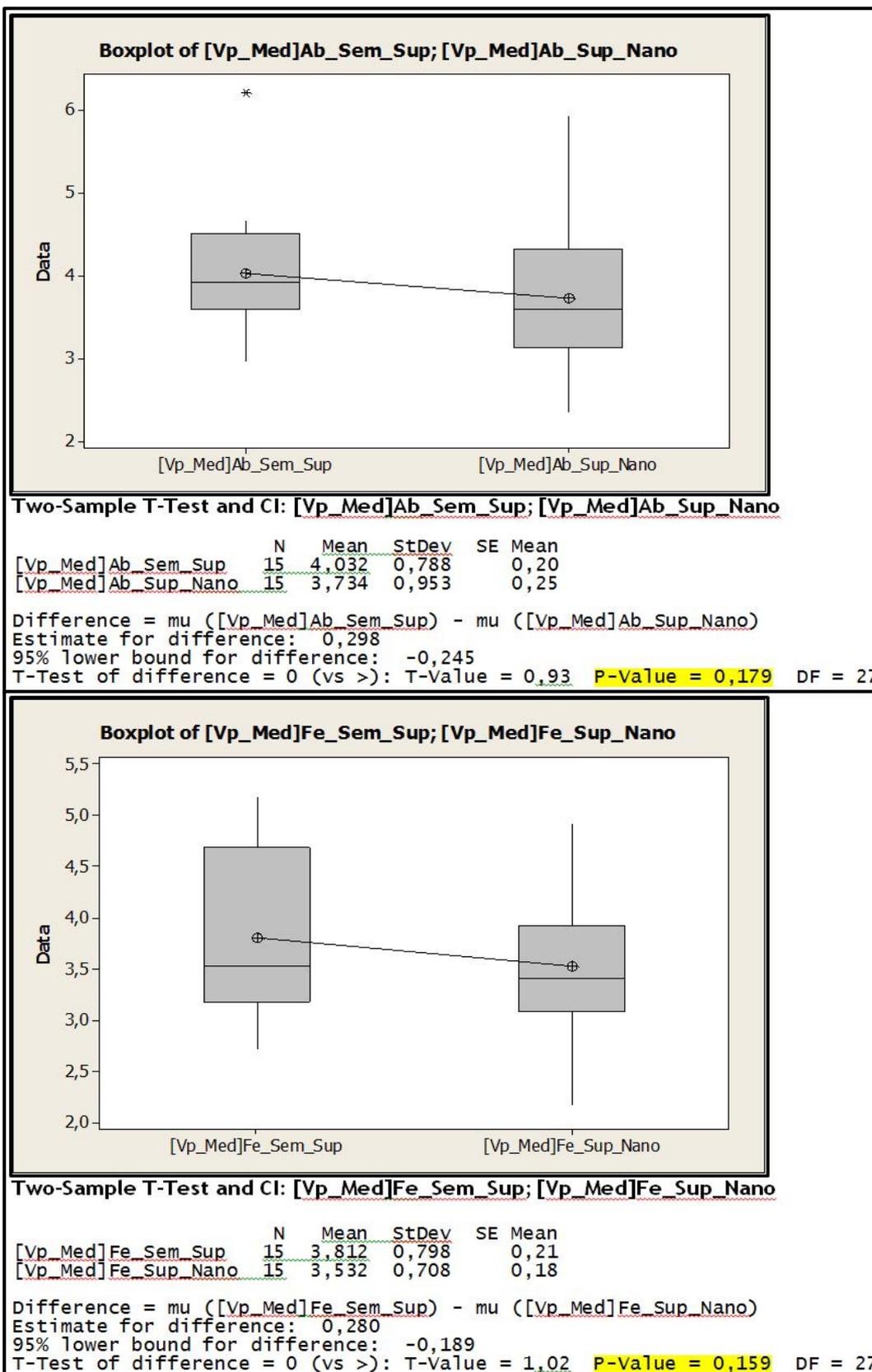


Figura 148 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vp_Med sem supressor x Vp_Med com supressor S_Nano (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vp_Med sem supressor x Vp_Med com supressor S_Nano (15 manobras de fechamento)

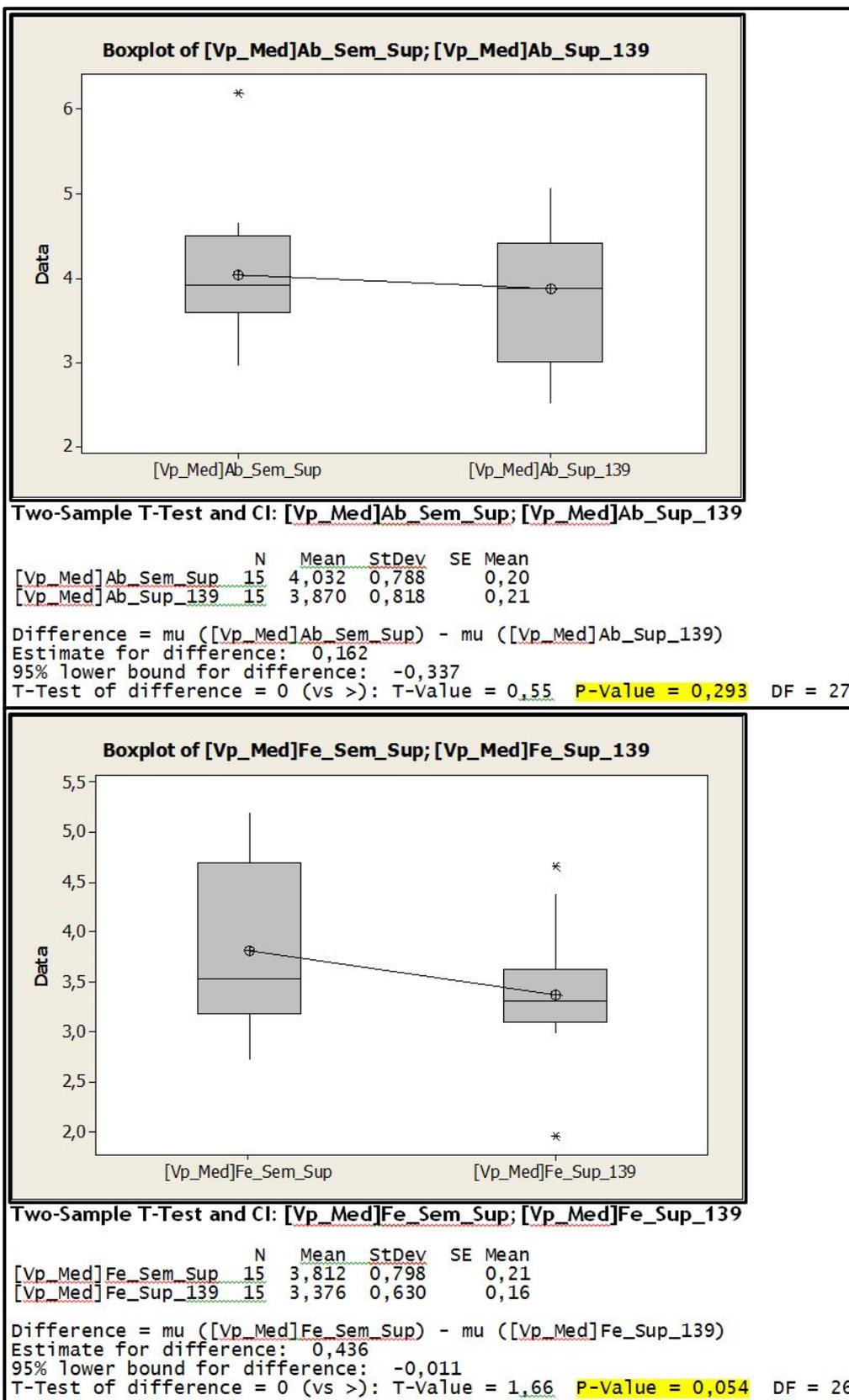


Figura 149 - Notação de saída para o aplicativo "Two-Sample T-Test" do Minitab
 Acima, Vp_Med sem supressor x Vp_Med com supressor S_139 (15 manobras de abertura)
 Abaixo, Vp_Med sem supressor x Vp_Med com supressor S_139 (15 manobras de fechamento)

ANEXOS

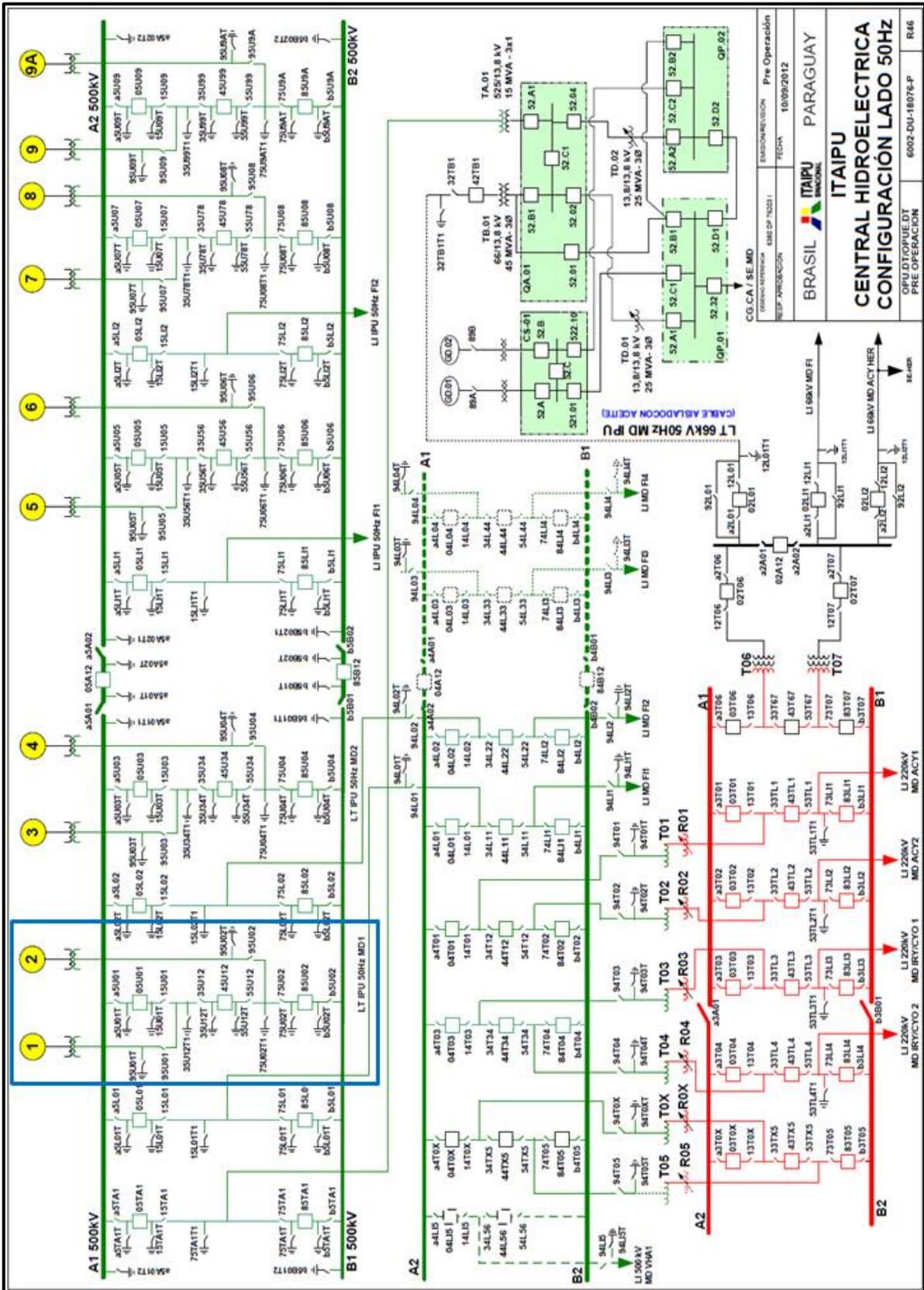


Figura 150 – Diagrama Unifilar da SE Blindada Itaipu 50 Hz. Em detalhe no retângulo azul, o bay dos geradores 1 e 2, utilizado na modelagem (Figura 5)

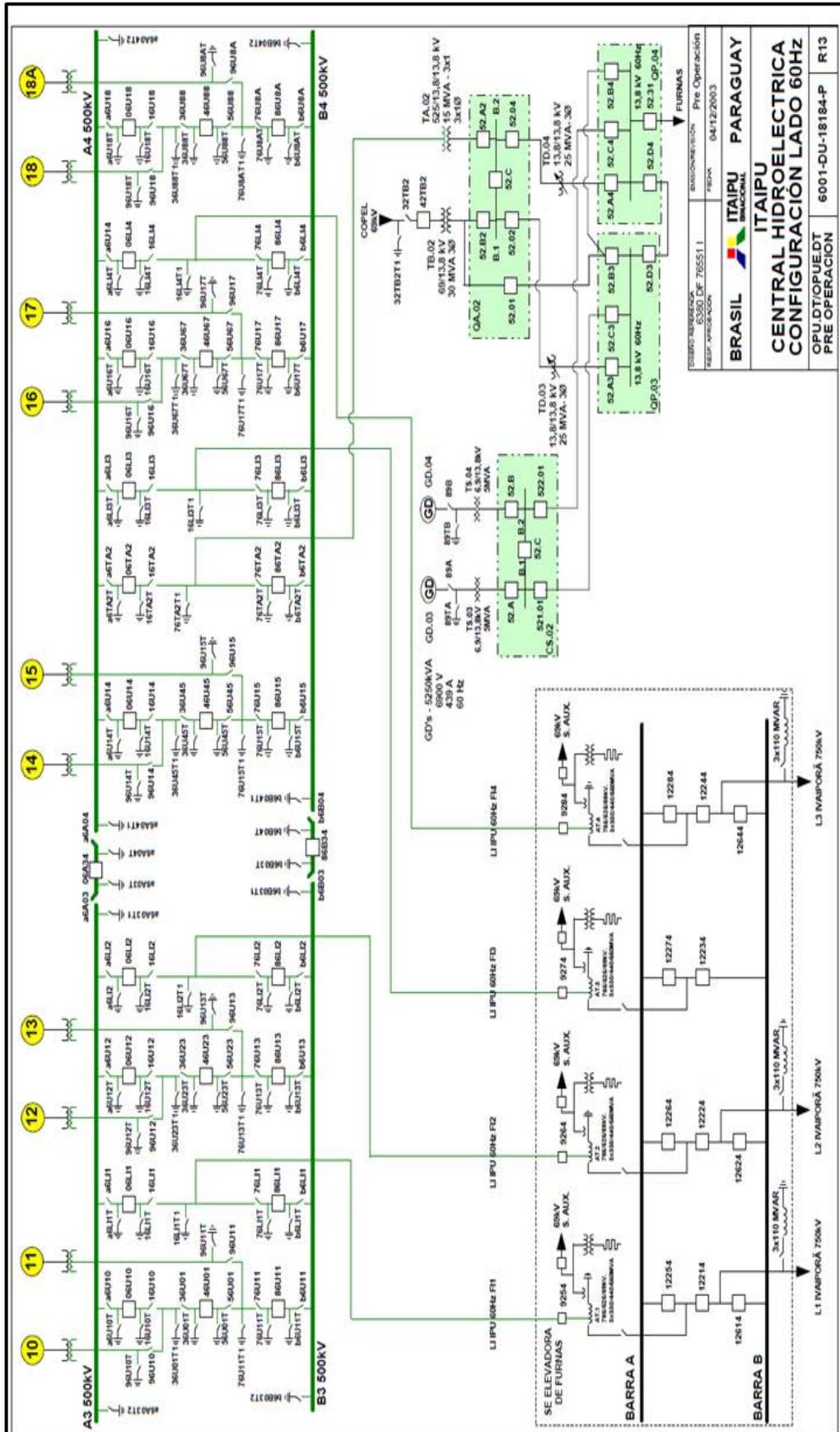


Figura 151 – Diagrama Unifilar da SE Blindada Itaipu 60 Hz

RG 58 95%

Sua aplicação é ideal para projetos de Rádio-Frequência e Teleinformática.
Utilizado para construção de redes locais de computador e em equipamento industrial de rádio.

Estas aplicações são as mais comuns, porém, o uso dos cabos se estende a outros projetos.





ANATEL

CABLA 100 M

CABRITEL 500 M

Dados Elétricos e Blindagem

Item	Valor
Cobertura de Blindagem	95%
Impedância Nominal	50 Ω
Velocidade de Propagação	65%

Características Construtivas

Item	Material	Diâmetro
Condutor central	Corda de cobre estanhado	0,91 mm
Dielétrico	Poliétileno sólido	3,00 mm
1ª Blindagem	Trança em fios de cobre estanhado	
Capa	PVC - Não propagante à chama	4,95 mm

Atenuação Máxima

Frequência	Atenuação (db/100m)
10	4,19
50	9,47
100	13,49
200	19,28
400	27,67
600	34,27
800	39,94
1000	45,01
1500	56,07
1800	61,96
2000	65,67
2400	72,65
3000	75,63



Figura 153 – Informações Técnicas Cabo RG-58 da Cabletech®, em detalhe a velocidade de propagação, 65 % da velocidade de propagação da luz