REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/10/2026 - **Accepted:** 18/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/a2dqrf84
Pages: 1-23

USO DO ATP NO ENSINO DE TRANSITÓRIOS DE CHAVEAMENTO: COMPARAÇÃO ENTRE SOLUÇÃO ANALÍTICA, SIMULAÇÃO E LEITURA GRÁFICA

USING ATP TO TEACH SWITCHING TRANSIENTS: A COMPARISON OF ANALYTICAL SOLUTION, SIMULATION AND GRAPHICAL READING

USO DEL ATP EN LA ENSEÑANZA DE TRANSITORIOS DE MANIOBRA: COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIÓN ANALÍTICA, SIMULACIÓN Y LECTURA GRÁFICA

Gustavo Paulino Dayrell
Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil
E-mail: gustavo@iftm.edu.br

Ricardo de Oliveira Muniz Junior
Professor, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Unidade Ituiutaba, Brasil
E-mail: ricardoliveira@iftm.edu.br

Resumo

Transitórios de chaveamento estão entre os conteúdos mais abstratos da formação em engenharia elétrica, pois exigem articular equações diferenciais, condições iniciais de indutores e capacitores e o comportamento físico de equipamentos. Este artigo relata uma sequência de oito atividades sobre esse conteúdo, resolvida individualmente no âmbito de uma disciplina de pós-graduação em Engenharia Elétrica, baseada no confronto entre três leituras do mesmo fenômeno: a solução analítica, a simulação no Alternative Transients Program (ATP) e a leitura gráfica das formas de onda simuladas. O objetivo é verificar em que medida a simulação reproduz os resultados teóricos nos modelos adotados e discutir o potencial didático dos casos em que a concordância é menor. As atividades partem de circuitos RL, RC e LC alimentados por fonte contínua e avançam para manobras típicas de sistemas de potência: energização de reator, eliminação de curto-circuito, corte de corrente indutiva, energização de bancos de capacitores simples e em vários estágios, abertura com reignição e energização de transformador. Em quinze grandezas comparadas, o módulo do desvio entre o valor analítico e o simulado ficou abaixo de 2% em doze casos e chegou a 6,7% em reignições sucessivas. Os casos de divergência, como a superposição analítica das contribuições de vários bancos de capacitores, evidenciaram limites dos modelos simplificados. Os resultados caracterizam a concordância entre cálculo e simulação nos

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/10/2026 - **Accepted:** 18/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/a2dqrf84
Pages: 1-23

modelos selecionados, e não a validação de equipamentos reais. Como não houve avaliação formal da aprendizagem, os benefícios educacionais são apresentados como potencial didático da proposta.

Palavras-chave: transitórios eletromagnéticos; ATP; ensino de engenharia elétrica; manobras; simulação computacional.

Abstract

Switching transients are among the most abstract topics in electrical engineering education, since they require connecting differential equations, initial conditions of inductors and capacitors and the physical behavior of equipment. This paper reports a sequence of eight activities on this topic, solved individually within a graduate course in Electrical Engineering, based on the comparison of three readings of the same phenomenon: the analytical solution, the simulation in the Alternative Transients Program (ATP) and the graphical reading of the simulated waveforms. The aim is to verify how closely the simulation reproduces the theoretical results for the adopted models and to discuss the teaching potential of the cases with lower agreement. The activities start with RL, RC and LC circuits fed by a DC source and move on to typical power system switching operations: reactor energization, short-circuit clearing, inductive current chopping, energization of single and back-to-back capacitor banks, opening with restrikes and transformer energization. Across fifteen compared quantities, the absolute deviation between analytical and simulated values was below 2% in twelve cases and reached 6.7% for successive restrikes. The divergent cases, such as the analytical superposition of the contributions of several capacitor banks, revealed limits of the simplified models. The results characterize the agreement between calculation and simulation for the selected models, not the validation of real equipment. Since learning was not formally assessed, educational benefits are presented as the teaching potential of the proposal.

Keywords: electromagnetic transients; ATP; electrical engineering education; switching; computer simulation.

Resumen

Los transitorios de maniobra están entre los contenidos más abstractos de la formación en ingeniería eléctrica, pues exigen articular ecuaciones diferenciales, condiciones iniciales de inductores y capacitores y el comportamiento físico de equipos. Este artículo relata una secuencia de ocho actividades sobre ese contenido, resuelta individualmente en una asignatura de posgrado en Ingeniería Eléctrica, basada en la confrontación de tres lecturas del mismo fenómeno: la solución analítica, la simulación en el Alternative Transients Program (ATP) y la lectura gráfica de las formas de onda simuladas. El objetivo es verificar en qué medida la simulación reproduce los resultados teóricos en los modelos adoptados y discutir el potencial didáctico de los casos con menor concordancia. Las actividades parten de circuitos RL, RC y LC alimentados por fuente continua y avanzan hacia maniobras típicas de sistemas de potencia: energización de reactor, despeje de cortocircuito, corte de corriente inductiva, energización de bancos de capacitores simples y en varias etapas, apertura con reencendido y energización de transformador. En quince magnitudes comparadas, el módulo de la desviación entre el valor analítico y el simulado quedó por debajo del 2% en doce casos y llegó al 6,7% en reencendidos sucesivos. Los casos de divergencia, como la superposición analítica de las contribuciones de varios bancos de capacitores, evidenciaron límites de los modelos simplificados. Los resultados caracterizan la concordancia entre cálculo y simulación en los modelos seleccionados, y no la validación de equipos reales. Como no hubo evaluación formal del aprendizaje, los beneficios educativos se presentan como potencial didáctico de la propuesta.

Palabras clave: transitorios electromagnéticos; ATP; enseñanza de ingeniería eléctrica; maniobras; simulación computacional.



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

1. Introdução

Transitórios de chaveamento estão entre os temas mais abstratos da formação em engenharia elétrica. Para compreendê-los, o estudante precisa articular equações diferenciais, condições iniciais de indutores e capacitores e o comportamento físico de equipamentos reais, como disjuntores, reatores, bancos de capacitores e transformadores. Na aula expositiva, esse conteúdo tende a ficar restrito à dedução de fórmulas, e o estudante raramente vê a forma de onda que a fórmula descreve.

Programas de simulação de transitórios eletromagnéticos, como o ATP (*Alternative Transients Program*), são ferramentas consolidadas na indústria e na pesquisa e têm sido levados também para a graduação (Perin e Couto; Perez *et al.*). Em muitos casos, porém, a simulação é usada para reproduzir exemplos prontos ou apenas para ilustrar um resultado já conhecido. Fica em segundo plano a possibilidade de usar o simulador para testar a própria teoria e para revelar os limites dos modelos simplificados ensinados em sala.

Este trabalho propõe esse segundo uso: a simulação como instrumento de verificação. Em cada atividade, o resultado analítico é confrontado com a forma de onda simulada e com uma leitura gráfica feita sobre essa forma de onda. A diferença entre as leituras deixa de ser um erro a esconder e passa a ser objeto de discussão.

O objetivo deste artigo é relatar e analisar uma sequência de oito atividades sobre transitórios de chaveamento, resolvida no âmbito de uma disciplina de pós-graduação em Engenharia Elétrica, com três objetivos específicos: descrever o roteiro de três leituras adotado; quantificar a concordância entre a solução analítica e a simulação no ATP nos modelos utilizados; e discutir o potencial didático dos casos em que essa concordância é menor. Ressalta-se que a leitura gráfica é uma representação da própria saída computacional, e não uma medição experimental em equipamento.

2. Revisão da Literatura

2.1 Transitórios de chaveamento

Toda manobra em um circuito com elementos armazenadores de energia provoca um período de transição entre dois regimes permanentes. Durante esse período, a corrente em um indutor e a tensão em um capacitor não podem variar de forma instantânea, e a redistribuição da energia armazenada produz correntes e

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

tensões que podem superar muitas vezes os valores nominais (Greenwood). Em sistemas de potência, essas solicitações definem o dimensionamento de disjuntores, para-raios e isolamentos (D'Ajuz *et al.*).

Em circuitos de primeira ordem, a duração do transitório é governada pela constante de tempo, que no circuito RL vale:

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{1}$$

em que τ é a constante de tempo (s), L é a indutância (H) e R é a resistência (Ω). O regime permanente é considerado atingido após cerca de cinco constantes de tempo. Em circuitos com indutância e capacitância, a energia oscila entre os dois elementos na frequência natural:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2}$$

em que f_0 é a frequência natural (Hz) e C é a capacitância (F); o período natural é $T_0 = 1/f_0$. Na ausência de resistência, essa oscilação não se amortece. Para um circuito LC série alimentado por uma fonte de tensão V constante durante o transitório, a amplitude da corrente depende da diferença entre V e a tensão inicial do capacitor V_0 e da impedância característica √(L/C), em Ω:

$$i_{\text{máx}} = \frac{V - V_0}{\sqrt{L/C}} \tag{3}$$

Essas duas expressões, a frequência natural e a impedância característica, aparecem em quase todas as manobras estudadas, desde a energização de bancos de capacitores até a tensão de restabelecimento transitória (TRV) após a eliminação de um curto-circuito. Por isso, a sequência começa pelo circuito LC elementar, onde elas podem ser verificadas isoladamente.

2.2 Simulação no ensino de engenharia elétrica

O ATP é um programa de domínio público para simulação de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo, derivado do EMTP (Leuven EMTP Center). Com a interface gráfica ATPDraw, o circuito é montado de forma visual, o que reduz a barreira de entrada para estudantes. Perin e Couto defendem seu uso na graduação como complemento ao estudo de circuitos e de sistemas elétricos de potência, por permitir simular desde circuitos simples até sistemas complexos.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Perez *et al.* relatam um minicurso de ATPDraw oferecido a estudantes de engenharia elétrica e observam que a simulação ajuda a lidar com a abstração característica do curso, em que o objeto de estudo muitas vezes não pode ser visto nem manuseado. Em ambos os trabalhos, contudo, a ênfase está em apresentar a ferramenta. O presente artigo desloca a ênfase para o confronto quantitativo entre simulação e teoria, tomando o desvio entre ambas como conteúdo de aprendizagem.

3. Metodologia

3.1 Contexto da aplicação

Trata-se de um relato de experiência de natureza descritiva e quantitativa. As oito atividades constituíram o primeiro trabalho avaliativo da disciplina de Transitórios Eletromagnéticos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, no segundo semestre de 2023. Os enunciados e os dados dos circuitos foram propostos pelos docentes da disciplina, e as atividades foram resolvidas individualmente pelo primeiro autor, então mestrando, que registrou cálculos, simulações e análises em relatório entregue em novembro de 2023. O tempo dedicado a cada atividade não foi registrado.

O material analisado neste artigo é exclusivamente esse relatório, produzido pelo próprio autor. Não houve coleta de dados de outros estudantes, aplicação de questionários ou avaliação formal da aprendizagem. Por isso, as observações didáticas apresentadas na Seção 4 correspondem às percepções do autor durante a resolução e à análise posterior dos resultados, e não a evidências de ganho de aprendizagem.

3.2 Roteiro das atividades

Cada atividade seguiu o mesmo roteiro:

a) solução analítica: dedução da expressão da grandeza de interesse e cálculo do valor esperado;
b) simulação no ATP: montagem do circuito equivalente, com passo de integração e tempo de simulação definidos a partir da própria teoria;
c) leitura gráfica: leitura, sobre a forma de onda simulada, dos picos e do intervalo entre máximos consecutivos, de onde se obtém a frequência de oscilação;
d) confronto: cálculo do desvio percentual entre o valor analítico e o simulado e discussão de suas possíveis causas.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

A escolha do passo de integração é, ela própria, um ponto didático. O passo foi definido como uma fração da menor escala de tempo do circuito, isto é, da constante de tempo nos circuitos de primeira ordem ou do período natural T_0 nos circuitos oscilatórios:

$$\Delta t = \frac{T_0}{N}, \quad N = 20 \text{ a } 50 \tag{4}$$

em que Δt é o passo de integração e N é o número de passos por período, adotado entre 20 e 50 conforme a atividade; nos circuitos de primeira ordem, usou-se Δt = τ/20. O tempo de simulação foi escolhido para cobrir todo o transitório, cerca de 5τ, ou um número inteiro de ciclos da oscilação natural. Assim, o estudante precisa estimar a dinâmica do circuito antes de simular. As atividades foram organizadas em ordem crescente de complexidade, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Sequência de atividades e grandezas confrontadas.

Atividade	Manobra	Grandeza confrontada
1	Energização de circuitos RL, RC e LC com fonte CC	τ, regime permanente, f_0, i máx
2	Energização de reator (60 Hz)	Ângulo de fechamento e pico de corrente
3	Eliminação de curto-circuito em terminal	TRV e RRRV
4	Corte de corrente indutiva	Sobretensão de pico
5	Energização de banco de capacitores	Pico de corrente e f_0; mitigação
6	Bancos de capacitores em vários estágios	Contribuição de cada ramo
7	Abertura de banco com reignição	Escalonamento da tensão
8	Energização de transformador de 30 kVA	Fluxo residual e componente contínua

Fonte: Elaborada pelos autores.

A Tabela 1 mostra que a sequência parte de circuitos com solução analítica simples e chega a manobras em que o modelo depende de hipóteses mais fortes, como a superposição de contribuições ou a ausência de perdas. Essa progressão permite perceber, ao longo das atividades, onde a teoria simplificada começa a perder precisão.

3.3 Configuração das simulações

As simulações foram feitas no ATP com a interface ATPDraw 7.6, com fontes ideais, elementos lineares concentrados e chaves ideais controladas por tempo, salvo indicação em contrário. Nenhum modelo incluiu perdas além das resistências explicitamente listadas. A Tabela 2 reúne os parâmetros, as manobras, o passo de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

integração e o tempo de simulação de cada atividade, conforme registrados no relatório original.

Tabela 2. Configuração das simulações por atividade.

Ativ.	Circuito e parâmetros	Manobra	Δt	Duração
1 (RL)	Fonte 10 V CC; R = 3 Ω; L = 1,5 mH	Fechamento em t = 0	25 µs	3 ms
1 (RC)	Fonte 10 V CC; R = 3 Ω; C = 1,5 µF	Fechamento em t = 0	225 ns	23 µs
1 (LC)	Fonte 10 V CC; L = 1,5 mH; C = 1,5 µF; V_0 = 0 e 5 V	Fechamento em t = 0	T_0/20	1,7 ms
2	Fonte 187,79 kV; L_s = 28 mH; reator 53 Ω e 2,8 H	Fechamento em 16,54 ms (θ = 357,2°) e 4,04 ms (θ = 87,2°)	835 µs	0,5 s
3	Fonte 112,47 kV; L = 20 mH; C = 2000 pF (+ 62,08 nF)	Abertura no zero da corrente de falta	1 µs	170 ms
4	Fonte 11,27 kV; L_m = 25,5 H; C = 1000 pF	Abertura em 53,87 ms (corrente de 1,17 A)	25 µs	200 ms
5	Fonte 11,27 kV; L_s = 0,144 mH; L_t = 0,631 mH; C = 111 µF; R = 0,3 Ω ou ΔL = 1,75 mH	Fechamento em 16,667 ms (pico da tensão)	45 µs	200 ms
6	Fonte 11,27 kV; L_s = 0,1 mH; L_t = 0,5 mH; C_1 = 139 µF; C_2 = C_3 = 69,6 µF; L_1 = 2 mH; L_2 = 1,5 mH; L_3 = 1 mH	Bancos 1 e 2 energizados; banco 3 em 66,667 ms	37 µs	200 ms
7	Fonte 11,27 kV; indutor e capacitor em série; três chaves em paralelo	Abertura em 41,65 ms; reignições: chave 2 de 49,94 a 50,44 ms e chave 3 de 58,31 a 58,81 ms	Não registrado	Não registrado
8	Transformador 30 kVA, 13,8/0,38 kV, Δ-Y aterrado; R_1 = 95,22 Ω; L_1 = 847,1 mH; R_2 = 0,072 Ω; L_2 = 0,642 mH; R_m = 7,935 MΩ; ramo de magnetização não linear	Fechamento em ângulos que produzem componente contínua positiva e negativa	Não registrado	Não registrado

Fonte: Elaborada pelos autores. Tensões de fonte em valor de pico fase-terra.

A Tabela 2 permite reproduzir as simulações a partir dos dados de entrada. Nas atividades 7 e 8, o passo e a duração da simulação não constam do relatório original e, por isso, são indicados como não registrados; na atividade 7, também não foram registrados os valores de indutância e capacitância. Na atividade 8, o ramo de magnetização foi representado por um indutor não linear com a curva de saturação de aço silício de grãos orientados disponível no material de apoio do ATP, ajustada à corrente a vazio de 0,4%. Por essas lacunas, a reprodutibilidade é tratada neste artigo como potencial do roteiro, e não como propriedade demonstrada para todas as atividades.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

3.4 Extração dos valores e cálculo do desvio

Todos os valores simulados da Tabela 3 foram obtidos por leitura gráfica com cursor no visualizador de formas de onda do ATP, e não por exportação numérica dos dados. Os picos foram lidos diretamente no máximo da curva, e as frequências foram calculadas pelo inverso do intervalo entre dois máximos consecutivos. Os valores foram registrados com a resolução exibida pelo cursor, sem interpolação. Como a forma de onda só é conhecida nos instantes de integração, a incerteza de leitura de um intervalo de tempo é da ordem de um passo Δt; desvios de frequência menores que $\Delta t/T_0$ não devem, portanto, ser interpretados como diferença entre modelo e simulação. As simulações não foram repetidas com passo menor, o que é indicado como limitação.

O desvio percentual foi calculado sobre os módulos das grandezas, preservando o sinal para indicar se a simulação superestima ou subestima a magnitude prevista:

$$\delta = \frac{|X_{\text{sim}}| - |X_{\text{an}}|}{|X_{\text{an}}|} \times 100\% \quad (5)$$

em que Xsim é o valor simulado e Xan é o valor analítico. Considerou-se haver concordância quando |δ| < 2%.

4. Resultados e Discussão

4.1 Circuitos elementares

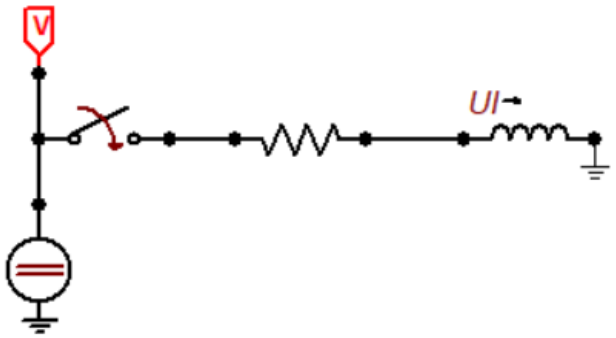
Nos circuitos alimentados por fonte de 10 V CC, a simulação confirmou as condições de continuidade que o estudante costuma apenas memorizar. No circuito RL, com R = 3 Ω e L = 1,5 mH, montado no ATPDraw conforme a Figura 1, a constante de tempo é de 0,5 ms e o passo adotado foi de 25 μs. A corrente cresce exponencialmente até V/R ≈ 3,33 A (Figura 2), enquanto a tensão no indutor decai de 10 V a zero em cerca de 5τ. O resultado justifica, pela dinâmica, a representação do indutor como curto-circuito em regime contínuo.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

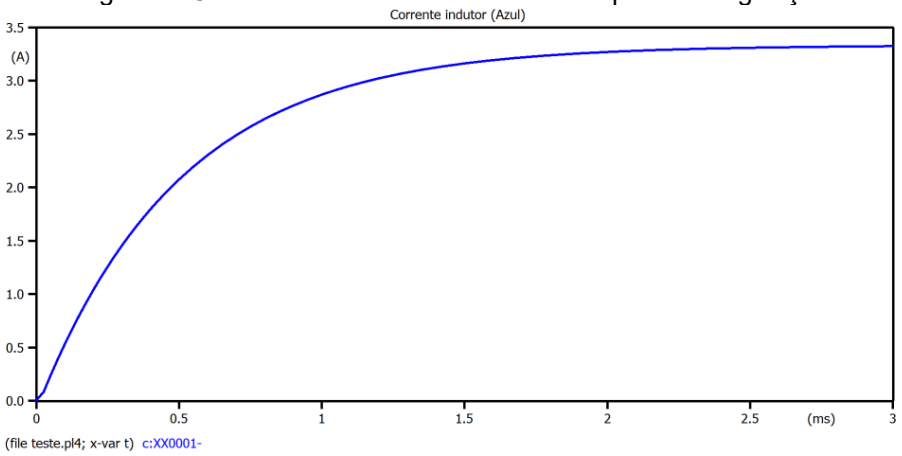
Figura 1. Circuito RL montado no ATPDraw.



Fonte: Elaborada pelos autores no ATPDraw.

Na Figura 1, a fonte de 10 V CC aparece à esquerda, ligada por uma chave controlada por tempo ao resistor e ao indutor em série. Os medidores indicam as grandezas registradas na simulação: a tensão da fonte e a tensão e a corrente no indutor. A mesma lógica de montagem, com fonte, chave temporizada e elementos concentrados, foi usada em todas as atividades.

Figura 2. Corrente no indutor do circuito RL após a energização.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Observa-se na Figura 2 que a corrente parte de zero, sem descontinuidade, e se estabiliza em 3,33 A após cerca de 2,5 ms, ou seja, cinco constantes de tempo. A ausência de salto no instante da manobra é a evidência gráfica de que a corrente no indutor não varia instantaneamente.

No circuito RC, com C = 1,5 µF, a constante de tempo cai para 4,5 µs e o passo para 225 ns. A corrente no capacitor salta no instante da manobra e decai a zero, enquanto a tensão cresce gradualmente até 10 V, de modo que o capacitor passa a se comportar como circuito aberto.

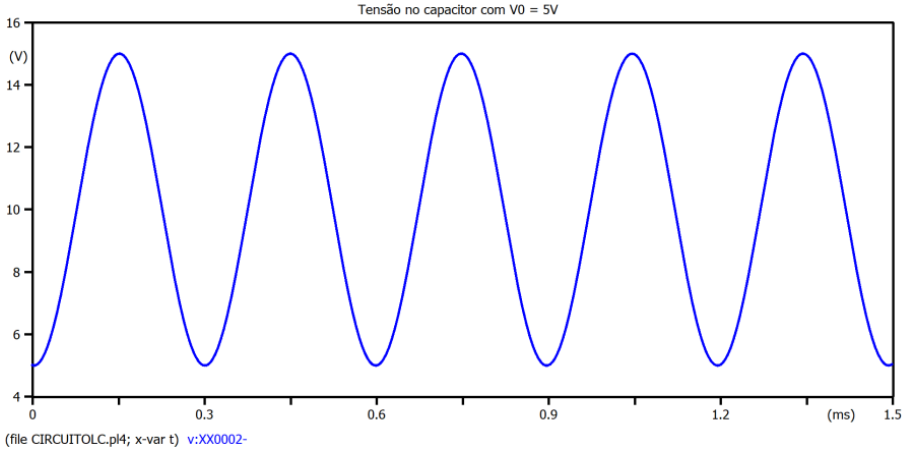
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

No circuito LC, com L = 1,5 mH e C = 1,5 µF, a Equação (2) prevê f_0 = 3355,28 Hz, e a Equação (3) prevê corrente máxima de 0,316 A. A leitura gráfica do intervalo entre dois máximos consecutivos da tensão no indutor resultou em 3338,89 Hz, desvio de −0,49%. Com tensão residual de 5 V no capacitor, a amplitude da oscilação e a corrente máxima caem à metade (0,158 A), e a tensão no capacitor passa a oscilar entre 5 V e 15 V (Figura 3). Esse caso prepara o estudante para o papel da tensão residual nas atividades 5 e 7.

Figura 3. Tensão no capacitor do circuito LC com tensão residual de 5 V.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Na Figura 3, nota-se que a tensão no capacitor começa em 5 V, e não em zero, e oscila com amplitude de 5 V em torno da tensão da fonte. O valor de partida confirma a continuidade da tensão no capacitor, e a amplitude reduzida mostra que a tensão residual diminui a energia trocada entre indutor e capacitor.

4.2 Energização de reator

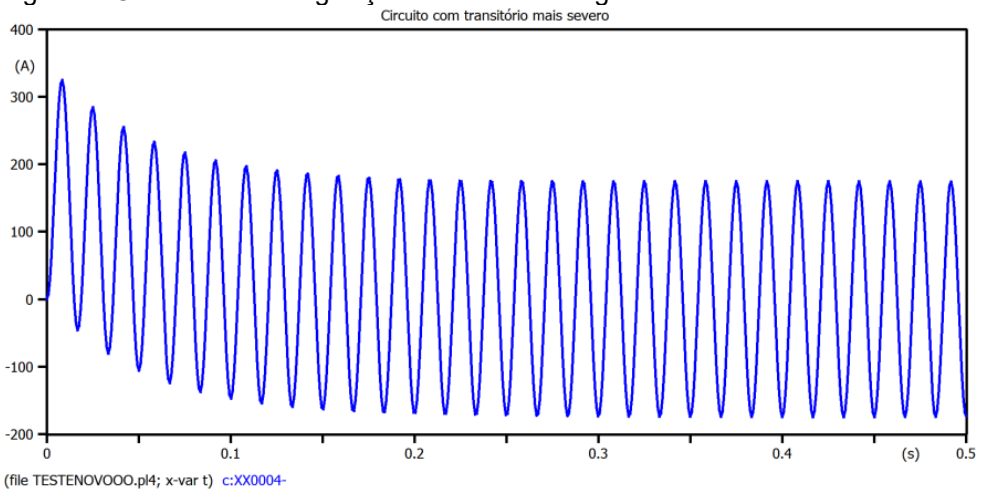
Com fonte de 187,79 kV, indutância do sistema de 28 mH e reator de 53 Ω e 2,8 H, o ângulo de impedância do circuito é de 87,2°. O fechamento em θ = 357,2°, isto é, em t = 16,54 ms, produziu o caso mais severo, com pico de cerca de 324 A contra 174 A em regime (Figura 4). O fechamento em θ = 87,2°, em t = 4,04 ms, eliminou a componente contínua, e o ângulo médio entre os dois casos gerou pico intermediário de cerca de 280 A. A atividade mostra de forma direta o princípio do chaveamento controlado.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Figura 4. Corrente de energização do reator no ângulo de fechamento mais severo.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

A Figura 4 mostra que o primeiro pico de corrente chega a quase o dobro do valor de regime e que a componente contínua decai gradualmente, com a constante de tempo do circuito equivalente. É esse deslocamento inicial da onda que desaparece quando o fechamento ocorre no ângulo da impedância.

4.3 Eliminação de curto-circuito

No circuito de 112,47 kV, com indutância de 20 mH e capacitância de 2000 pF, a frequência natural de 25,16 kHz exigiu passo de cerca de 1 µs. Após a interrupção da corrente de falta, a tensão nos terminais do disjuntor atingiu 226,39 kV em poucos microssegundos (Figura 5), com taxa de crescimento (RRRV) de 11,32 kV/µs, valores próximos dos teóricos de 225 kV e 11,2 kV/µs. A taxa de crescimento é dada por:

$$RRRV = \frac{2V_m}{\pi\sqrt{LC}} \tag{6}$$

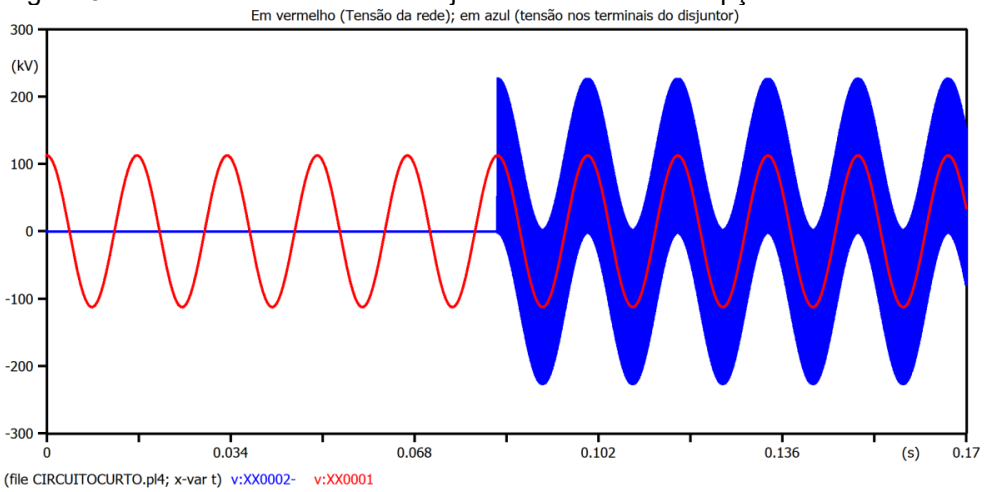
em que RRRV é a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento (V/s) e V_m é a tensão de pico da fonte (V). Para limitar o RRRV a 2 kV/µs, a Equação (6) foi resolvida para a capacitância, o que indicou um capacitor adicional de 62,08 nF. A simulação com esse capacitor confirmou RRRV de 2,0 kV/µs, uma redução de mais de cinco vezes. A atividade transforma a fórmula em critério de projeto.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Figura 5. Tensão nos terminais do disjuntor durante a interrupção do curto-circuito.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Na Figura 5, a curva vermelha representa a tensão da rede e a curva azul, a tensão nos terminais do disjuntor. Após a interrupção, observa-se uma oscilação de alta frequência sobreposta à tensão da rede: seu primeiro pico define a TRV, e a inclinação da subida define o RRRV.

4.4 Corte de corrente indutiva

Na interrupção de uma corrente de 1,17 A de pico em um reator de 25,5 H com capacitância de 1000 pF, a energia magnética armazenada é transferida para a capacitância, o que produz a sobretensão:

$$V_{\text{pico}} = I_{\text{corte}}\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{7}$$

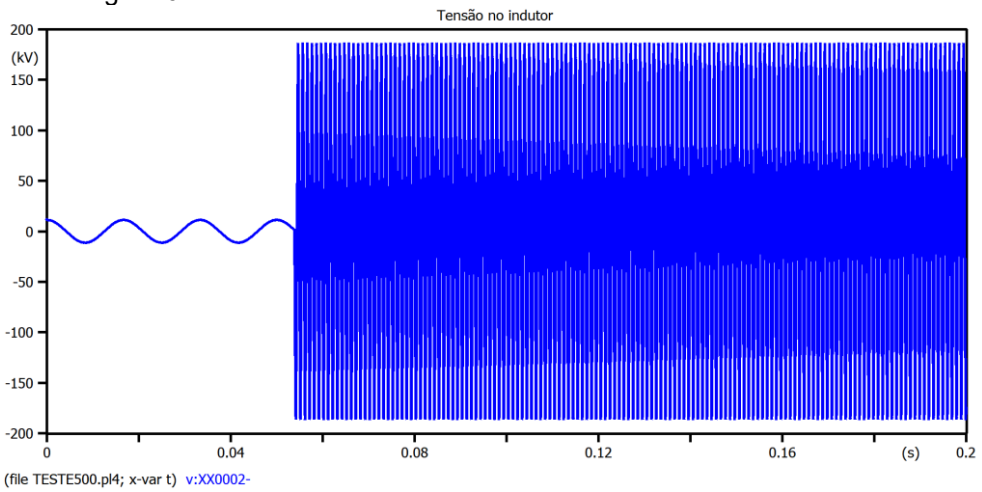
em que Icorte é a corrente no instante do corte (A). O valor previsto foi de 186,83 kV, e a simulação resultou em 185,4 kV (Figura 6), desvio de −0,77%. Como o reator foi modelado sem perdas, não se aplicou o fator de amortecimento usado para núcleos reais, o que abre espaço para discutir a influência das perdas no resultado.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Figura 6. Tensão no reator no momento do corte da corrente indutiva.



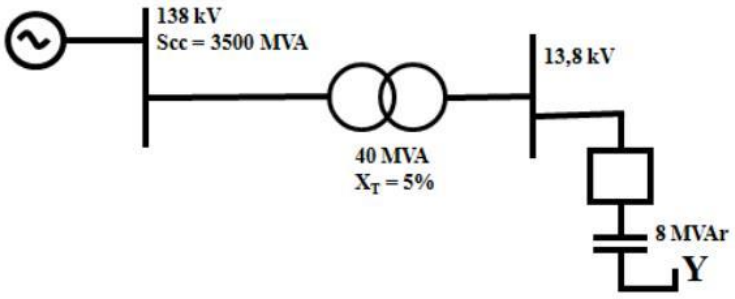
Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

A Figura 6 evidencia a mudança de regime no instante do corte. Antes dele, a tensão no reator acompanha a frequência da rede; depois, passa a oscilar na frequência natural do conjunto formado pelo reator e pela capacitância, com amplitude próxima de 185 kV. Como o modelo não tem perdas, essa oscilação não se amortece.

4.5 Energização de banco de capacitores

A Figura 7 apresenta o sistema estudado nesta atividade, e a Figura 8, o circuito equivalente montado no ATP a partir dele.

Figura 7. Sistema elétrico estudado na energização do banco de capacitores.



Fonte: Elaborada pelos autores.

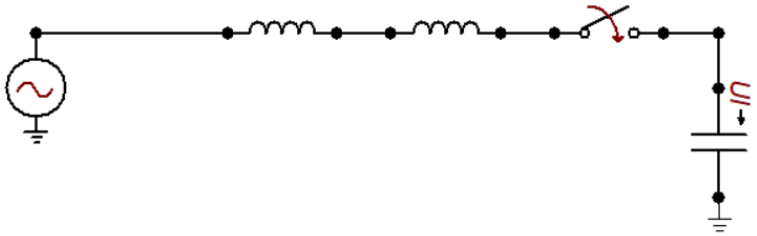
O sistema da Figura 7 é formado por uma rede de 138 kV com potência de curto-circuito de 3500 MVA, um transformador de 40 MVA com reatância de 5% e um banco de capacitores de 8 Mvar ligado na barra de 13,8 kV. É a partir desses dados de placa que se calculam as indutâncias e a capacitância do modelo.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Figura 8. Circuito equivalente da energização do banco de capacitores no ATP.

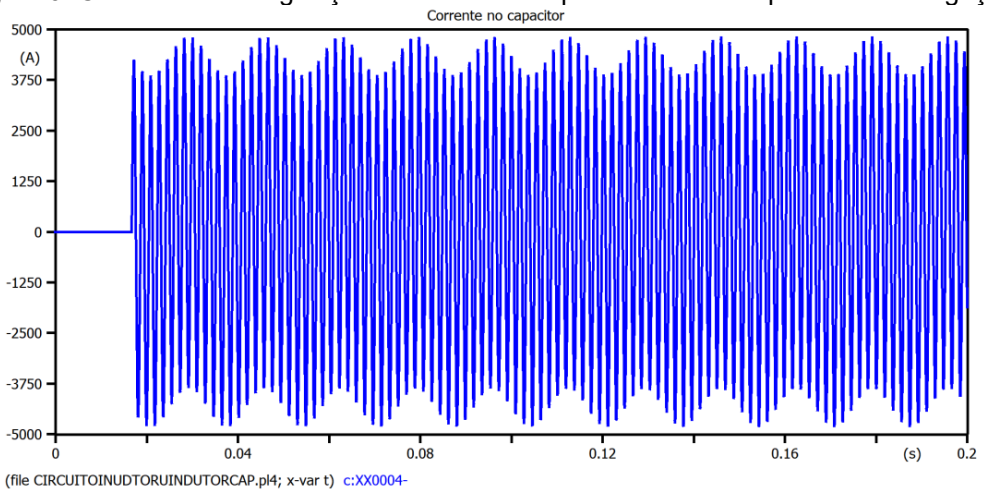


Fonte: Elaborada pelos autores no ATPDraw.

Na Figura 8, a rede e o transformador são representados por indutâncias em série, de 0,144 mH e 0,631 mH, e o banco, por uma capacitância de 111 μF, conectada por uma chave que fecha no pico da tensão. A redução a um circuito monofásico equivalente é o que permite comparar diretamente a simulação com a Equação (3).

Em um sistema de 13,8 kV com banco de 8 Mvar (C = 111 μF) e indutância equivalente de 0,77 mH, a Equação (3) prevê pico de 4278 A a 544,4 Hz, cerca de nove vezes a corrente nominal de pico do banco, de 473 A. A simulação, com fechamento no pico da tensão, resultou em 4212,5 A a 543,5 Hz (Figura 9).

Figura 9. Corrente de energização do banco de capacitores sem dispositivo de mitigação.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Na Figura 9, destaca-se o primeiro pico de corrente, cerca de nove vezes maior que a corrente nominal de pico do banco, e a oscilação em torno de 543 Hz, que se mantém por falta de resistência no modelo.

Duas formas de mitigação foram testadas. A primeira foi um resistor de 0,3 Ω em série. Para uma resistência pequena diante de $\sqrt{(L/C)}$, a oscilação passa a ser amortecida com constante de tempo τ_a, e o primeiro pico, que ocorre um quarto de período após o fechamento, pode ser estimado por:

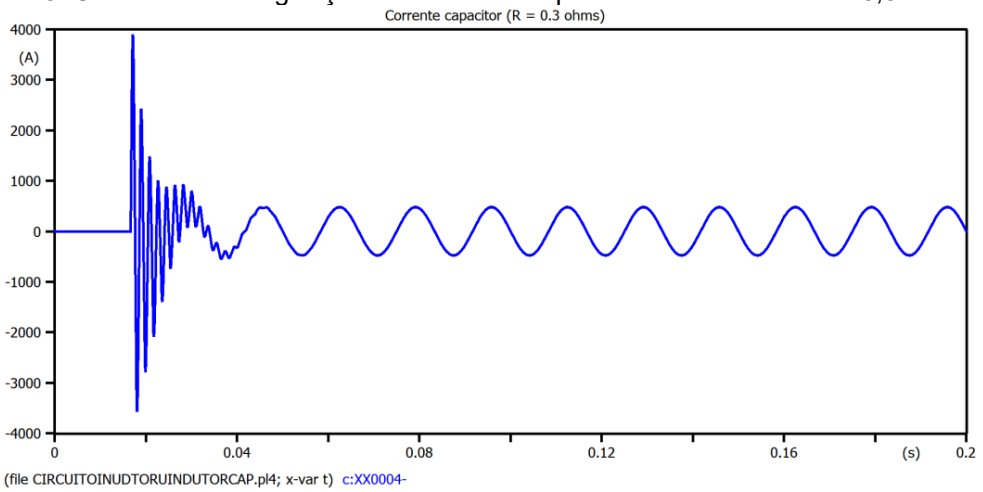
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

$$I_{\text{pico},R} \approx I_{\text{pico}}\, e^{-\frac{R T_0}{8L}}, \qquad \tau_a = \frac{2L}{R} \tag{8}$$

em que Ipico é o pico sem resistor e τ_a é a constante de tempo de amortecimento. Com R = 0,3 Ω, L = 0,77 mH e T_0 = 1,84 ms, a estimativa é de cerca de 3912 A, redução de aproximadamente 9% em relação ao caso sem resistor, e $\tau_a \approx$ 5,1 ms. A leitura gráfica da simulação indicou primeiro pico próximo de 3,9 kA, e a oscilação praticamente se extingue cerca de 20 ms após o fechamento, isto é, em aproximadamente quatro constantes de tempo (Figura 10).

Figura 10. Corrente de energização do banco de capacitores com resistor de 0,3 Ω em série.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Comparando a Figura 10 com a Figura 9, percebe-se que o primeiro pico é apenas ligeiramente menor, enquanto a oscilação, que antes se mantinha, desaparece em pouco mais de um ciclo da rede. A segunda forma de mitigação foi um reator limitador, dimensionado pela expressão abaixo para restringir o pico a 5 pu:

$$I_{\text{pico}} = \frac{V_m - V_0}{\sqrt{(L+\Delta L)/C}} \tag{9}$$

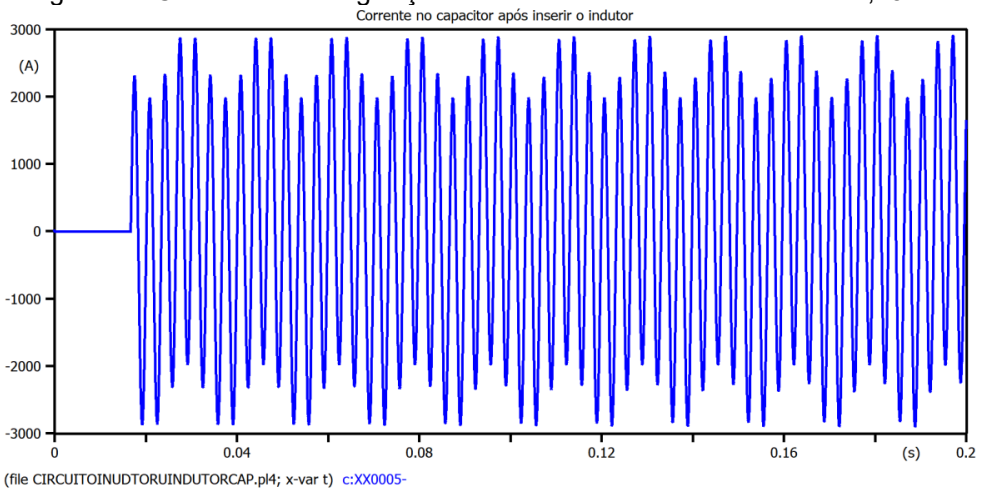
em que ΔL é a indutância adicional (H) e V_0 é a tensão inicial do banco, nula neste caso. O resultado foi ΔL = 1,75 mH, e a simulação mostrou pico de cerca de 2300 A, ou 4,85 pu (Figura 11), redução de aproximadamente 45% em relação ao caso sem mitigação.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Figura 11. Corrente de energização do banco com reator limitador de 1,75 mH.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Comparando a Figura 11 com a Figura 9, percebe-se que o reator limitador reduziu o pico de corrente praticamente à metade e também diminuiu a frequência de oscilação, já que a indutância total do circuito aumentou.

Nos parâmetros testados, portanto, o efeito predominante do resistor foi o amortecimento, com redução de cerca de 9% no primeiro pico, e o efeito predominante do reator foi a limitação da amplitude, com redução de cerca de 45%. Essa distinção vale para a configuração estudada e não deve ser generalizada: resistências maiores também reduzem o pico, e o reator também altera a frequência e a duração do transitório.

4.6 Bancos de capacitores em vários estágios

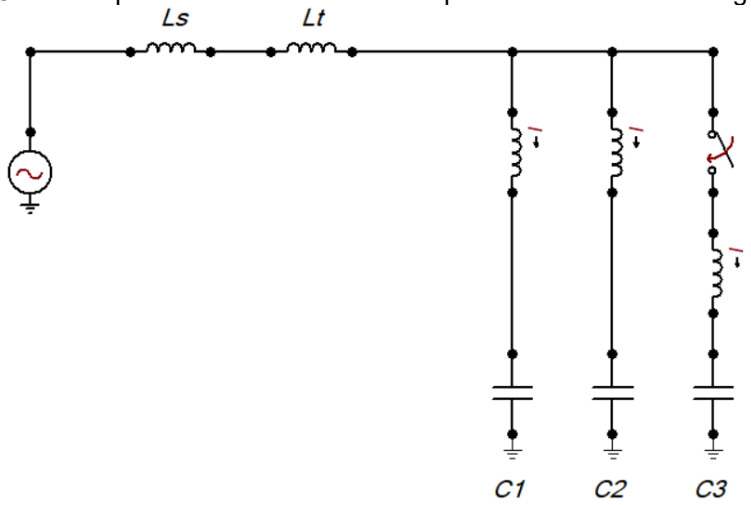
Nesta atividade, um terceiro banco é energizado com outros dois já em operação na mesma barra. A Figura 12 mostra o circuito equivalente montado no ATP para esse caso.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Figura 12. Circuito equivalente dos bancos de capacitores em vários estágios no ATP.



Fonte: Elaborada pelos autores no ATPDraw.

Na Figura 12, a rede e o transformador aparecem como as indutâncias L_s e L_t, e cada um dos três bancos tem sua própria chave temporizada, o que permite energizar os bancos 1 e 2 antes de fechar o banco 3. Os indutores em série com cada banco representam a ligação entre eles e limitam a corrente que um banco já energizado injeta no outro.

Na análise, cada fonte de corrente transitória para o banco 3 foi tratada como um circuito LC independente: a contribuição da rede, com pico de 2347,42 A a 477 Hz, e as contribuições dos bancos 1 e 2, com 1401,44 A a 427 Hz e 1328,73 A a 540 Hz. Simuladas separadamente, essas contribuições apresentaram desvios entre +0,51% e +3,82% (Tabela 3). É preciso distinguir duas formas de combiná-las. A soma das amplitudes individuais é 5077,59 A. Já a soma temporal das três senoides, todas iniciando no instante do fechamento, calculada numericamente, atinge máximo de cerca de 5031 A, pouco abaixo da soma das amplitudes porque as três frequências são diferentes. A simulação do circuito completo, porém, resultou em pico de cerca de 2496 A no banco 3 (Figura 13).

A diferença entre cerca de 5031 A e 2496 A decorre principalmente da hipótese de independência dos ramos. No circuito real, as três fontes de corrente compartilham o mesmo banco 3 e interagem entre si, de modo que o circuito acoplado tem modos naturais próprios, que não coincidem com as três oscilações calculadas separadamente. A superposição analítica, nesse caso, não descreve a resposta do circuito completo. No cenário estudado, ela forneceu uma estimativa cerca de duas

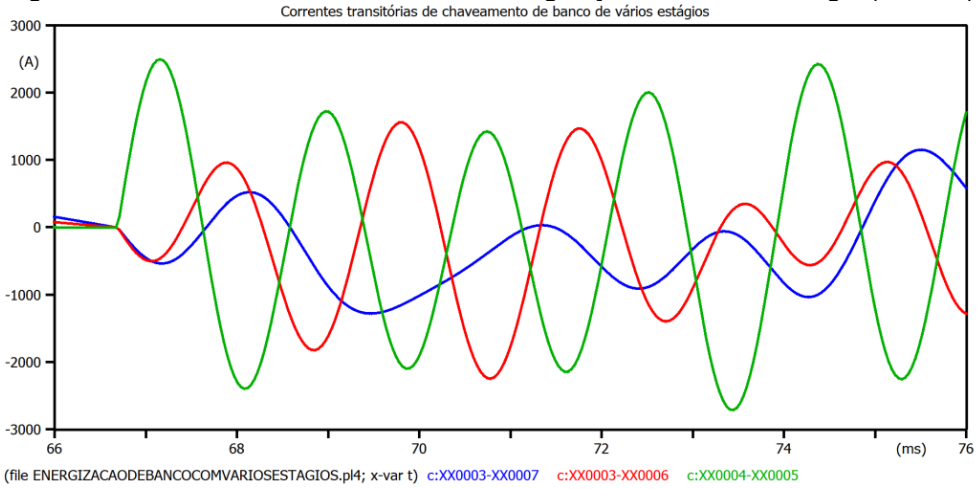
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

vezes maior que o valor simulado; este trabalho, entretanto, não demonstra que essa soma seja um limite superior garantido para outras configurações, e seu uso em dimensionamento exigiria fundamentação adicional.

Figura 13. Correntes nos três bancos na energização do terceiro estágio (detalhe).



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Na Figura 13, a curva verde corresponde à corrente no banco 3, que está sendo energizado, com pico de cerca de 2496 A, e as curvas azul e vermelha correspondem às correntes nos bancos 1 e 2, que cedem parte de sua energia ao banco 3. A figura mostra a resposta do circuito acoplado e permite comparar seu pico com a estimativa obtida pela superposição de ramos independentes.

4.7 Abertura com reignição e energização de transformador

Na abertura de um banco de capacitores, a corrente é interrompida em seu zero, que coincide com o pico de tensão, e o capacitor fica carregado com $-V_m$. Meio ciclo depois, a tensão da fonte atinge $+V_m$, e a diferença de $2V_m$ entre os contatos pode provocar uma reignição. A tensão no capacitor é contínua no instante da reignição e, a partir dele, evolui de forma rápida e oscilatória em torno da tensão da fonte, segundo:

$$v_C(t) = V_m - [V_m - v_C(0)]\cos(\omega_0 t) \quad (10)$$

em que vC(0) é a tensão no capacitor no instante da reignição e $\omega_0 = 2\pi f_0$. Admitindo a fonte constante durante a oscilação, a tensão atinge $+3V_m$ meio período natural após a reignição. Se a corrente for novamente interrompida nesse instante, uma segunda reignição, meio ciclo da rede depois, levaria a tensão a $-5V_m$.

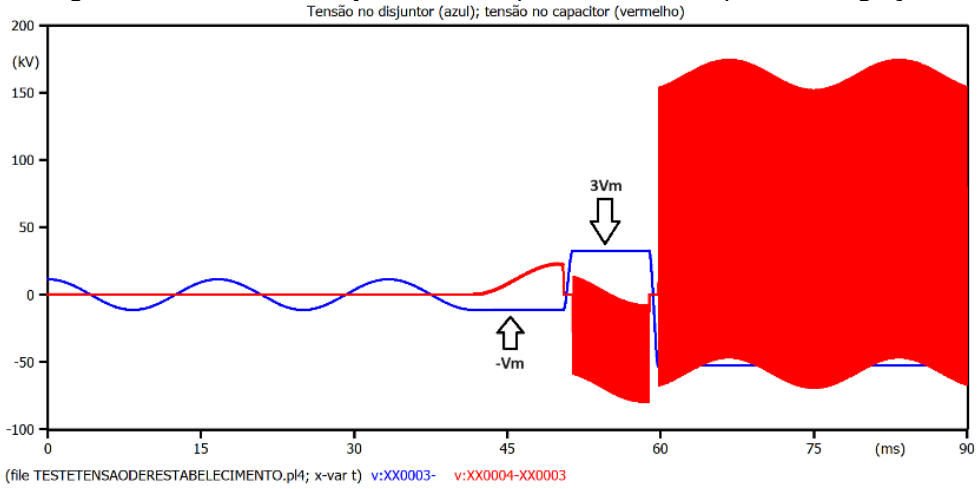
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Na simulação, a primeira chave abriu em 41,65 ms, no pico negativo da tensão, e as reignições foram representadas por duas chaves em paralelo, que conduziram de 49,94 a 50,44 ms e de 58,31 a 58,81 ms. A Figura 14 mostra a primeira reignição: a tensão residual foi de −11406 V, e a tensão no capacitor evoluiu continuamente até 32365 V. Na segunda reignição, registrada na mesma simulação, a tensão atingiu −52576 V. Os valores previstos eram −11267,65 V, 33802,95 V e −56338,25 V.

Figura 14. Tensões no disjuntor e no capacitor durante a primeira reignição.



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de simulação no ATP.

Na Figura 14, a curva azul representa a tensão no disjuntor e a curva vermelha, a tensão no capacitor. Observa-se que a tensão no capacitor não apresenta descontinuidade no instante da reignição: ela parte do valor residual negativo e oscila rapidamente até um extremo positivo próximo de $3V_m$, de onde passa a ser o novo valor inicial para o evento seguinte.

O módulo do desvio cresce a cada evento (1,2%, 4,3% e 6,7%). Este trabalho não isolou a causa desse crescimento, e as explicações a seguir são hipóteses a verificar. A primeira é a elevação da tensão em regime no capacitor de um circuito LC série alimentado em 60 Hz, que o modelo analítico ignora ao adotar V_m como tensão residual e que pode explicar o desvio inicial de +1,2%. A segunda é a hipótese de fonte constante durante a oscilação, já que a tensão da rede continua variando enquanto o capacitor oscila. A terceira é a duração de 0,5 ms adotada para cada condução, que pode não coincidir com o meio período natural do circuito, interrompendo a oscilação antes ou depois do extremo. Como cada evento parte do resultado do anterior, essas diferenças tendem a se propagar. Para verificá-las, seria

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

necessário registrar as tensões e correntes imediatamente antes de cada evento e repetir a simulação variando os instantes de condução e o passo de integração.

Por fim, na energização do transformador de 30 kVA, 13,8/0,38 kV, descrito na Tabela 2, a simulação mostrou o deslocamento do fluxo no núcleo por componente contínua positiva ou negativa, conforme o ângulo de fechamento e o fluxo residual. Para uma tensão aplicada v(t) = V_m sen(ωt + θ), em que θ é o ângulo da tensão no instante do fechamento, e desprezando a queda de tensão no enrolamento primário, o fluxo é dado por:

$$\phi(t) = -\Phi_m \cos(\omega t + \theta) + \Phi_m \cos\theta + \Phi(0), \quad \Phi_m = \frac{V_m}{N_1\,\omega} \tag{11}$$

em que N_1 é o número de espiras do primário e Φ(0) é o fluxo residual. A componente contínua do fluxo é Φ_m cos θ + Φ(0), e se anula quando Φ_m cos θ = −Φ(0). Essa condição indica o ângulo em que um disjuntor síncrono deve fechar para que o fluxo entre diretamente em regime. Os resultados desta atividade se limitam ao fluxo: a corrente de energização não foi quantificada. A redução dessa corrente é uma consequência esperada pela teoria, já que o deslocamento do fluxo leva o núcleo à saturação, mas sua magnitude depende do modelo de magnetização e não foi verificada aqui. A atividade fecha a sequência retomando o princípio de chaveamento controlado visto na energização do reator.

4.8 Síntese da concordância

A Tabela 3 reúne as quinze grandezas comparadas. Em doze delas o módulo do desvio ficou abaixo de 2%, e os três maiores desvios concentram-se nas situações em que o modelo analítico mais simplifica: a contribuição de um banco para outro, com interação entre ramos, e as reignições sucessivas, em que cada evento parte do resultado do anterior.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Tabela 3. Comparação entre valores analíticos e simulados no ATP.

Ativ.	Grandeza	Analítico	Simulado	δ
1	f_0 (circuito LC)	3355,28 Hz	3338,89 Hz	−0,49%
3	TRV	225 kV	226,39 kV	+0,62%
3	RRRV	11,2 kV/μs	11,32 kV/μs	+1,07%
4	Sobretensão de corte	186,83 kV	185,4 kV	−0,77%
5	Pico de corrente	4278,08 A	4212,5 A	−1,53%
5	f_0	544,44 Hz	543,47 Hz	−0,18%
6	Pico, rede → banco 3	2347,42 A	2316 A	−1,34%
6	f_0, rede → banco 3	477 Hz	473,93 Hz	−0,64%
6	Pico, banco 1 → banco 3	1401,44 A	1455 A	+3,82%
6	f_0, banco 1 → banco 3	427 Hz	429,18 Hz	+0,51%
6	Pico, banco 2 → banco 3	1328,73 A	1347 A	+1,37%
6	f_0, banco 2 → banco 3	540 Hz	543,47 Hz	+0,64%
7	Tensão residual ($-V_m$)	−11267,65 V	−11406 V	+1,23%
7	1ª reignição ($+3V_m$)	33802,95 V	32365 V	−4,25%
7	2ª reignição ($-5V_m$)	−56338,25 V	−52576 V	−6,68%

Fonte: Elaborada pelos autores. δ calculado pela Equação (5), sobre os módulos das grandezas.

Na Tabela 3, nota-se que os desvios nas frequências de oscilação são sistematicamente menores que os desvios nas amplitudes, todos abaixo de 0,7% em módulo. Isso indica que a frequência natural, que depende apenas de L e C, é a grandeza mais robusta do modelo, enquanto as amplitudes são mais sensíveis ao instante da manobra e às interações entre os ramos.

4.9 Discussão didática

Os resultados quantitativos deste trabalho caracterizam a concordância entre cálculo e simulação nos modelos adotados. As observações a seguir são de outra natureza: correspondem às percepções do autor durante a resolução e indicam o potencial didático da proposta, sem constituir evidência de ganho de aprendizagem. Nessa perspectiva, as divergências mostraram-se tão relevantes quanto as concordâncias, pois exigiram explicar por que teoria e simulação diferiam. Destacam-se cinco aspectos:

a) o passo de integração torna-se conteúdo, pois sua escolha obriga a estimar a dinâmica do circuito antes de simular;

b) a leitura gráfica liga a forma de onda ao parâmetro físico, em vez de tratar o gráfico como ilustração;

c) os limites dos modelos ficam visíveis, como na diferença entre a superposição analítica e o circuito completo na atividade 6 e no desvio crescente das reignições;

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

d) os dispositivos de mitigação são dimensionados pela teoria e testados na simulação, o que aproxima a atividade da prática de projeto;

e) os circuitos sem perdas exigem leitura crítica, pois as oscilações persistentes levam à discussão sobre modelagem de perdas.

Como limitações, o relato baseia-se na resolução individual das atividades por um único estudante de pós-graduação, sem avaliação formal da aprendizagem; os valores simulados foram obtidos por leitura gráfica, sem repetição com passo menor; e parte das configurações das atividades 7 e 8 não foi registrada. A aplicação da sequência em turmas, com instrumentos de avaliação antes e depois das atividades, e a documentação completa dos arquivos de simulação são os próximos passos naturais.

5. Conclusão

A sequência de oito atividades mostrou que, nos modelos adotados, a simulação no ATP reproduz os resultados analíticos de transitórios de chaveamento com módulo de desvio abaixo de 2% em 12 das 15 grandezas comparadas. Esse resultado caracteriza a concordância entre cálculo e simulação, e não a validação de equipamentos reais. O roteiro de três leituras, analítica, simulada e gráfica, é simples de replicar e transforma a simulação em parte do raciocínio, e não em ilustração final.

Os casos de maior desvio, como a superposição de contribuições na energização de bancos em vários estágios e as reignições sucessivas, explicitaram hipóteses dos modelos simplificados e, por isso, têm potencial para estimular a discussão em sala. Como não houve avaliação formal da aprendizagem, esse benefício é apresentado como potencial da proposta. Recomenda-se que professores que adotem o simulador proponham explicitamente o confronto numérico, peçam ao estudante que justifique cada diferença encontrada e, em aplicações futuras, avaliem formalmente o efeito da sequência.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores Helder de Paula e José Carlos de Oliveira, responsáveis pela disciplina de Transitórios Eletromagnéticos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, que propuseram as atividades relatadas neste trabalho.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol:
DOI:
Pages: 1-23

Referências

D'Ajuz, Ary, *et al. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potência de alta tensão*. Furnas / EDUFF, 1987.

Greenwood, Allan. *Electrical Transients in Power Systems*. 2nd ed., Wiley, 1991.

Leuven EMTP Center. *ATP: Alternative Transients Program Rule Book*. LEC, 1987.

Perez, Pierry de Freitas, *et al.* "A simulação como ferramenta de aprendizagem." *Anais do XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, ABENGE, 2017.

Perin, Ana Carina Coninch, e Vitor Fernando Couto. "Uso do software ATPDraw no estudo de transitórios eletromagnéticos." *Unoesc & Ciência: ACET*, vol. 6, n. 2, 2015, pp. 247-252.

CC BY