



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciência

Faculdade de Engenharia

Leonardo Moizinho Pinheiro


**Religamento monopolar: métodos de extinção do arco
secundário**

Rio de Janeiro

2018

Leonardo Moizinho Pinheiro

Religamento monopolar: métodos de extinção do arco secundário



Monografia apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel, à Faculdade de Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Linhas de transmissão.

Orientador: Prof. Dsc. Otto Wanner Ganvini Asencios

Rio de Janeiro

2018

Leonardo Moizinho Pinheiro

Religamento monopolar: métodos de extinção do arco secundário

Monografia apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel, à Faculdade de Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Linhas de transmissão.

Aprovada em 21 de março de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dsc. Otto Wanner Ganvini Asencios (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Sergio León Escalante Cárdenas
Faculdade de Engenharia - UERJ

Paulo Cesar de Almeida
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2018

RESUMO

PINHEIRO, L. M. *Religamento monopolar: métodos de extinção do arco secundário*. 2018. 57 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Esse projeto tem como objetivo a simulação de curto circuito monofásico, considerando os efeitos do arco secundário. Com a evolução da computação, muitos programas surgiram para auxiliar nos cálculos complexos que são característicos de um sistema de potência. Dentre esses, o ATP (*Alternative transients program*) se destaca por sua robustez e flexibilidade no cálculo dos transitórios eletromagnéticos. Esse projeto aborda todo o procedimento necessário para o ajuste o fluxo de potência do sistema no ATP, assim como dos equipamentos utilizados, como geradores, transformadores e linhas de transmissão. Nesse projeto foram modelados dois sistemas, um sistema teórico de 230 kV, a partir de seus diagramas de impedância e fluxo, e um sistema de 500 kV, cuja linha foi modelada a partir de seus dados físicos no próprio ATP. Nesses sistemas, foram implementados métodos de redução do arco secundário, que são características desse tipo de manobra. São mostrados dois métodos de redução de arco secundário: as chaves de aterramento rápido, e compensadores reativos em derivação.

Palavras-chave: ATP. ATPDraw. Religamento monopolar. Arco Secundário.

ABSTRACT

PINHEIRO, L. M. *Monopolar reclosing: secondary arc extinction methods*. 2018. 57 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

This project's objective is the simulation of single-phase short circuit, considering the effects of the secondary arc. With the evolution of computing, many software has emerged to aid in the complex calculations that are characteristic of a power system. Among these, the ATP stands out for its robustness and flexibility in the calculation of electromagnetic transients. This project addresses the whole process of adjusting the power flow of the system on ATP, as well as the equipments, such as generators, transformers and transmission lines. In this project, two systems were modeled, a theoretical system of 230 kV, from its impedance and flow diagrams, and a 500 kV system, whose line was modeled from its physical data using the ATP itself. In these systems, secondary arc reduction methods were implemented, which are characteristics of this type of maneuver. Two methods of secondary arc reduction are demonstrated: high speed grounding switches, and shunt reactive compensators.

Keywords: ATP. ATPDraw. Monopolar reclosing. Secondary Arc.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema temporal do religamento automático	14
Figura 2 - Impedâncias e admitâncias da linha trifásica	15
Figura 3 - Acoplamento capacitivo da linha	15
Figura 4 - Tensão equivalente de Thevenin	16
Figura 5 - Circuito capacitivo equivalente de Thevenin	17
Figura 6 - Acoplamento indutivo de uma linha trifásica	18
Figura 7 - Circuito indutivo durante a abertura da fase C	19
Figura 8 - Linha de transmissão com HSGS	20
Figura 9 - Linha de transmissão com reatores em derivação	21
Figura 10 - Tela inicial do ATPDraw	23
Figura 11 - Diagrama de impedância do sistema, na base de 100 MVA	25
Figura 12 - Diagrama de fluxo de potência do sistema(em MW e MVar)	25
Figura 13 - Fluxo de potência do sistema no programa Anarede	26
Figura 14 - Implementação do sistema de 9 barras no ATP	27
Figura 15 - Configuração inicial do ATP	28
Figura 16 - Entrada de dados da Linha 4-5	30
Figura 17 - Entrada de dados do Transformador 1	31
Figura 18 - Entrada de dados do Gerador 1	32
Figura 19 - Entrada de dados da Carga A	34
Figura 20 - Sistema de 230 kV com as chaves de aterramento	36
Figura 21 - Corrente de curto e o arco secundário	36
Figura 22 - Corrente na chave de aterramento da fase C, barramento 7	37
Figura 23 - Corrente na chave de aterramento da fase C, barramento 8	37
Figura 24 - Valor eficaz da corrente no ponto de falta	38
Figura 25 - Potência ativa e reativa dos geradores no tempo	39
Figura 26 - Sistema de 500kV	40
Figura 27 - Diagrama de dados da torre da linha de 500 kV	41
Figura 28 - Rotina <i>Line Constants</i>	42
Figura 29 - Entrada de dados da torre	42
Figura 30 - Impedâncias e admitâncias da linha de 500 kV	43
Figura 31 - Caso 1 - Comportamento da corrente de falta sem esquema de redução de arco.	45
Figura 32 - Caso 2 - Comportamento da corrente de falta, com a utilização dos HSGS	45
Figura 33 - Caso 3 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 30%	46
Figura 34 - Caso 4 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 30% da linha e reator de neutro $X_n = 7.28k \Omega$	46

Figura 35 - Caso 5 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 50% da linha	47
Figura 36 - Caso 6 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 50% da linha e reator de neutro $X_n = 506.07 \Omega$	47

LISTA DE TABELAS

Tabela	1 - Incidência de faltas em linhas aéreas trifásicas	11
Tabela	2 - Parâmetros das linhas de transmissão	29
Tabela	3 - Parâmetros dos transformadores	31
Tabela	4 - Parâmetros dos geradores	32
Tabela	5 - Parâmetros das cargas	33
Tabela	6 - Comparativo entre o fluxo teórico e fluxo medido	35
Tabela	7 - Valor da corrente eficaz de arco, de acordo com o método de extinção utilizado, no sistema de 500 kV	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACSR	<i>Aluminium conductor steel reinforced</i>
ATP	<i>Alternative transients program</i>
ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
EAT	Extra alta tensão
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
HSGS	<i>High speed grounding switch</i>

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	10
1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
1.1	Religamento	13
1.2	Arco secundário	14
1.2.1	<u>Acoplamento capacitivo</u>	14
1.2.2	<u>Acoplamento indutivo</u>	18
1.3	MÉTODOS DE REDUÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO	20
1.3.1	<u>Chaves de aterramento rápido</u>	20
1.3.2	<u>Compensador reativo</u>	21
1.4	Introdução ao ATP	22
2	MODELAGEM E SIMULAÇÕES	24
2.1	Sistema de 9 barras de 230 kV	24
2.1.1	<u>Configuração inicial do ATPDraw</u>	26
2.1.2	<u>Dimensionamento das linhas de transmissão</u>	29
2.1.3	<u>Dimensionamento dos transformadores</u>	30
2.1.4	<u>Dimensionamento dos geradores</u>	32
2.1.5	<u>Dimensionamento das cargas</u>	33
2.1.6	<u>Método de aterramento rápido</u>	35
2.2	Sistema de 2 barras de 500 kV	40
2.2.1	<u>Modelagem da linha de transmissão</u>	40
2.2.2	<u>Dimensionamento dos reatores</u>	43
2.2.3	<u>Métodos de aterramento rápido/compensadores reativos</u>	44
3	DISCUSSÃO	48
	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXO A – Memória de cálculo	52
	ANEXO B – Dados da linha de 500 kV	57

INTRODUÇÃO

Os fenômenos transitórios no sistema elétrico podem ser causadas por súbitas mudanças nas condições de operação e na configuração do sistema. Eles podem ser causados por curto circuitos, operações de chaveamento, descargas atmosféricas ou variações súbitas na carga.

Alguns critérios podem ser utilizados para se classificarem os transitórios. Eles são:

- De acordo com a sua origem, as perturbações podem ser externas (descargas atmosféricas) ou internas (curto-circuito, operações de chaveamento, variações de carga)
- De acordo com a natureza do fenômeno físico, os transitórios podem ser eletromecânicos ou eletromagnéticos.

Estes fenômenos irão estressar o sistema elétrico através de sobretensões e sobrecorrentes. As sobrecorrentes podem causar danos aos equipamentos devido à dissipação excessiva de calor por efeito Joule. Já as sobretensões podem causar a ruptura do isolamento dos equipamentos. A proteção contra a sobretensão é alcançada escolhendo-se um nível de isolamento ideal para o equipamento ou a instalação de dispositivos que reduzam o stress causado pela sobretensão. E a proteção contra sobrecorrentes é conseguida desconectando se o ponto de falta do restante do sistema, separando-se o mínimo de equipamentos possível através de seletividade. Para se conseguir a proteção adequada contra os dois tipos de falta, é fundamental conhecer a origem da falta, estimar os piores casos e calcular os transitórios que estes produzem.(GOMEZ-ESPOSITO; CONEJO; CANIZARES, 2009)

Devido a complexidade do sistema elétrico, a precisão dos cálculos se torna uma tarefa muito complicada. A solução da maioria dos transitórios não é facilmente alcançada através de cálculos manuais, mesmo para sistemas pequenos. Em alguns casos, um circuito equivalente de um sistema pode ser drasticamente reduzido e se obter uma equação de fácil solução. Porém, para a maioria dos transitórios, uma solução precisa, ou mesmo uma solução aproximada só pode ser obtida utilizando se ferramentas computacionais. Uma das razões para se utilizar um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos é que apesar dos sistemas elétricos operarem em regime permanente a maior parte do tempo, eles devem ser projetados para suportar as piores condições a que podem ser submetidos. Estas condições extremas são normalmente encontradas durante situações transitórias dos sistemas. Em consequência, o projeto de um sistema de potência é determinado mais pelas condições transitórias do que pelo seu comportamento em regime permanente.(D'AJUZ, 1987)

Objetivos

A ocorrência de um defeito em uma linha é resolvido com o desligamento, desenergização e religamento (automático ou não) das três fases, ou apenas da fase atingida. No defeito monofásico, existe a possibilidade da manobra ser realizada apenas desenergizando a fase defeituosa.

O objetivo desse é validar a manobra monopolar em linhas de transmissão. Essa análise foi realizada em, dois sistemas elétricos distintos: um sistema modelado a partir dos dados do seu diagrama de impedância e de fluxo de potência, e um sistema um sistema modelado a partir do diagrama da torre de uma linha de transmissão .

Nesses sistemas, são simulados o curto monofásico e aplicados métodos de extinção do arco secundário: as chaves de aterramento rápido e compensadores reativos em derivação.

Motivação

O curto circuito monofásico é o defeito que tem maior ocorrência em linhas de transmissão. A tabela 1 mostra dados de porcentagem de tipo de defeito para alguns níveis de tensão.

Tabela 1 - Incidência de faltas em linhas aéreas trifásicas

	Bonneville Power Administration	Swedish State Power Board	
	500 kV	400 kV	200 kV
Faltas monofásicas para a terra	93%	70%	56%
Faltas bifásicas	4%	23%	27%
Faltas bifásicas para a terra	2%		
Faltas trifásicas	1%	7%	17%

Fonte: (NYLÉN, 1976)

Devido a alta porcentagem dos defeitos em linhas de transmissão serem monofásicos, o estudo do religamento apenas do pólo defeituoso se torna interessante, pois é possível que se faça a extinção do defeito sem que haja perda de grande parte da potência suprida pela linha em falta.

Ao contrário de técnicas atuais de extinção de defeitos, onde todas as 3 fases são abertas, independente do tipo de defeito, com o objetivo de minimizar os distúrbios resultantes de uma abertura tripolar e especialmente a perda de sincronismo, é desejável abrir apenas o disjuntor da fase sob falta, e efetuar seu religamento no menor intervalo de tempo possível.

Estrutura

Na parte teórica, apresenta-se os fundamentos básicos a respeito do religamento monopolar, e a teoria sobre o arco secundário. Em seguida, mostra-se uma breve introdução ao ATP.

Na parte experimental, apresenta-se o uso da ferramenta auxiliar para se implementar um sistema de 9 barras, usando o diagrama de impedância e de fluxo, e de um sistema equivalente usando um modelo real de uma linha de transmissão. Também são demonstrados dois métodos de extinção do arco secundário, o uso de chaves de aterramento rápido (HSGS) e a compensação reativa em derivação.

No Anexo A, está incluída a memória de cálculo referente a todo o projeto. No Anexo B estão os dados da linha de 500 kV.

1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Religamento

O curto monofásico é o tipo de falta predominante em todo o tipo de linha. Essa predominância é maior quando se trata de linhas de alta tensão, devido ao grande espaço entre os condutores, que previne alguns dos defeitos bifásicos e trifásicos. Portanto, o religamento monopolar é utilizado para aumentar a estabilidade do sistema, manter a transferência de potência, e não perder disponibilidade da linha.

Após a detecção da falta pelo sistema de proteção, os réles atuarão, abrindo os disjuntores da fase com defeito. No entanto, as fases sem falta permanecerão energizadas. Existe acoplamento indutivo e capacitivo entre fase em falta e as fases saudáveis, assim como os outros condutores em circuitos paralelos (como por exemplo, em linhas de circuitos duplos).

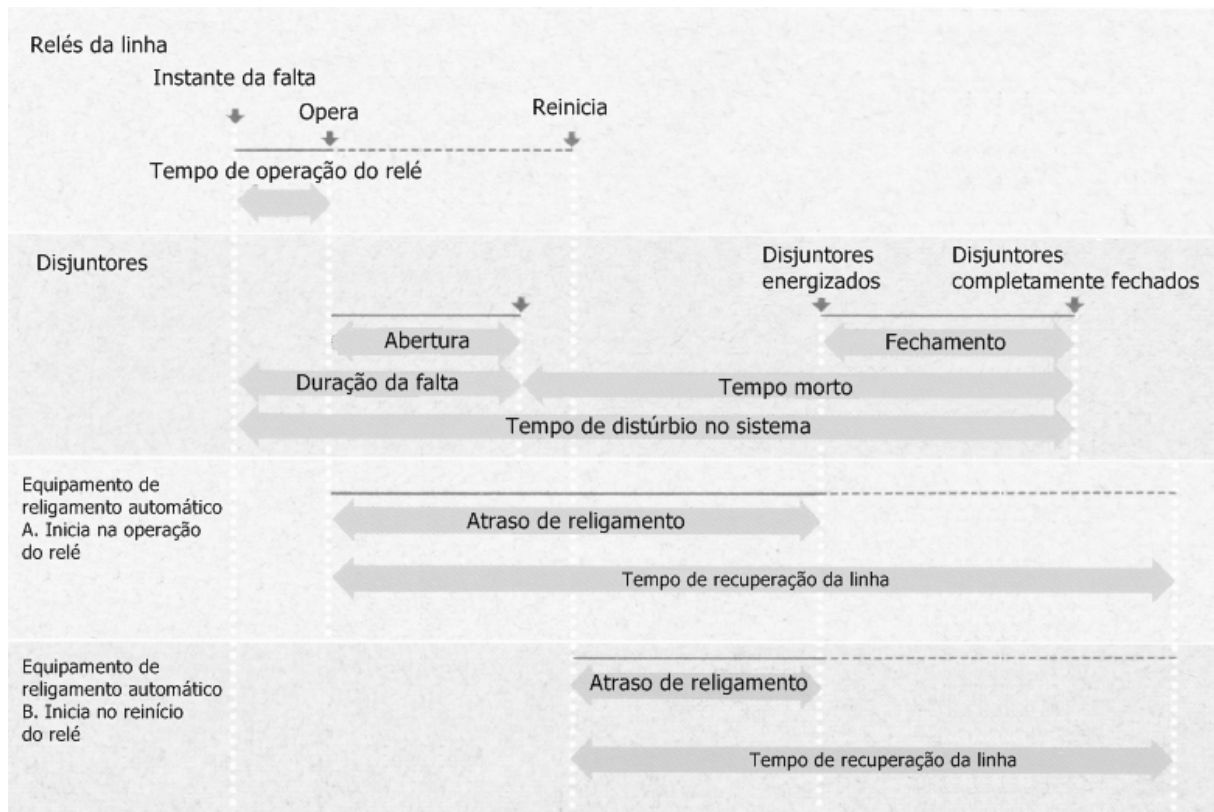
O religamento monopolar automático só será feito com sucesso se o arco secundário estiver totalmente extinto no momento que os disjuntores são fechados. O tempo requerido para a deionização do caminho da falta depende de diversos fatores, incluindo a duração da falta, a magnitude da corrente, condições do vento, umidade do ar, pressão atmosférica, tensão do circuito, acoplamento capacitivo em relação aos condutores adjacentes, dentre outros. Dentre esses, a tensão é o fator que tem maior influência sobre o tempo de deionização.

A corrente de arco secundário podem subir até dezenas de ampéres e tendem a se extinguir em alguns milissegundos, porém correntes que chegam a 100 ampéres podem durar mais que um segundo.(SMEETS et al., 2015)

Devido a existência do arco secundário, o religamento irá requisitar um tempo de desconexão completa da linha sob falta com o restante do sistema. Esse tempo é chamado de tempo morto, e ele deve ser maior que o tempo de deionização completa do arco, para garantir um religamento sem falta.

Na figura 1, mostra-se um esquema de evolução da falta no tempo, até o religamento com sucesso.

Figura 1 - Esquema temporal do religamento automático



Fonte: Adaptado de (NYLÉN, 1976)

1.2 Arco secundário

Numa linha trifásica, podemos calcular o arco secundário considerando as indutâncias próprias e mútuas, e as capacitâncias de sequência zero. Como as fases estão próximas, devemos considerar as reatâncias e capacitâncias mútuas. O acoplamento eletromagnético é demonstrado na figura 2.

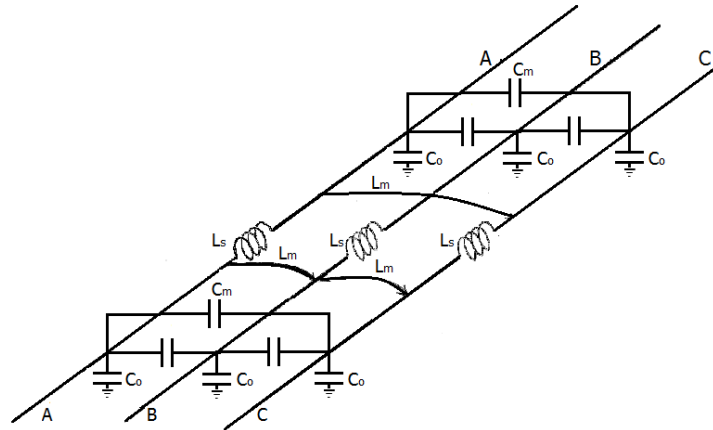
Para simplificar os cálculos referentes ao arco secundário, trata-se separadamente os acoplamentos capacitivo e indutivo.

1.2.1 Acoplamento capacitivo

Usando o teorema de Thévenin, podemos montar o modelo capacitivo da linha, desprezando-se a impedância em série e o acoplamento indutivo. Dessa forma, temos o circuito capacitivo da linha.

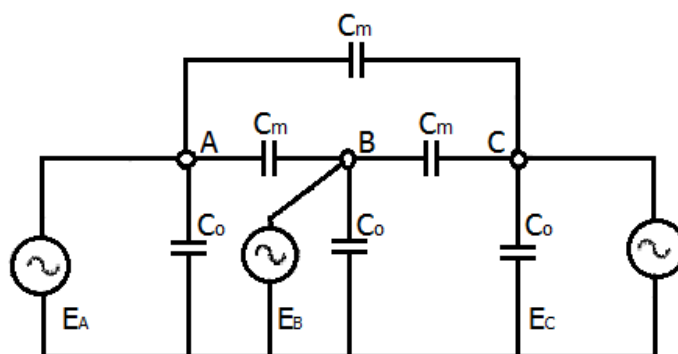
O capacitor equivalente de Thévenin, visto a partir do ponto C da figura 3 é descrito

Figura 2 - Impedâncias e admitâncias da linha trifásica



Fonte: Adaptado de (VALINHO, 2007)

Figura 3 - Acoplamento capacitivo da linha



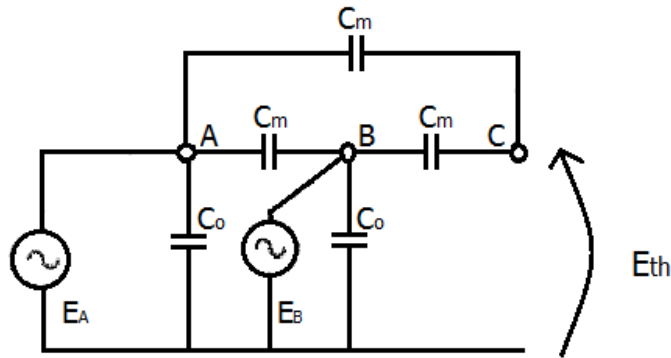
Fonte: Adaptado de (VALINHO, 2007)

pela fórmula 1:

$$C_{th} = 2C_m \quad (1)$$

O circuito equivalente se torna:

Figura 4 - Tensão equivalente de Thevenin



Fonte: Adaptado de (VALINHO, 2007)

De posse do equivalente, calcula-se a tensão de Thévenin:

$$j\omega C_m(E_A - E_C) = j\omega C_m(E_C - E_B) \quad (2)$$

Como $(E_A - E_C) = (E_C - E_B)$, temos:

$$2E_C = E_A + E_B \quad (3a)$$

$$E_{th} = E_C \quad (3b)$$

$$E_{th} = \frac{1}{2}(E_A + E_B) \quad (3c)$$

$$(3d)$$

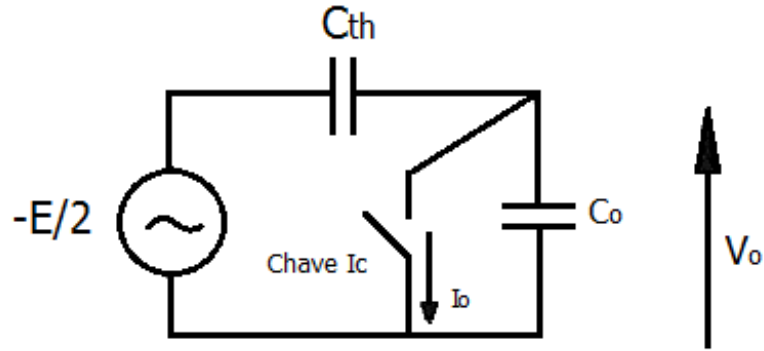
Como $E_A = E\angle -120$ e $E_B = E\angle 120$, calcula-se a tensão equivalente de Thévenin:

$$E_{th} = \frac{1}{2}E\angle 180 \quad (4)$$

Chega-se assim ao circuito equivalente de Thévenin:

A componente capacitiva da corrente de arco secundário pode ser calculada quando

Figura 5 - Circuito capacitivo equivalente de Thevenin



Fonte: Adaptado de (VALINHO, 2007)

se fecha chave I_C do circuito da figura 5. Dessa forma, para um curto circuito na fase C, calcula-se utilizando um divisor de tensão o valor de V_C :

$$V_C = \frac{\frac{1}{j\omega C_0}}{\frac{1}{j2\omega C_m} + \frac{1}{j\omega C_0}} = \frac{-2Ej\omega C_m j\omega C_0}{j2\omega C_0(j\omega C_0 + j2\omega C_m)} \quad (5a)$$

$$V_C = \frac{C_m}{C_0 + 2C_m} E \angle 180 \quad (5b)$$

Os valores típicos para V_C variam em torno de 10 a 25% da tensão, da linha, quando não existem compensação reativa em derivação. Dessa forma, fechando se a chave da figura 5, temos:

$$I_C = \frac{\frac{-E}{2}}{\frac{1}{j2\omega C_m}} = -\frac{E}{2} j2\omega C_m \quad (6)$$

A corrente de arco secundário devido ao acoplamento capacitivo é dada por:

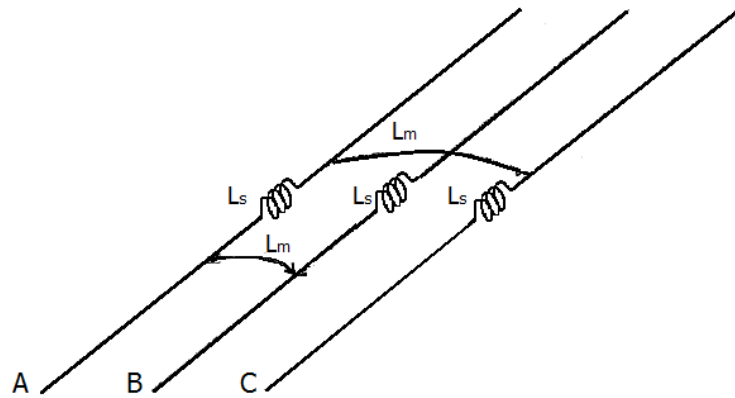
$$I_C = \omega E C_m \angle -90 \quad (7)$$

Nota-se que quanto maior a tensão da linha, maior será a contribuição da corrente capacitiva.

1.2.2 Acoplamento indutivo

Para se calcular a contribuição devido as reatâncias, desconsideraremos as capacitâncias em derivação e a resistência em série.

Figura 6 - Acoplamento indutivo de uma linha trifasica



Fonte: Adaptado de (VALINHO, 2007)

Considerando se as componentes simétricas, as reatâncias de sequência da linha de transmissão da figura 6 serão:

$$X_+ = X_{SL} - X_m$$

$$X_0 = X_{SL} + 2X_m$$

Onde $X_{SL} = \omega L_S$ e $X_m = \omega L_m$

Então:

$$X_{SL} = \frac{2X_+ + X_0}{3}$$

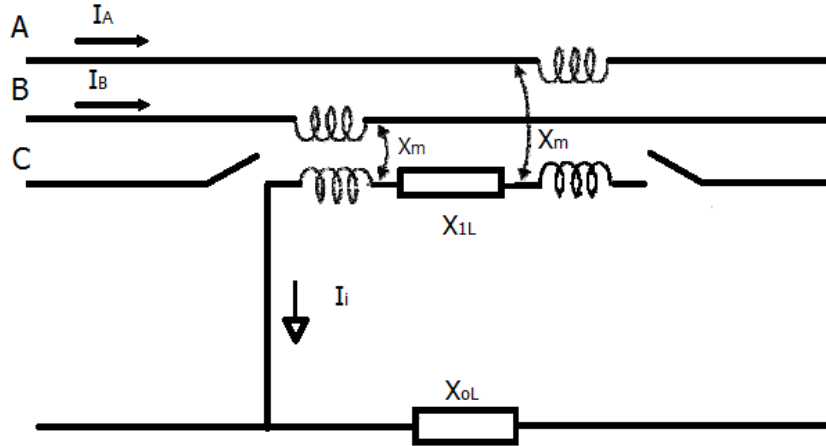
$$X_m = \frac{X_0 - X_+}{3}$$

O circuito da linha no momento em que a fase C abre é demonstrado na figura 7. A tensão induzida na fase aberta é dada pela expressão:

$$V = (I_A + I_B)X_M \quad (10)$$

A corrente de contribuição devido ao acoplamento irá variar de acordo com a

Figura 7 - Circuito indutivo durante a abertura da fase C



Fonte: Adaptado de (VALINHO, 2007)

localização da falta. A máxima corrente ocorrerá quando ambas as extremidades da linha sejam curto-circuitadas. Nesse caso, a corrente I_i será dada por:

$$I_i = \frac{V}{X_+ \frac{X_0 - X_+}{3}} \quad (11)$$

Então:

$$I_i = \frac{3V}{X_+ \frac{X_0 - X_+}{3}} \quad (12)$$

A corrente de arco secundário, considerando ambos os acoplamentos indutivo e capacitivo, será dada por:

$$I = I_C + I_i \quad (13)$$

Baseado em experimentos, diversas equações foram propostas para se estimar o tempo de extinção do arco. De acordo com esses experimentos, o tempo de extinção do arco vs. corrente de arco secundário acima de 20 A e tensão em torno de 20 a 30 kV é calculada através da equação 14: (ZADEH; SANAYE-PASAND; KADIVAR, 2008)

$$t_d = 0.25(0.1I_S + 1) \quad (14)$$

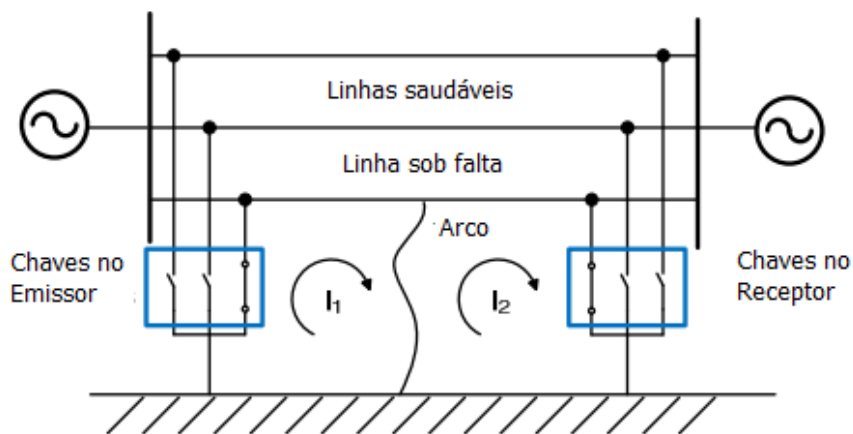
O tempo morto necessário para a deionização do arco depende de diversos fatores, por isso ele pode ser apenas estimado. Mas o valor dessa corrente deve ser baixa, menor do que 50 A, para que exista possibilidade de auto-extinção (ZEVALLOS; TAVARES, 2009). Por isso, um dos métodos de redução de arco secundário é a utilização de reatores em derivação, que diminuem o valor eficaz da corrente de arco secundário.

1.3 MÉTODOS DE REDUÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO

1.3.1 Chaves de aterramento rápido

As chaves de aterramento rápido (HSGS - *High Speed Grounding Switches*) podem extinguir o arco secundário rapidamente, pois fornecem um caminho de impedância muito menor que a impedância do arco. Eles são instalados nas extremidades da linha de transmissão, conforme a figura 9:

Figura 8 - Linha de transmissão com HSGS



Fonte: (SOHN et al., 2014)

Quando ocorre a falta monofásica, as HSGS aterram a fase sob falta, providenciando um caminho no qual flui a corrente de arco. Essas chaves funcionam de acordo com o esquema seguinte (SOHN et al., 2014):

- Ocorre uma falta monofásica para a terra, e é gerado o arco primário.
- Os disjuntores da falta sob fase são acionados, e aparece o arco secundário.
- O lado emissor da HSGS se fecha, formando um caminho no qual flui a corrente induzida através do caminho do arco.

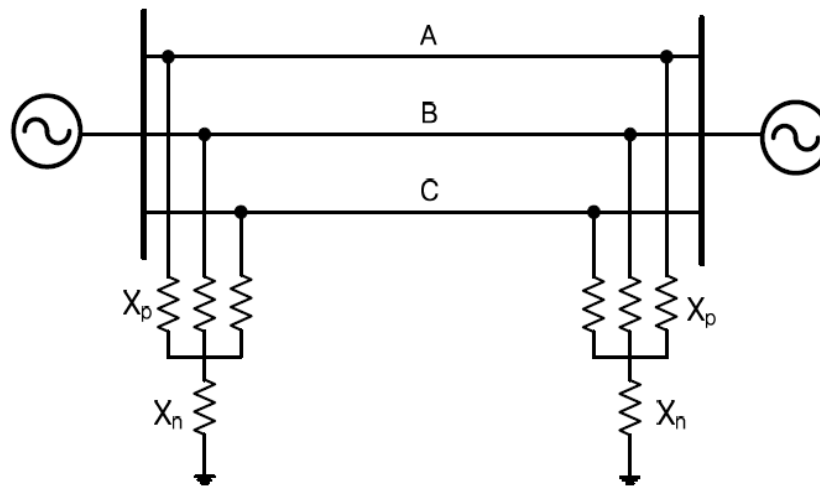
- O lado emissor da HSGS se fecha, criando outro caminho.
- As HSGS são abertos.
- Os disjuntores da linha são fechados.

A dificuldade de se utilizar a HSGS é a sua coordenação com o restante do sistema de proteção.

1.3.2 Compensador reativo

Quando uma linha de transmissão é carregada, uma grande corrente de carregamento pode ser gerada pela admitância em derivação que existe entre a fase e a linha e entre seus próprios condutores (NASHAWATI et al., 2011). Devido a essa corrente, a tensão no lado receptor da linha pode ser maior do que o lado emissor, o chamado efeito Ferranti. Para diminuir o efeito Ferranti, reatores em derivação podem ser adicionados à linha de transmissão (SOHN et al., 2014).

Figura 9 - Linha de transmissão com reatores em derivação



Fonte: (SOHN et al., 2014)

Além de reduzir o nível de sobretensão transitória, os reatores também reduzem a corrente de arco secundário. Isso ocorre devido ao acoplamento que ocorre entre os indutores e a capacitância das fases sãs.

Uma linha pode ser compensada de acordo com a sua potência reativa. Os reatores são adicionados à ambas as extremidades da linha. Quando a falta monofásica acontece,

os reatores contribuem com uma corrente em atraso, que neutraliza a corrente de arco secundário. O reator pode ser calculado através da fórmula 15:

$$X_{eq} = \frac{V^2}{F * Q} \quad (15)$$

Onde F é o grau de compensação da linha, e Q é a potência capacitiva da linha.

Os reatores são adicionados à ambas as extremidades da linha. Quando a falta monofásica acontece, os reatores contribuem com uma corrente em atraso, que neutraliza a corrente de arco secundário.

A fórmula que calcula o reator de neutro de acordo com o grau de compensação é (ZADEH; SANAYE-PASAND; KADIVAR, 2008):

$$X_n = \frac{\omega(C_1 - C_0)}{3F.\omega C_1 [\omega C_0 - (1 - F) .\omega C_1]} \quad (16)$$

Onde, ω : frequência

X_n : reatância do reator de neutro

C_1 : capacitância de sequencia positiva

C_0 : capacitância de sequencia zero

F: grau de compensação da linha

X_{eq} : reatância do reator em derivação

1.4 Introdução ao ATP

O comportamento dinâmico de um sistema é descrito por um conjunto de equações diferenciais que o caracteriza. Devido a alta complexidade dos sistemas reais, torna se praticamente impossível uma solução analítica para as equações.

Muitas técnicas vem sendo utilizadas na solução numérica dos transitórios eletromagnéticos, usando se de plataforma digital. Essas técnicas são divididas entre duas categorias: técnicas no domínio do tempo e técnicas no domínio da frequência.

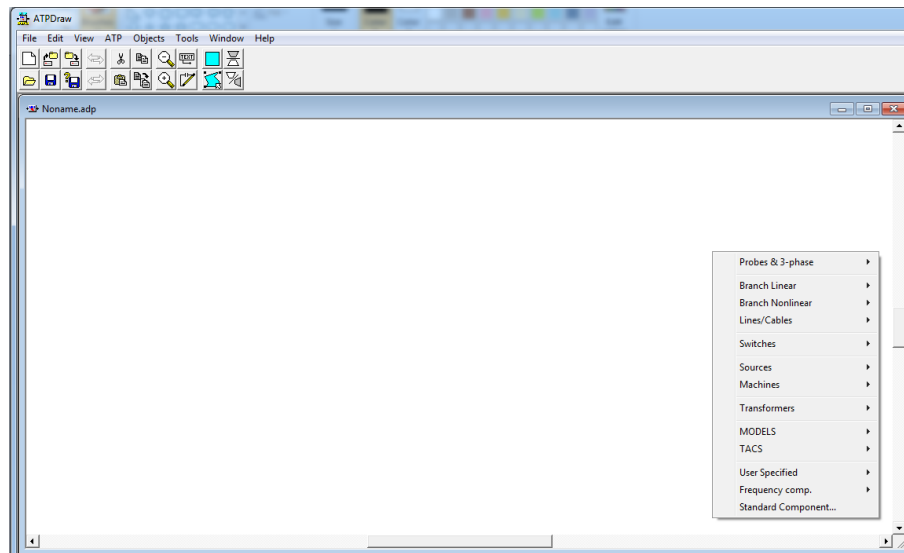
O programa ATP (*Alternative transients program*) utiliza de técnicas no domínio do tempos. A maioria dos métodos de solução no domínio do tempo baseiam-se na regra de integração trapezoidal, quando é realizada a representação da linha a parâmetros concentrados, e no método de Bergeron, ou método das características, para a representação de elementos à parâmetros distribuídos. Esses modelos podem ser utilizados para representar a linha de transmissão em simulações de transitórios resultantes de operações de manobras e chaveamentos, e também em transitórios resultantes de descargas atmosféricas.

Com o passar do tempo ATP evoluiu e nessa evolução surgiu uma interface gráfica, chamada de ATPDraw. Essa interface permite que os dados sejam inseridos no cartão do ATP a partir dos nós que são criados quando se inserem os modelos disponíveis para os dispositivos.

Em complemento às funções do ATP e do ATPDraw, pode ser instalado junto ao ATP o programa gráfico PLOTXY, que permite que se façam as análises gráficas a partir dos arquivos com os dados gerados pelo ATP.

Para a utilização do ATP, recomenda-se o uso do *ATP Rule Book*, e o arquivo de "HELP", que é incluído no próprio ATPDraw, e possui informações úteis e instruções sobre como deve ser feito o preenchimento de cada componente do sistema. Na figura 10, é exibida a tela inicial do ATPDraw, acompanhada do menu inicial onde pode-se escolher os componentes do sistema.

Figura 10 - Tela inicial do ATPDraw



Fonte: O autor

2 MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Para a realização do trabalho, utilizamos dois circuitos. Um sistema de 9 barras de 230 kV, e um sistema de 2 barras de 500 kV. O sistema de 230 kV é um sistema de 9 barras que é clássico em estudos de estabilidade, onde tanto as impedâncias quanto o fluxo de potência já estão definidos. O sistema de 500 kV foi modelado a partir de uma do diagrama da torre de uma linha de transmissão, que foi implementada usando a rotina *line constants* do programa ATP, e conecta um gerador a uma carga resistiva.

2.1 Sistema de 9 barras de 230 kV

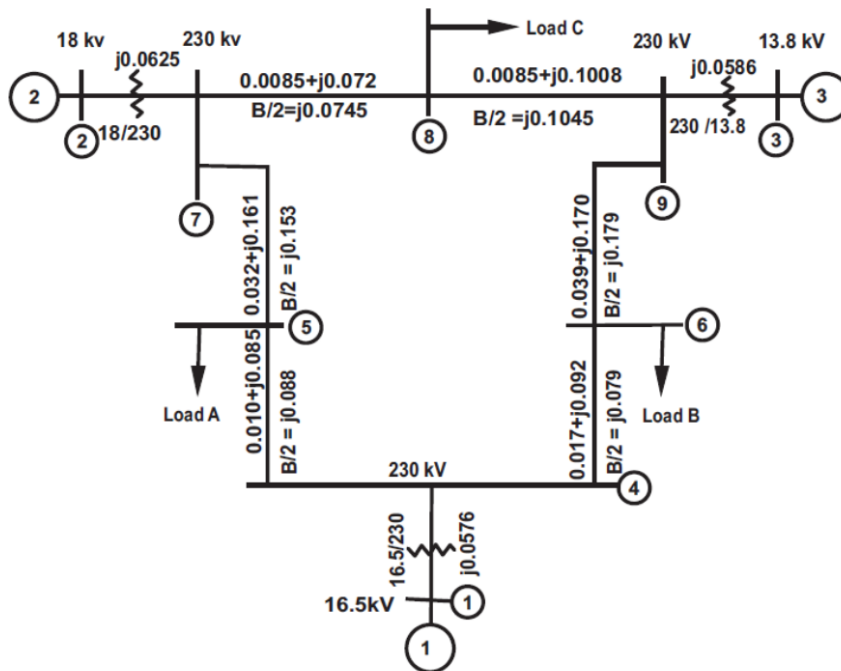
O sistema de 9 barras de 230 kV foi desenvolvido por (ANDERSON; FOUAD, 2008), no livro *"Power Systems Stability and Control"*, de 2008. O sistema consiste de 3 conjuntos de geradores, 6 linhas de transmissão, 3 transformadores e 3 cargas. Apesar de ser um sistema didático, o estudo da sua implementação no ATP é pertinente, pois da mesma forma como o estudo foi aqui conduzido, este pode ser aplicado a redes reais, desde que as mesmas sejam ajustadas. Os diagramas de impedâncias e fluxo de potência estão exibidos nas figuras 11 e 12.

A partir do diagrama de impedância, apresentado na figura 11 pode-se calcular os parâmetros para as linhas de transmissão e fazer o dimensionamento dos transformadores. Com o diagrama de fluxo, apresentado na figura 12 é possível dimensionar o valor das cargas e, além disso, após a simulação do circuito, compara-se os fluxos obtidos pelo ATP com o fornecido pelo diagrama, verificando assim se a conversão do sistema para o sistema de entrada de dados do ATP foi realizada corretamente.

Primeiramente, o modelo foi implementado utilizando o programa Anarede, do Cepel. Isso foi feito com o objetivo de verificar os fluxos que foram propostos pelo autor. A implementação desse sistema é mais rápida que no ATP, pois o Anarede permite que os dados sejam inseridos em pu. Dessa forma, encontrou-se uma solução mais rápida para a verificação dos fluxos propostos pelo Anderson. Essa implementação é demonstrada na figura 13.

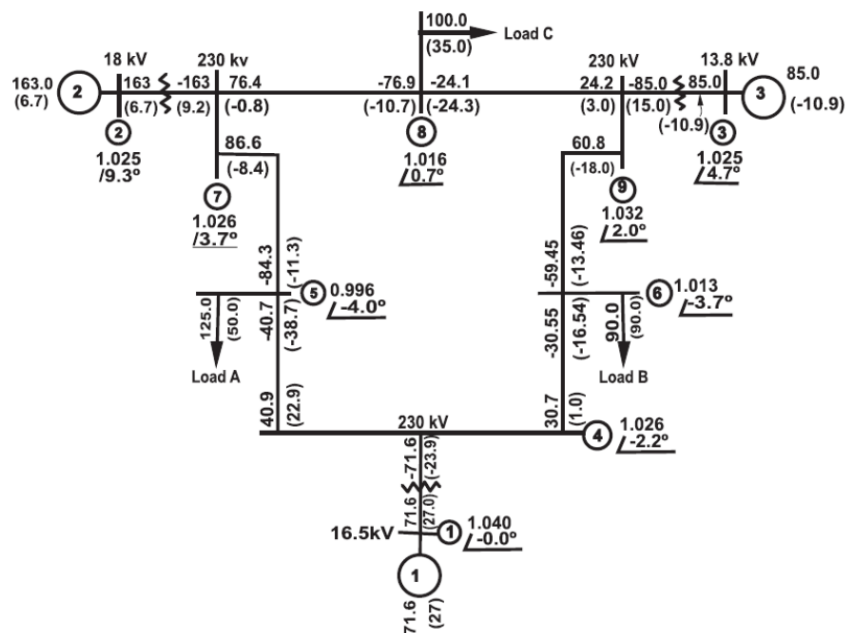
O passo seguinte foi a implementação do sistema de 9 barras no ATP, ajustando-o para que reproduzisse o mesmo fluxo. Esse circuito é exibido na figura 14. Durante esse processo, foi realizada a conversão do sistema em pu para o formato de dados aceito pelo ATP. Todos os cálculos estão referidos no Anexo A.

Figura 11 - Diagrama de impedância do sistema, na base de 100 MVA



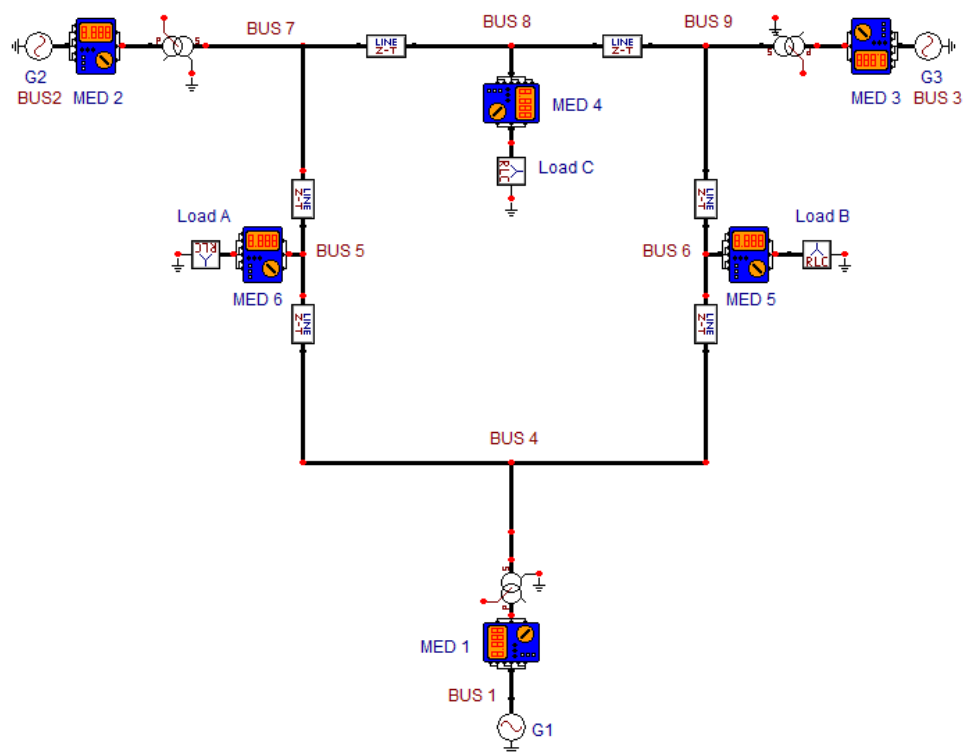
Fonte: (ANDERSON; FOUAD, 2008)

Figura 12 - Diagrama de fluxo de potência do sistema(em MW e MVar)



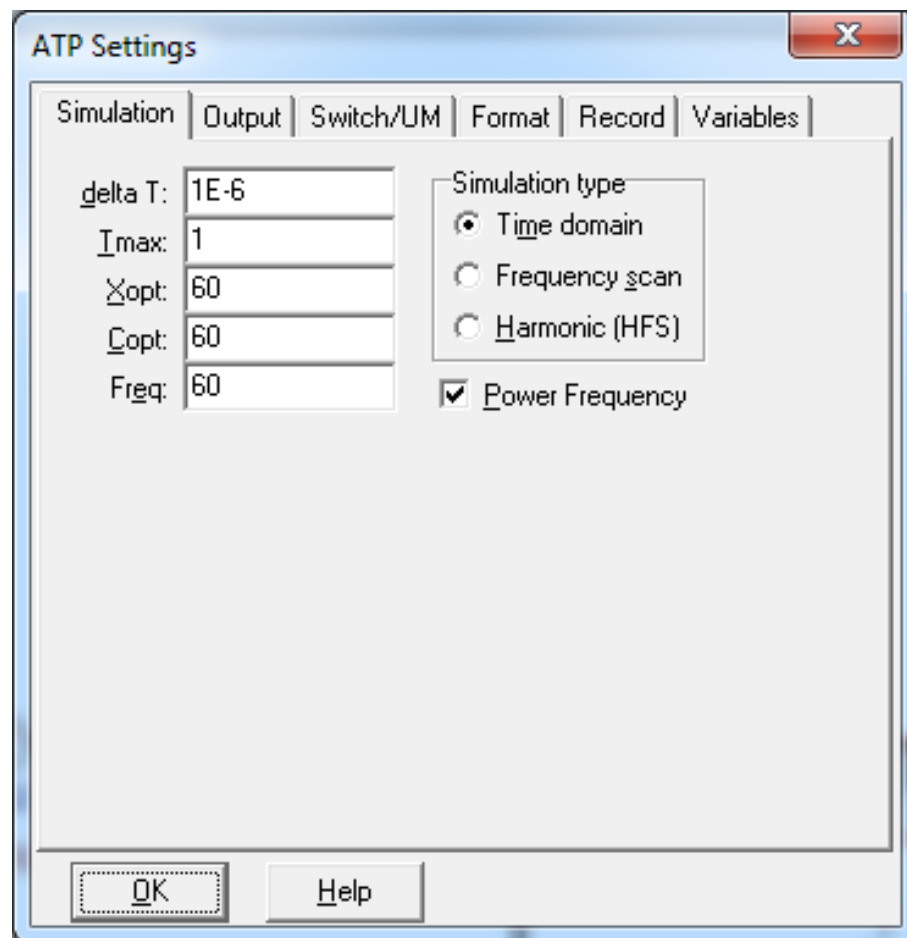
Fonte: (ANDERSON; FOUAD, 2008)

Figura 14 - Implementação do sistema de 9 barras no ATP



Fonte: O autor

Figura 15 - Configuração inicial do ATP



Fonte: O autor

2.1.2 Dimensionamento das linhas de transmissão

Considerando que todas as linhas estão conectadas aos barramentos de alta dos transformadores, que têm tensão de linha de 230 kV, adotamos essa tensão como base. A potência base do sistema é de 100 MVA, então podemos calcular a impedância base do sistema.

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{230^2}{100} = 529\Omega \quad (17)$$

Para se calcular a impedância de cada linha, basta multiplicar as respectivas impedâncias em p.u. pela impedância base.

$$Z_{linha} = Z_b * Z_{pu} = R_{linha} + jX_{linha} \quad (18)$$

A resistência da linha é a resistência de sequência positiva. Como no sistema utilizado não é disponibilizada a resistência de sequência zero, multiplicamos a sequência positiva por três. O mesmo ocorre para a reatância indutiva da linha, que devido a escolha do parâmetro X_{opt} nas configurações iniciais, pode ser inserida no programa em Ohms.

Da mesma maneira, a admitância shunt $B/2$ é calculada. Como escolhemos no início a opção $C_{opt} = 60$ no ATP, inserimos no ATP a susceptância da linha, em μS .

Após todos os cálculos, montamos a tabela 2, que inclui todos os dados pertencentes ao sistema. O modelo de linha escolhido no ATP foi o modelo de linha transposta trifásica de Clarke. Por conveniência, o comprimento das linhas foi parametrizado em 100 km.

Tabela 2 - Parâmetros das linhas de transmissão

Linha	$R_+(\Omega/km)$	$R_0(\Omega/km)$	$L_+(\Omega/km)$	$L_0(\Omega/km)$	$C_+(\mu S/km)$	$C_0 (\mu S/km)$
4-5	0.05290	0.15870	0.4496	1.34880	3.327	9.981
4-6	0.08933	0.26799	0.48668	1.46004	2.987	8.961
7-5	0.16928	0.50784	0.85169	2.55507	5.784	17.352
7-8	0.04496	0.13488	0.38100	1.14300	2.820	8.460
9-8	0.06300	0.18900	0.53300	1.59900	3.950	11.850
9-6	0.20631	0.61893	0.89930	2.69790	6.767	20.301

Fonte: O autor

Como exemplo, na figura 16 está o preenchimento dos dados da Linha 4-5:

Figura 16 - Entrada de dados da Linha 4-5

Component: Linezt_3.sup

DATA	VALUE
R/I+	0.0529
R/I0	0.1587
A+	0.4496
A0	1.3488
B+	3.327
B0	9.981
I	100
ILINE	0

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	BUS 5
OUT1	ABC	BUS 4

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

☐ Hide ☐ Lock ☐ \$Vintage,1

LINE Z-T

OK Cancel Help

Fonte: O autor

2.1.3 Dimensionamento dos transformadores

Todos os transformadores estão conectados ao lado de alta das linhas de transmissão. Portanto, calculamos a impedância base do lado de alta, considerando uma potência base de 100 MVA.

$$Z_{Bhigh} = \frac{V^2}{S_b} = \frac{230^2}{100} = 529 \, \Omega \quad (19)$$

Para cada transformador, é preciso que se calcule a impedância base do lado de baixa separadamente. De posse das impedâncias base dos dois lados, calculamos a resistência e reatância em cada lado. Para calcularmos as resistências, usamos a relação descrita na equação 20:

$$\frac{R}{X} = 1000 \quad (20)$$

No caso das reatâncias, o total é dividido por igual entre os lados de baixa e alta tensão. No lado de delta, aplica-se a transformação delta-estrela, pois a impedância fornecida pelo sistema é referida ao lado estrela. Logo:

$$Z_{\Delta} = 3Z_Y \quad (21)$$

Após os cálculos, obtém-se a tabela 3:

Tabela 3 - Parâmetros dos transformadores

	V_{low} (kV)	R_{low} (Ω)	L_{low} (Ω)	V_{High} (kV)	R_{High} (Ω)	L_{High} (Ω)
T1	16.5	0.0002	0.235	230.00	0.0152	15.235
T2	18.0	0.0003	0.304	230.00	0.0165	16.531
T3	13.8	0.0002	0.167	230.00	0.0155	15.5

Fonte: O autor

Como exemplo, na figura 17 está o preenchimento dos dados do Transformador 1:

Figura 17 - Entrada de dados do Transformador 1

Component: SATTRAFO.sup

Attributes | Characteristic

	Prim.	Sec.
U [V]	16.5	132.79
R [ohm]	0.0002	0.0152
L [mH,ohm]	0.235	15.235

Coupling: D Y
Phase shift: 330
I(0)= 0 Rm= 1000000
F(0)= 0
3-leg core
RMS
3-winding

NODE	PHASE	NAME
P	ABC	BUS 1
S	ABC	
Sat	ABC	
S-N	1	

Order: 0 Label:
Comment:
Output: 0 - No
Hide
Lock

OK Cancel Help

Fonte: O autor

2.1.4 Dimensionamento dos geradores

Para os geradores, utilizou-se o modelo *AC 3-ph. type14*. As tensões foram ajustadas para que a forma de onda seja a mesma dos geradores propostos pelo sistema, e como não há a necessidade de resolver o fluxo no ATP, os ângulos são simplesmente mantidos. Os parâmetros dos geradores estão descritos na tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros dos geradores

Gerador	V (pu)	Fase	V-base	V(ff)	V(peak)
G1	1.04	0.0	16500	17160	14011.08
G2	1.025	9.3	18000	18450	15064.36
G3	1.03	4.7	13800	14145	11549.34

Fonte: O autor

Como exemplo, na figura 18 está o preenchimento dos dados do Gerador 1:

Figura 18 - Entrada de dados do Gerador 1

The screenshot shows a software window titled "Component: Ac3ph.sup". It has a tab labeled "Attributes". Inside, there are two tables. The first table has columns "DATA" and "VALUE":

DATA	VALUE
Amp.	14011.08
f	60
pha	0
A1	0
Tstart	-1
Tstop	10

The second table has columns "NODE", "PHASE", and "NAME":

NODE	PHASE	NAME
AC3	ABC	G1A

Below the tables, there are input fields for "Order:" (value 0) and "Label:" (value G1). There is also a "Comment:" field. Under "Type of source", there are radio buttons for "Current" and "Voltage" (which is selected). To the right, there are checkboxes for "Hide" and "Lock". At the bottom, there is a small icon of a generator, and buttons for "OK", "Cancel", and "Help".

Fonte: O autor

2.1.5 Dimensionamento das cargas

Para as cargas, utilizamos o modelo de impedância trifásica $RLC-Y$ 3 ph . Os autores (ANDERSON; FOUAD, 2008) disponibilizam os valores das admitâncias que representam cada carga, em pu. Esses valores estão relacionadas na tabela 5. A impedância é obtida através da fórmula 22:

$$Z_L = \frac{1}{Y_L} \quad (22)$$

Como forma alternativa, a admitância pode ser calculada utilizando se os valores de potência ativa e reativa, usando-se a fórmula:

$$Y = \frac{P_L}{V_L^2} - j \frac{Q_L}{V_L^2} \quad (23)$$

Em seguida, multiplica-se pela impedância base, previamente calculada, e encontra-se os valores da resistência e da reatância das cargas.

Dessa forma, obtêm-se os seguintes resultados, compilados na tabela 5:

Tabela 5 - Parâmetros das cargas

Carga	Admitância Y_c (pu)	Impedância Z_c (pu)	Impedância Z_c (ohm)
A	1.2610 - j0.504	0.68 + j0.27	361.91 + j144.76
B	0.8777 - j0.2926	1.03 + j0.34	542.84 + j180.95
C	0.9690 - j0.3391	0.92 + j0.32	486.47 + j170.2

Fonte: O autor

Como exemplo, na figura 19 mostra o preenchimento dos dados da Carga A:

Figura 19 - Entrada de dados da Carga A

Component: RlcY3.sup

Attributes

DATA	VALUE
R_1	361.91
L_1	144.76
C_1	0
R_2	361.91
L_2	144.76
C_2	0
R_3	361.91
L_3	144.76

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	BUS 5
OUT	1	

Order: 0 Label: Load A

Comment:

Output: 0 - No

☐ Hide
☐ Lock
☐ \$Vintage,1

OK Cancel Help

Fonte: O autor

Antes de iniciar a simulação transitória, verificamos o desempenho do sistema em regime permanente. Isso é necessário para se verificar se os fluxos de potência estão de fato de acordo com o modelo teórico. Através dos medidores trifásicos que foram instalados, mede-se e compara-se a potência ativa e reativa fornecida por cada gerador.

As medições do fluxo de carga usando o ATP foram comparadas ao modelo teórico do sistema. O erro percentual é calculado através da formula 24:

$$E\% = \frac{V_{teorico} - V_{medido}}{V_{teorico}} * 100 \quad (24)$$

Tabela 6 - Comparativo entre o fluxo teórico e fluxo medido

	Fluxo Teórico		Fluxo Medido		Erro P (%)	Erro Q (%)
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)		
G1	71,60	27,00	70,97	26,70	0,87	1,10
G2	163,00	6,70	163,23	6,57	0,14	2,00
G3	85,00	-10,90	85,53	-10,94	0,63	0,33
Carga A	125,00	50,00	125,00	50,00	0,00	0,00
Carga B	90,00	30,00	90,01	30,00	0,01	0,01
Carga C	100,00	35,00	100,00	34,99	0,00	0,04

Fonte: O autor

2.1.6 Método de aterramento rápido

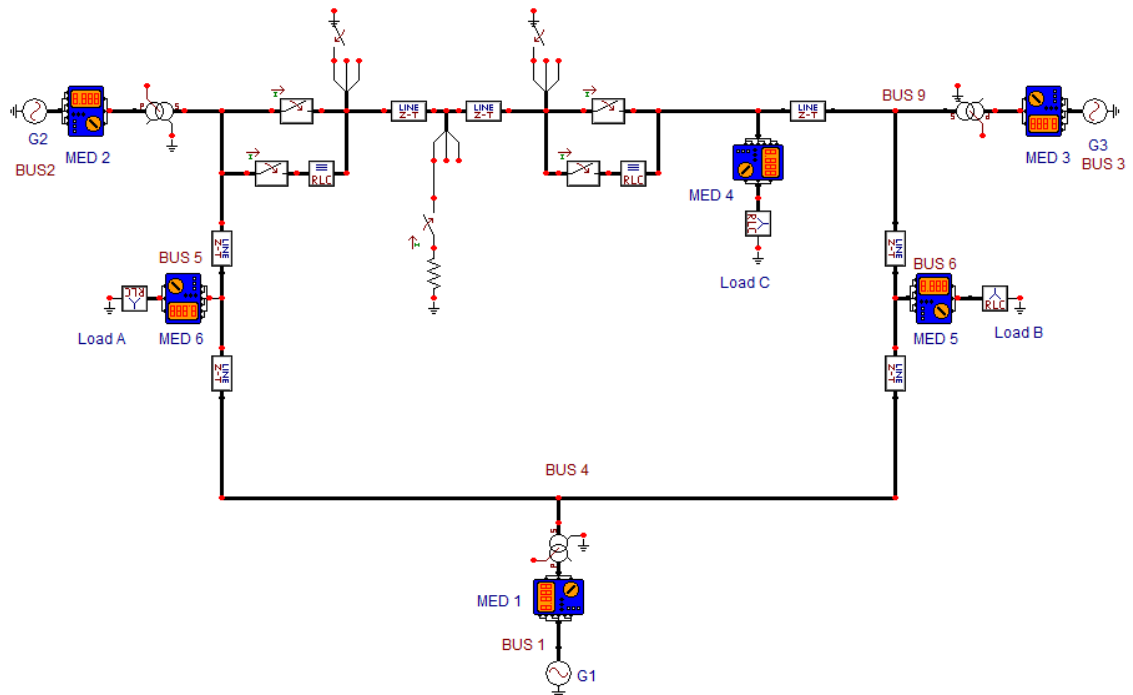
O circuito então foi adaptado para a simulação. O defeito ocorre na linha de transmissão que liga o barramento 7 ao 8. A linha foi dividida em 2 segmentos de 50 km, com o curto ocorrendo à 50 km de cada barramento. Nesse ponto, foi colocada uma chave na fase C, conectada a uma resistência de arco de 200 Ω . Nas extremidades da linha foram instaladas as chaves de aterramento rápido. A implementação completa do circuito com as modificações realizadas são demonstradas na figura 20.

A simulação acontece de acordo com a seguinte sequencia de eventos:

- Início da simulação em $t=0$ s;
- Início do curto através do fechamento da chave I_{fc} em $t=200$ ms;
- Considerando um tempo de atuação da proteção em 150 ms, abrem-se os disjuntores da fase C na linha defeituosa em $t=350$ ms;
- Aterramos ambas as extremidades da fase C, através de chaves de aterramento colocadas nas extremidades da linha. As chaves se fecham no instante $t=600$ ms e abrem em $t=750$ ms
- A fase C é reenergizada, fechando-se o lado do barramento 8 em $t=800$ ms, e o lado do barramento 7 em $t=850$ ms
- O sistema retorna ao regime permanente

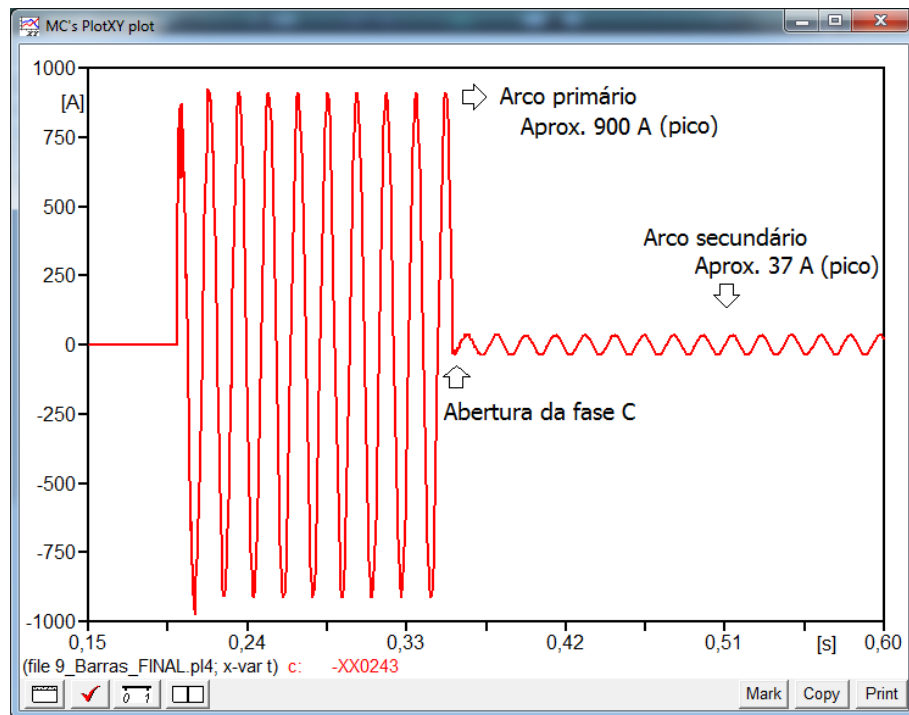
No momento do fechamento da chave, se inicia o curto com a corrente de flashover. Quando ocorre a abertura do disjuntor da fase C, nota-se a presença da corrente de arco secundário, que ocorre devido a indução eletromagnética promovida pelas fases A e B.

Figura 20 - Sistema de 230 kV com as chaves de aterramento



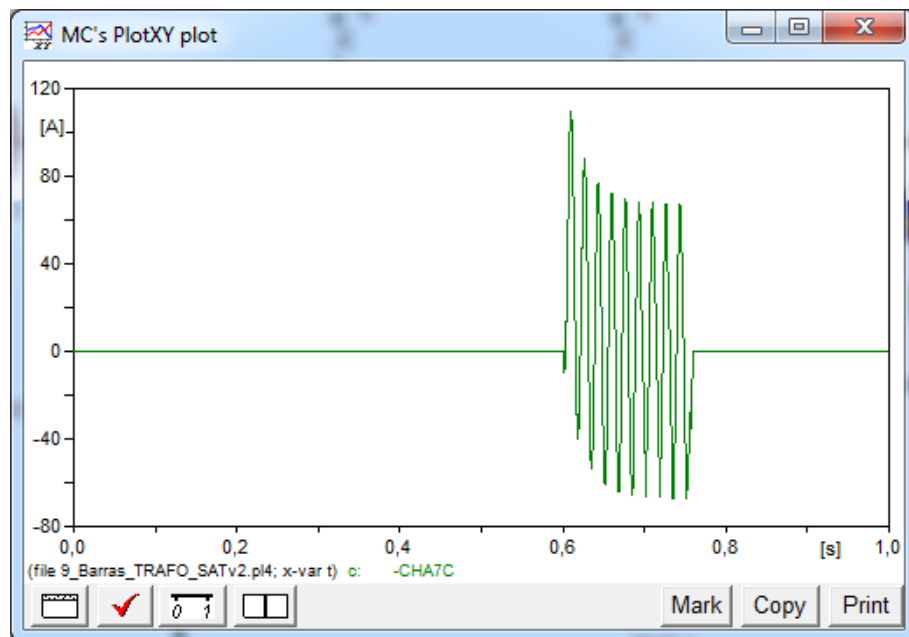
Fonte: O autor

Figura 21 - Corrente de curto e o arco secundário



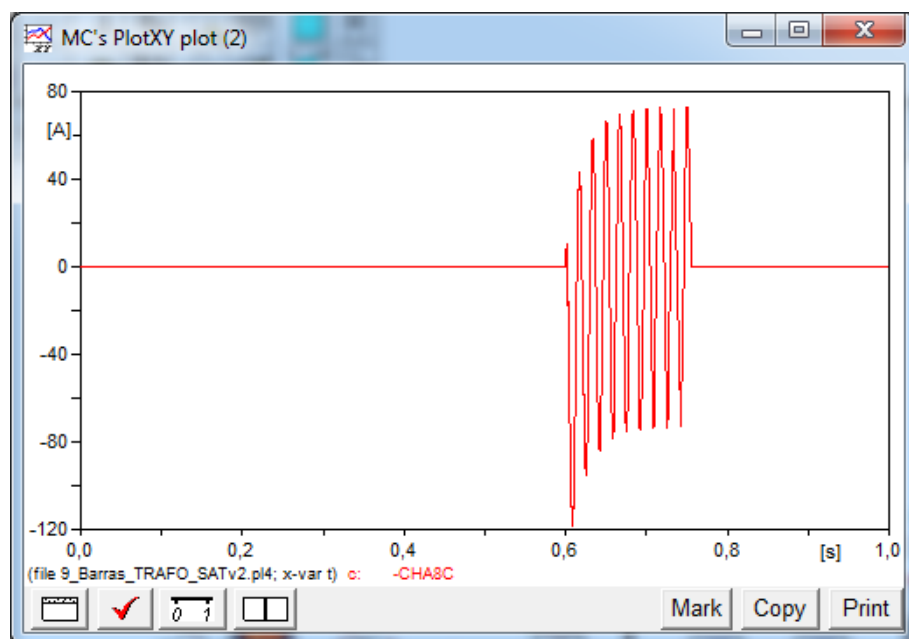
Fonte: O autor

Figura 22 - Corrente na chave de aterramento da fase C, barramento 7



Fonte: O autor

Figura 23 - Corrente na chave de aterramento da fase C, barramento 8

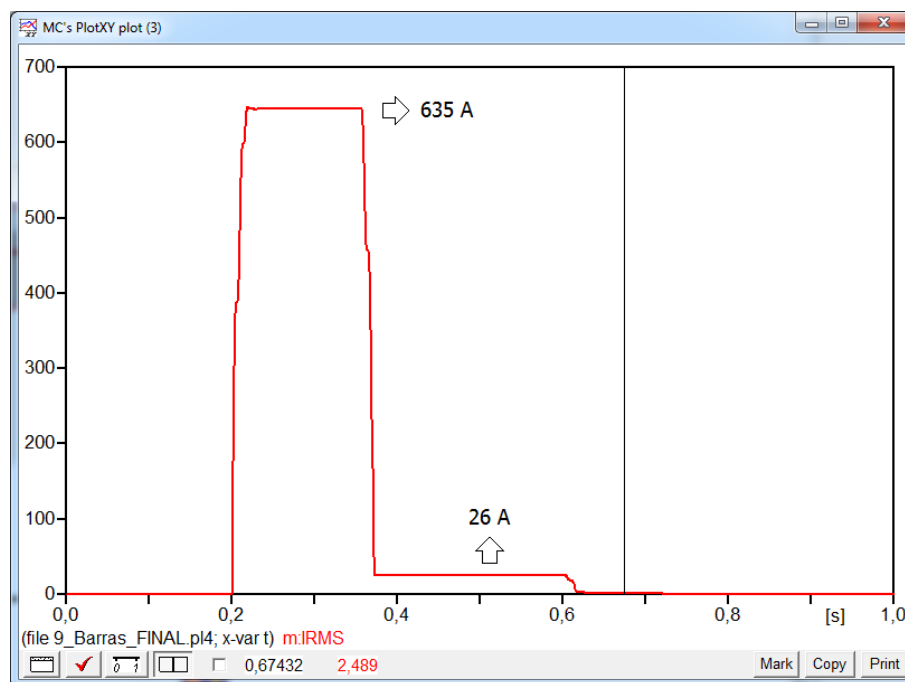


Fonte: O autor

Nas figuras 22 e 23 é exibido o comportamento da corrente nas chaves de aterramento presentes nos barramentos 7 e 8, durante o momento em que elas operam.

Através de um medidor de corrente no ponto de falta, exibe-se o comportamento do valor da corrente eficaz de arco secundário.

Figura 24 - Valor eficaz da corrente no ponto de falta

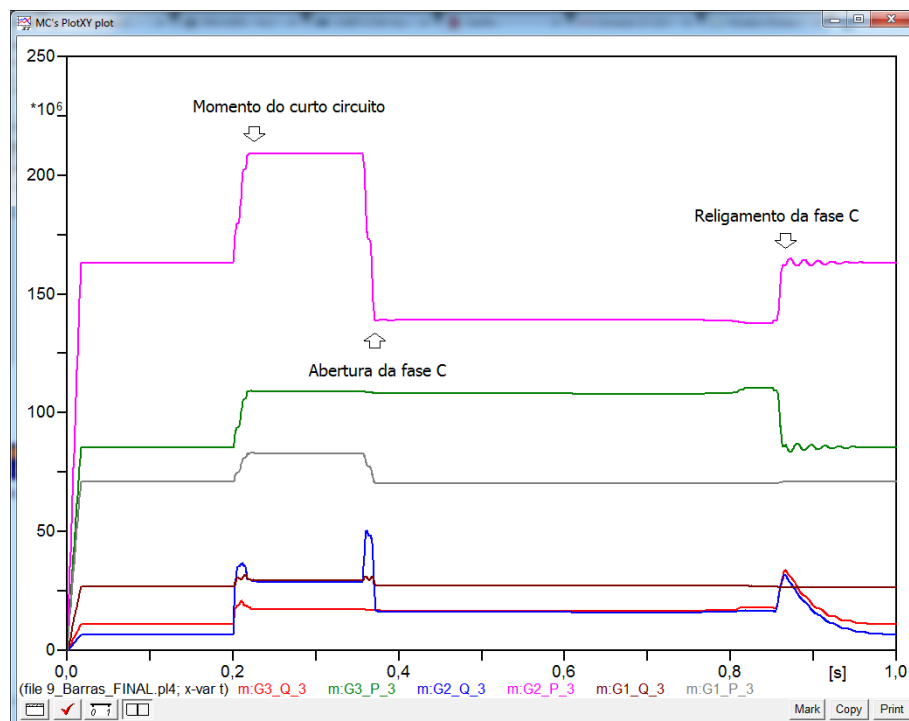


Fonte: O autor

O arco primário, que possui um valor eficaz de aproximadamente 635 A, dura em torno de 200 ms, que é o tempo que passa até a abertura dos disjuntores. Em seguida, a fase C é desconectada, e nota-se o início da corrente de arco secundário, que possui um valor eficaz de aproximadamente 26 A. Essa corrente tem duração aproximada de 200 ms. Após o tempo de 200 ms do estabelecimento do arco secundário, acontece o aterramento da fase C. Nesse instante, o valor eficaz da corrente de arco se torna aproximadamente 2,5 A. Portanto, a eficiência desse esquema de extinção de arco dependerá exclusivamente do momento de atuação das chaves, que devem ser coordenadas com o restante do sistema de proteção.

Com o objetivo de verificar se o sistema retorna ao estado inicial, mediu-se a variação de potência ativa e reativa de cada gerador. Nota-se que durante o curto primário, existe uma grande solicitação de potência no Gerador 3, que pode ultrapassar o seu limite térmico. Porém, considera-se que o gerador consegue suprir essa demanda de potência, que é solicitada por um tempo muito curto. Após as manobras de desligamento da fase, seguida por aterramento e religamento, o sistema retorna ao estado inicial. Essa variação no tempo é demonstrada na figura 25.

Figura 25 - Potência ativa e reativa dos geradores no tempo

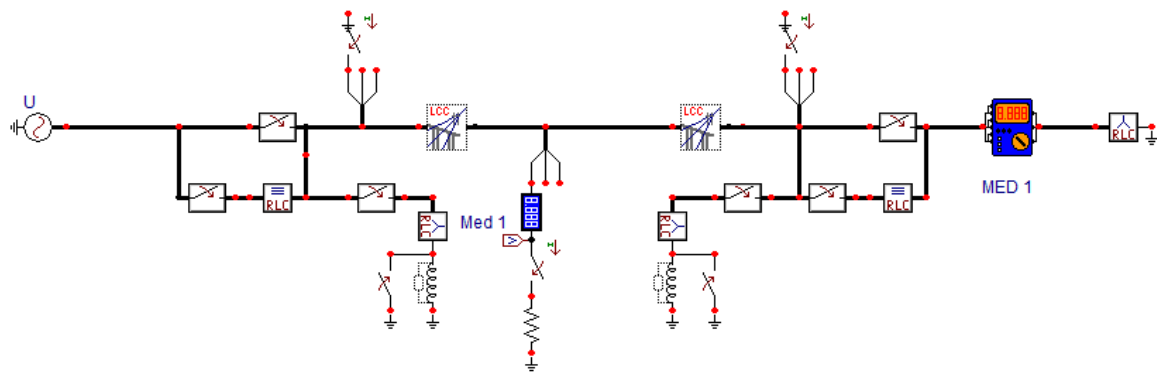


Fonte: O autor

2.2 Sistema de 2 barras de 500 kV

O sistema de 2 barras proposto consiste de um gerador de 500 kV, conectado a uma carga resistiva de 600 MW através de uma linha de 300 km. Foram adicionadas chaves que ligam as extremidades da linha aos reatores e a terra, e aos reatores e ao reator de neutro. Os dados da linha estão referidos no Anexo B.

Figura 26 - Sistema de 500kV



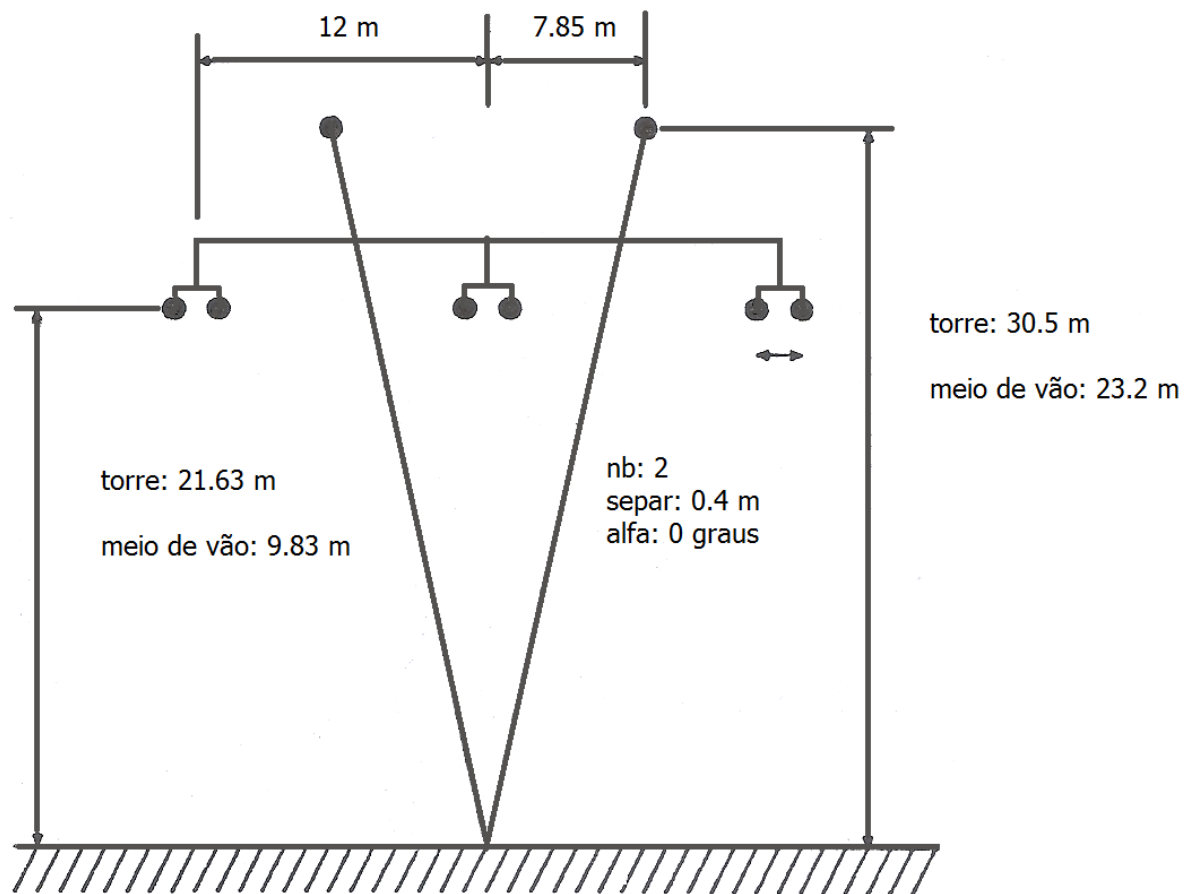
Fonte: O autor

2.2.1 Modelagem da linha de transmissão

A linha é modelada a partir do diagrama de dados da torre na qual ela está instalada. Isto é feito utilizando-se a rotina *LCC parameters*, que dispõe de 3 modelos de linha de parâmetros variantes na frequência: Semlyen, JMarti e Taku Noda. No caso da modelagem de linhas de Transmissão avaliadas pelo método das características, o modelo JMarti considera simplificações de cálculo que dão resultados aproximados excelentes em linhas com configurações simétricas, e será este o método adotado.

Para a obtenção dos parâmetros de linha, os cálculos são efetuados independentemente da frequência da rede, uma vez que esses parâmetros permanecem constantes em relação à mesma. Também considera-se que as linhas de transmissão são transpostas. A silhueta da torre (perfil de cada torre utilizada com a sustentação dos cabos de transmissão de energia elétrica e cabos de proteção contra descargas atmosféricas) é mostrada na figura 27, ilustrando a disposição dos condutores no espaço.

Figura 27 - Diagrama de dados da torre da linha de 500 kV



Fonte: (IEEE, 1993)

Os dados são inseridos na janela de entrada da rotina *Line Constants*, do ATP. O preenchimento dos dados da linha é demonstrado nas figura 28 e 29. Após rodar o programa, é exibida a janela com os resultados, que são as impedâncias e admitâncias da linha. Esses resultados são exibidos na figura 30.

Para se compensar a linha, precisamos primeiramente calcular a potência reativa da mesma. Essa potência pode ser calculada através da fórmula 25.

$$Q = V^2 S \quad (25)$$

Figura 28 - Rotina *Line Constants*

Line/Cable Data: C:\ATP\project\Lcc\LadoA.alc

Model **Data**

System type: Overhead Line #Ph: 3

☒ Transposed
☒ Auto bundling
☒ Skin effect
☐ Segmented ground
☐ Real transf. matrix

Units: ☒ Metric ☐ English

Standard data:

Rho [ohm*m] 100

Freq. init [Hz] 0.006

Length [km] 10

Model Type:

☐ Bergeron

☐ PI

☒ JMarti

☐ Semlyen

☐ Noda

Data:

Decades 8 Points/Dec 5

Freq. matrix [Hz] 5000 Freq. SS [Hz] 60

☒ Use default fitting

Comment: Order: 0 Label: ☐ Hide

Fonte: O autor

Figura 29 - Entrada de dados da torre

Line/Cable Data: C:\ATP\project\Lcc\Exa_7.alc

Model **Data**

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.2178	0.801	0.05215	-20	50	50	18	0	2
2	2	0.2178	0.801	0.05215	0	77.5	77.5	18	0	2
3	3	0.2178	0.801	0.05215	20	50	50	18	0	2
4	0	0	0.193	2.61	-12.9	98.5	98.5	0	0	0
5	0	0	0.193	2.61	12.9	98.5	98.5	0	0	0

Fonte: O autor

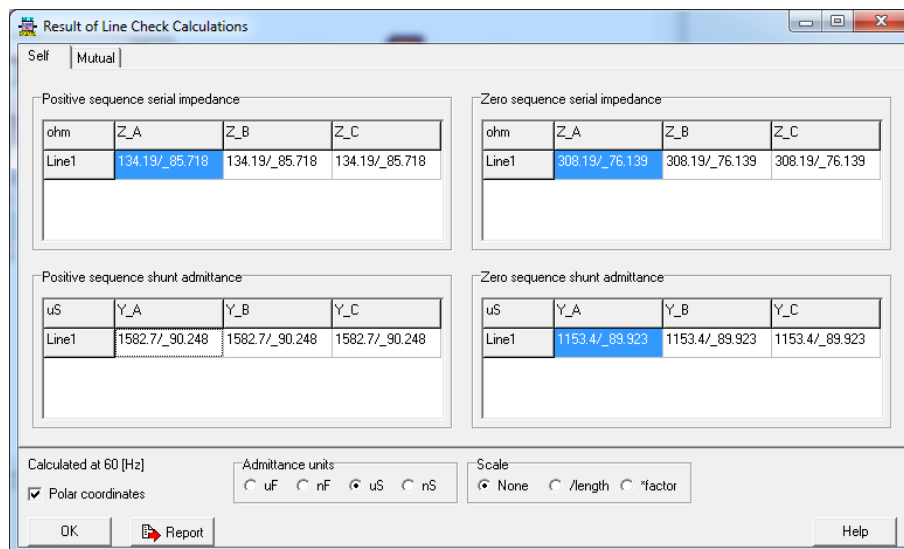
Onde V é a tensão de linha e S é a susceptância de sequência positiva da linha de transmissão. A susceptância é função da capacitância da linha, que pode ser calculada através da fórmula 26.

$$S = \omega C \quad (26)$$

Onde $\omega = 2\pi f$, sendo " f " a frequência da rede.

Como todas as características da linha já foram calculadas, podemos extrair a susceptância da linha no ATP, usando a ferramenta *line check*. Esse resultado é exibido na figura 30.

Figura 30 - Impedâncias e admitâncias da linha de 500 kV



Fonte: O autor

De posse do valor da susceptância, podemos calcular a potência reativa da linha.

$$Q = V^2 B = (500k)^2 * 1582.7\mu = 338.75 \text{ MV}ar \quad (27)$$

2.2.2 Dimensionamento dos reatores

A linha é compensada 30 % a 50 % de sua potência reativa, com e sem reator de neutro. Como o valor da potência reativa já é conhecida, o reator pode ser calculado pelas fórmulas apresentadas nas equações 15 e 16:

Os cálculos referentes aos reatores estão descritos no Anexo A.

2.2.3 Métodos de aterramento rápido/compensadores reativos

Foram realizadas 6 simulações. No caso 1, é simulado o comportamento da falta sem qualquer tipo de método de extinção de arco. No caso 2, é simulado o método de aterramento rápido. Nos casos seguintes, foi utilizado a compensação reativa como método de extinção. Através da fórmula descrita na equação 14, foi calculada a estimativa do tempo morto necessário para a deionização do caminho do arco.

As simulações ocorrem a partir do momento que se fecha a chave I_{fc} em $t = 200$ ms. Nesse instante, ocorre a corrente de arco primário, que possui um valor de pico de aproximadamente 1610 A. Em todos os casos, considera-se que a proteção atua em 150 ms, que é o tempo entre o arco primário e a abertura dos disjuntores da fase C. Após a abertura da fase, ocorre a corrente de arco secundário.

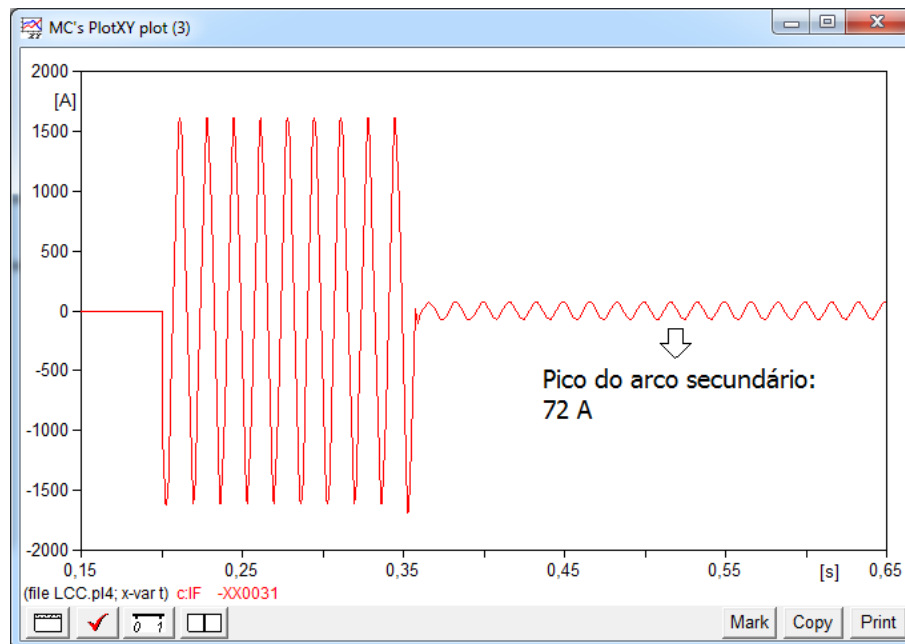
Na figura 31, demonstra-se o comportamento da corrente de arco secundário quando não se utiliza nenhum método de extinção do arco. Na figura 32, demonstra-se o comportamento da corrente na utilização das HSGS, que suprime a corrente de arco secundário. Nas figuras 33, 34, 35 e 36, é possível notar a redução da amplitude da corrente de arco secundário, conforme se aumenta o nível de compensação. A redução do valor eficaz do arco secundário contribui para a redução do tempo morto. A tabela 7 apresenta a compilação dos resultados encontrados.

Tabela 7 - Valor da corrente eficaz de arco, de acordo com o método de extinção utilizado, no sistema de 500 kV

Caso	Compensação	Reator shunt (Ω)	Reator de neutro (Ω)	$I_{arc}(rms)$	t_d (ms)
1	-	-	-	50.912	1522
2	-	-	-	0.6	265
3	30%	3159.15	-	37.92	1198
4	30%	3159.15	7284	17.62	690
5	50%	2106.1	-	31.7	1042
6	50%	2106.1	506.07	14.8	620

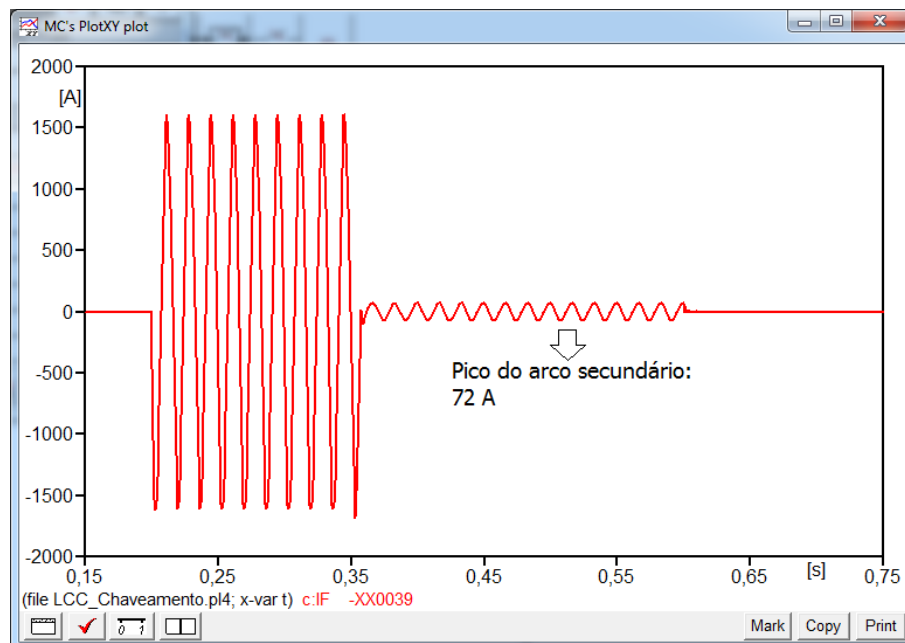
Fonte: O autor

Figura 31 - Caso 1 - Comportamento da corrente de falta sem esquema de redução de arco.



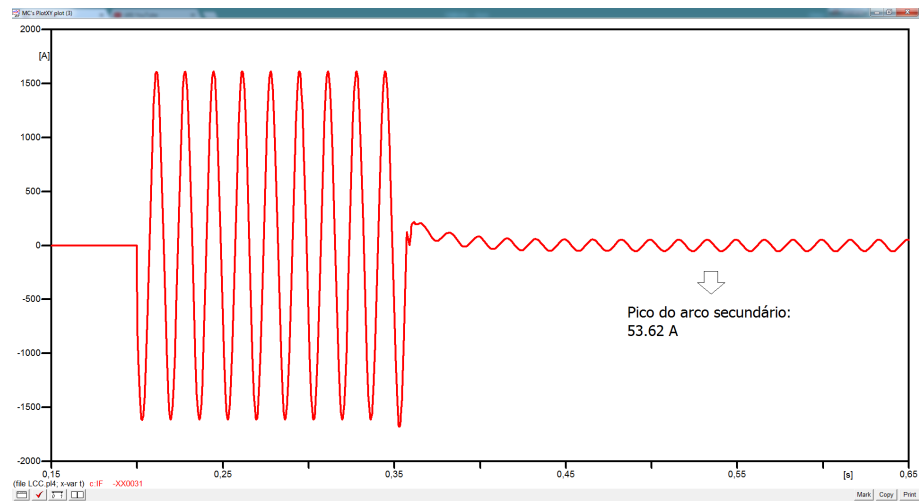
Fonte: O autor

Figura 32 - Caso 2 - Comportamento da corrente de falta, com a utilização dos HSGS



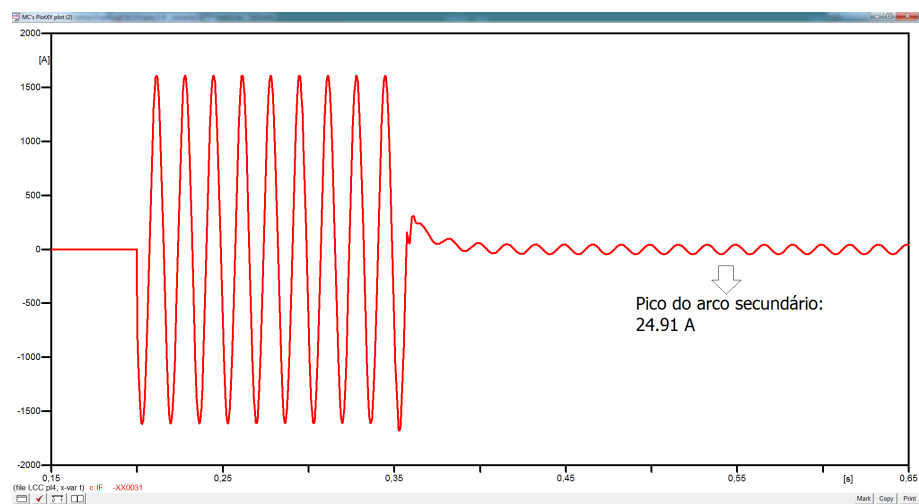
Fonte: O autor

Figura 33 - Caso 3 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 30%



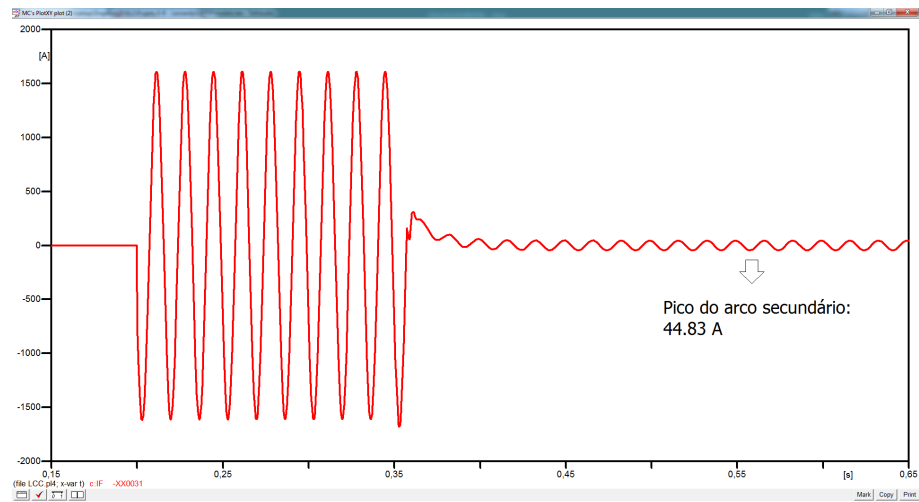
Fonte: O autor

Figura 34 - Caso 4 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 30% da linha e reator de neutro $X_n = 7.28k \Omega$



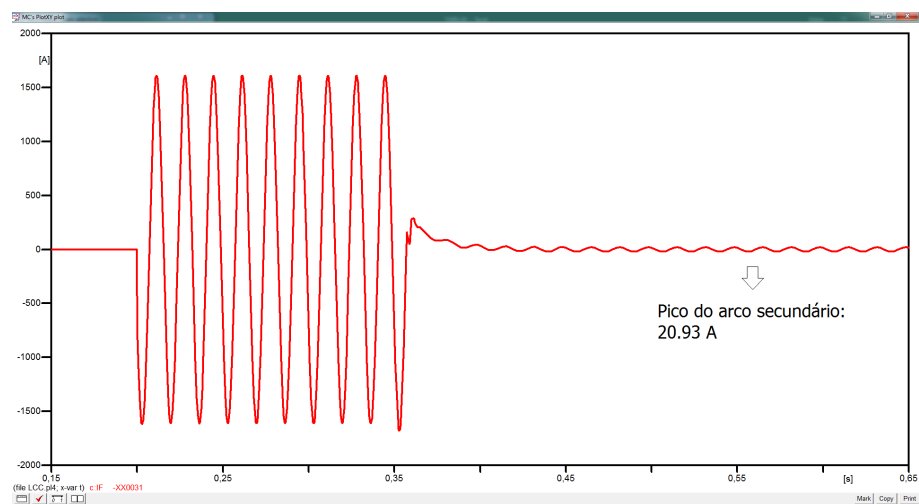
Fonte: O autor

Figura 35 - Caso 5 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 50% da linha



Fonte: O autor

Figura 36 - Caso 6 - Comportamento da corrente de falta, com compensação de 50% da linha e reator de neutro $X_n = 506.07 \Omega$



Fonte: O autor

3 DISCUSSÃO

Durante esse projeto foram encontrados diversos desafios até que se alcançasse um modelo que reproduzisse o fluxo de potência do sistema. Dentre esses, se destaca o modelo do transformador, que precisou de diversos ajustes para que se alcançasse o resultado necessário.

No sistema de 9 barras, o método de redução de arco com o uso de reator de neutro não foi aplicado. Isso se deve ao fato de não termos disponíveis as componentes de sequência zero do sistema. Isso demonstra a importância da componente de sequência zero em um defeito desequilibrado.

A escolha de se modelar um sistema de 2 barras a partir do diagrama da torre foi muito útil pois foi possível demonstrar como os compensadores reativos reduzem efetivamente o valor eficaz da corrente de arco secundário, contribuindo para a redução do tempo morto.

Uma limitação do trabalho foi a utilização de um modelo de impedância constante para o arco secundário, tendo em vista que o arco se propaga através do ar.

CONCLUSÃO

Neste projeto, foram apresentados métodos que auxiliam a reduzir o valor eficaz da corrente de arco secundário, de forma que, quanto menor for esse valor, em menos tempo pode ser realizado o religamento.

Nas simulações, demostramos que os métodos propostos são eficientes na redução do valor eficaz da corrente de arco secundário. Quanto menor for essa corrente, menor o tempo morto necessário para a deionização do arco, conseqüentemente, menor é o distúrbio propagado através do sistema.

Os métodos descritos podem ser adaptados a qualquer sistema, desde que o estado do sistema seja corretamente reproduzido no ATP.

Os resultados fornecidos pelo trabalho são uma aproximação inicial para a extinção do arco, pois o arco foi modelado como uma impedância constante. Uma análise dinâmica utilizando um modelo de impedância não linear do arco secundário é um estágio seguinte a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P.; FOUAD, A. *Power Systems Control and Stability*. 2. ed. [S.l.]: Wiley India Pvt. Limited, 2008.
- ATP rule book.
- BABU, G.; RAMESH, M. V. Secondary arc extinction of single pole auto-reclosing on ehv transmission lines with shunt compensation reactors. In: *2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 52–58.
- D’AJUZ, A. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento*. 1. ed. [S.l.]: Eduff, 1987.
- DANTAS, K. M. C. et al. Chaveamento controlado de linhas de transmissão: uma abordagem em tempo real via rtds. *Sba: Controle e Automação, Sociedade Brasileira de Automatica*, scielo, v. 22, p. 157 – 168, 04 2011. ISSN 0103-1759.
- EMTP reference models for transmission line relay testing. 2005.
- FERNANDES, A.; LIMA, A. C. S. de; SILVA, R. M. da. Religamento automático de linhas de transmissão: distinção dos resultados em função do modelo computacional utilizado. 2005.
- FONSECA, H. L. C. A. da; LEAL, M. F. Análise de transitórios eletromagnéticos utilizando o atpdraw. 2003.
- GOMEZ-ESPOSITO, A.; CONEJO, A.; CANIZARES, C. *Electric energy systems: analysis and operation*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 448 p.
- IEEE. Aplicação do programa emtp em sistemas elétricos de potência. 1993.
- NASHAWATI, E. et al. Impacts of shunt reactors on transmission line protection. 2011.
- NGAMSANROAJ, K.; TAYATI, W. An analysis of switching overvoltages in the egat 500 kv transmission system. In: *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 149–153.
- NYLÉN, R. Pamphlet rk 85-201 e. *ASEA Journal*, 1976.
- REGO, D. F.; ZEVALLOS, M. E. Simulação de falta monofásica na interligação nordeste-sudeste utilizando o atpdraw: Validação da manobra monopolar. 2012.
- SMEETS, R. et al. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 2015. 440 p.
- SOHN, S.-H. et al. Analysis of secondary arc extinction effects according to the application of shunt reactor and high speed grounding switches in transmission systems. v. 4, p. 324–329, 10 2014.

VALINHO, S. P. L. d. C. Religamento monopolar em linhas de transmissão : modelagem teórica e análise da utilização de reator de neutro como método redutor da corrente de arco secundário. 2007.

YUAN, L.; SUN, L.; WU, H. Simulation of fault arc using conventional arc models. *Energy and Power Engineering*, v. 5, n. 4B, p. 833–837, 2013.

ZADEH, M. R. D.; SANAYE-PASAND, M.; KADIVAR, A. Investigation of neutral reactor performance in reducing secondary arc current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p. 2472–2479, Oct 2008. ISSN 0885-8977.

ZEVALLOS, M. E.; TAVARES, M. C. Redução das correntes de arco secundário em sistemas de transmissão típicos. *Sba: Controle e Automação, Sociedade Brasileira de Automação*, scielo, v. 20, p. 373 – 382, 09 2009. ISSN 0103-1759.

ANEXO A – Memória de cálculo

A.0.1 Cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão

Linha 4-5

$$R_+ = 0.010 * 529 = 5.29 \, \Omega$$

$$R_0 = R_+ * 3 = 15.87 \, \Omega$$

$$X_+ = 0.085 * 529 = 44.96 \, \Omega$$

$$X_0 = L_+ * 3 = 134.88 \, \Omega$$

$$B_+ = 0.088 * 2 * 529 = 332.7 \, \mu S$$

$$B_0 = B_+ * 3 = 998.1 \, \mu S$$

Linha 9-8

$$R_+ = 0.0085 * 529 = 6.3 \, \Omega$$

$$R_0 = 18.9 \, \Omega$$

$$X_+ = 0.1008 * 529 = 53.3 \, \Omega$$

$$X_0 = 159.9 \Omega$$

$$B_+ = 0.1045 * 2 * 529 = 395 \, \mu S$$

$$B_0 = 1185.0 \, \mu S$$

Linha 7-8

$$R_+ = 0.0085 * 529 = 4.96 \, \Omega$$

$$R_0 = 13.48 \, \Omega$$

$$X_+ = 0.072 * 529 = 38.1 \, \Omega$$

$$X_0 = 114.3 \, \Omega$$

$$B_+ = 0.0745 * 2 * 529 = 282 \, \mu S$$

$$B_0 = 846 \, \mu S$$

Linha 7-5

$$R_+ = 0.032 * 529 = 16.92 \, \Omega$$

$$R_0 = 50.784 \, \Omega$$

$$X_+ = 0.153 * 529 = 85.16 \, \Omega$$

$$X_0 = 255.50 \, \Omega$$

$$B_+ = 0.153 * 2 * 529 = 578.4 \, \mu S$$

$$B_0 = 1735.2 \, \mu S$$

Linha 6-4

$$R_+ = 0.017 * 529 = 8.933 \, \Omega$$

$$R_0 = 26.8 \, \Omega$$

$$X_+ = 0.085 * 529 = 48.66 \, \Omega$$

$$X_0 = 146.04 \, \mu S$$

$$B_+ = 0.079 * 2 * 529 = 298.7 \, \mu S$$

$$B_0 = 896.1 \, \mu S$$

Linha 9-6

$$R_+ = 0.039 * 529 = 20.61 \, \Omega$$

$$R_0 = 61.93 \, \Omega$$

$$X_+ = 0.170 * 529 = 89.93 \, \Omega$$

$$X_0 = 269.79 \, \Omega$$

$$B_+ = 0.179 * 2 * 529 = 676.7 \, \mu S$$

$$B_0 = 2030.1 \, \mu S$$

A.0.2 Cálculo dos parâmetros dos transformadores

Transformador 1:

$$Z_{low} = \frac{16.2^2}{100} = 2.722 \, \Omega$$

$$X_{low} = \frac{2.722}{2} * 0.0576 * 3 = 0.235 \, \Omega$$

$$R_{low} = \frac{0.235}{1000} = 0.0002 \, \Omega$$

$$X_{high} = \frac{529}{2} * 0.0576 = 15.235 \, \Omega$$

$$R_{high} = \frac{15.235}{1000} = 0.0152 \, \Omega$$

Transformador 2:

$$Z_{Low} = \frac{18^2}{100} = 3.24 \, \Omega$$

$$X_{low} = \frac{3.24}{2} * 0.625 * 3 = 0.304 \, \Omega$$

$$R_{low} = \frac{0.304}{1000} = 0.0003 \, \Omega$$

$$X_{high} = \frac{529}{2} * 0.0625 = 16.531 \, \Omega$$

$$R_{high} = \frac{16.531}{1000} = 0.0165 \, \Omega$$

Transformador 3:

$$Z_{Low} = \frac{18^2}{100} = 1.904 \Omega$$

$$X_{low} = \frac{1.904}{2} * 0.0586 * 3 = 0.167 \, \Omega$$

$$R_{low} = \frac{0.167}{1000} = 0.0002 \, \Omega$$

$$X_{high} = \frac{529}{2} * 0.0586 = 15.5 \, \Omega$$

$$R_{high} = \frac{15.5}{1000} = 0.0155 \, \Omega$$

A.0.3 Cálculo dos parâmetros dos geradores

Gerador 1

$$V_{peak} = 1.04 * 16500 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 14011.08 \text{ V}$$

Gerador 2

$$V_{peak} = 1.025 * 18000 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 15064.36 \text{ V}$$

Gerador 3

$$V_{peak} = 1.03 * 13800 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 11549.34 \text{ V}$$

A.0.4 Cálculo dos parâmetros dos reatores (para o sistema 500 kV)

Potência reativa da linha:

$$Q = V^2 B = (500k)^2 * 1582.7\mu = 338.75 \text{ MVar}$$

Compensação a 30%:

$$X_{eq} = \frac{V^2}{PC * Q} = \frac{(500k)^2}{0.3 * 337.4M} = 3159.15 \text{ } \Omega$$

Reator de neutro:

$$X_n = \frac{\omega(C_1 - C_0)}{3F.\omega C_1 [\omega C_0 - (1 - F) . \omega C_1]} = \frac{377(4,1983 - 3,0596)\mu}{3.0,3.377,4,1883\mu.(377 * 3,05\mu - 0,7.377.4,2\mu)} = 7284.42 \text{ } \Omega$$

Compensação a 50%:

$$X_{eq} = \frac{V^2}{PC * Q} = \frac{(500k)^2}{0.5 * 337.4M} = 2106.1 \text{ } \Omega$$

$$X_n = \frac{\omega(C_1 - C_0)}{3F.\omega C_1 [\omega C_0 - (1 - F) .\omega C_1]} = \frac{377(4,1983 - 3,0596)\mu}{3.0,5.377,4,1883\mu.(377 * 3,05\mu - 0,5.377.4,2\mu)} =$$

$$= 506.07 \Omega$$

ANEXO B – Dados da linha de 500 kV

Condutores de fase:

- Bluejay 45x7 - ACSR
- Relação $T/D = 0.2$
- Resistência $CC = 0.051370 \Omega/\text{Km}$
- Diâmetro externo = 31.98 mm
- Diâmetro interno = 7.98 mm

Pára-raios:

- Guinea 12x7 ACSR
- Relação $T/D = 0.5$
- Resistência $CC = 0,35961 \Omega/\text{Km}$
- Diâmetro externo = 14,6 mm

Para ambos os condutores, considera-se:

- T: Espessura do condutor tubular
- D: Diâmetro do condutor externo