

**ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS



Desenvolvimento de Ferramenta
Computacional para Cálculo de MOV's para
Banco Série de Capacitores

Rodrigo Camilo Lima

PROJETO DE FORMATURA/2014

**ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS



PROJETO DE FORMATURA / 2014

Desenvolvimento de Ferramenta Computacional
para Cálculo de MOV's para Banco Série de
Capacitores

ALUNO: Rodrigo Camilo Lima
ORIENTADOR: Luiz Cera Zanetta Junior
COORDENADOR: Luiz Cláudio Ribeiro Galvão

*Dedico este trabalho à minha família
e aos meus amigos*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os envolvidos direta e indiretamente na execução deste trabalho e na minha vida nesse período. Muito obrigado!

Ao meu orientador Prof. Zanetta, muito atencioso, paciente e sempre preocupado com as contribuições.

Aos que trabalharam diretamente comigo, durante meu estágio e após, colegas deste projeto e incontáveis outros, Alberto, Berbel, Balzi, Katia, Zerbati, Flavio, Sonia, Fernando e Marcelo.

Aos professores e amigos que me ajudaram muito com sugestões e conselhos extraoficiais: Prof. Galvão, Prof. Cardoso, Prof. Komatsu e Prof. Eliane.

À família, meus pais Celia e Welinton, e meus irmãos Karolina, Felype, Giovana e Matheus pela paciência e suporte. Aos meus amigos de hoje e sempre Gollub, Raoni, Diego, Marcelo e Barbara, do Duplo Diploma e do 3A (Christopher, Simone, Danilo, Pierre). Aos colegas feitos na da POLI, por compartilharem dos bons e dos não tão bons momentos.

A Deus, por me dar o privilégio de encontrar, estudar, trabalhar e conviver com todas estas pessoas excepcionais.

RESUMO

Este trabalho apresenta conceitos de compensação de reativos em linhas de transmissão de alta tensão. Descreve os equipamentos e a função do banco de capacitores série. Propõe ferramenta computacional para calcular as correntes e tensões que recaem sobre o sistema de proteção um banco de capacitores série em linhas de transmissão de alta tensão. Determina a energia a ser absorvida por este equipamento de proteção. Conclui a aplicabilidade desta ferramenta para a estimativa da quantidade de colunas de MOV's utilizadas na proteção de um banco de capacitores séries e apresenta ressalvas à sua aplicação.

Palavras chave: Cálculo de MOV's. Proteção de bancos de capacitor série. Bancos de capacitores série. Compensação de reativos em linhas de transmissão.

ABSTRACT

This paper presents concepts of reactive compensation on high-voltage transmission lines; it describes the equipment and function of series capacitor bank. Furthermore, it proposes a computational tool to calculate currents and voltages on the protection system of series capacitor bank in high-voltage transmission lines and that tool determines the energy to be absorbed by this protective equipment. This paper concludes the applicability of this tool to estimate the amount of MOV's columns used in the protection of a series capacitor bank and it presents the limitations to its application.

Key words: MOV's calculations. Series capacitor banks protection. Series capacitor banks. Reactive compensation in high voltage transmission lines.

LISTA DE ABREVIATURAS OU SÍMBOLOS

BCS – Banco de Capacitores Série

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN – Sistema integrado Nacional

MOV – “Metal Oxide Varistor” (Varistor de Óxido Metálico)

LT – Linha de Transmissão

U_{lim} – Tensão Limite ao Banco de Capacitores Série

ATP – “Alternative Transient Program”

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de linha de transmissão compensada.....	16
Figura 2 - Sistema elétrico com compensação série e diagrama fasorial.....	19
Figura 3 - Característica de impedância do sistema elétrico.....	20
Figura 4 - Bancos de capacitores série mostrando as três fases instaladas em 500kV	21
Figura 5 - Diagrama simplificado de um BCS.....	21
Figura 6 - Unidade capacitiva típica e seu desenho esquemático (à direita).....	22
Figura 7 – Foto da gaiola protetora do spark gap a direita e dos terminais do spark gap	23
Figura 8 - Caminhos seguidos pelas correntes durante uma falta de curto circuito da linha ...	24
Figura 9 - Fotos de colunas de MOV de dois fabricantes diferentes	25
Figura 10 - Circuito de amortecimento e sinais de corrente e tensão que circulantes quando do disparo do spark	27
Figura 11 - Foto de um disjuntor de bypass.....	28
Figura 12 - Modelo de proteção dos capacitores série adotado	30
Figura 13 - Resultados gráficos de falta trifásica externa simulada em determinado ponto da linha não compensada. O gráfico apresenta a energia sobre o ramo dos MOV's, o status de condução do gap (ativado ou não), a potência instantânea na FASE A do banco e a tensão sobre a mesma fase	34
Figura 26 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto A	44
Figura 27 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto B.....	45
Figura 28 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto C.....	46
Figura 29 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto D	47
Figura 32 – Falta trifásica aplicada aos pontos MICO3, L1-04, COM31 e CO50- , esquerda para a direita, respectivamente	49
Figura 33 - Falta fase-terra aplicada aos pontos MICO3, L1-04, COM31 e CO50- , esquerda para a direita, respectivamente	50
Figura 34 - Listagem resultante da Análise de lotes dos pontos MICO3, L1-04, COM31 e CO50-, para faltas do tipo fase-terra e trifásica	50
Figura 35 – Gráficos das Energias no ponto L1_04 para falta trifásica e fase-terra	51
Figura 37 – Listagem dos resultados para faltas fase-terra e trifásica na linha MI - GU.....	52
Figura 40 - Curvas VI de uma coluna de MOV's e de apenas um disco e valores de corrente e tensão de.....	60
Figura 41 - Gráfico da energia absorvida por uma falta em um ponto da LT.....	60

Figura 42 - Gráfico do resfriamento do MOV e valores permitidos para reconexão do banco
em um caso..... 61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	10
1.1	Problemática	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Objetivos	12
2	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO:	13
2.1	Estudo do capacitor série e seus componentes.	13
2.2	Estudo do ATP	13
2.3	Estudo do modelo de BCS fornecido pela empresa.	13
2.4	Integração MATLAB ATP	13
2.5	Estudos de caso.....	14
3	O CAPACITOR SÉRIE	15
3.1	Aspectos teóricos.....	15
3.1.1	Capacidade de transferência	15
3.1.2	Taxa de compensação.....	16
3.1.3	Frequência de ressonância.....	17
3.1.4	Frequência de ressonância.....	18
3.2	Equipamentos	20
3.2.1	Unidades Capacitivas.....	22
3.2.2	Dispositivos Limitadores de Tensão	22
3.2.3	Spark Gap ou centelhador	23
3.2.4	Varistores de Óxido Metálico (MOV)	24
3.2.5	Circuito de Amortecimento.....	26
3.2.6	Disjuntor de derivação	27
3.2.7	Outros equipamentos	28
4	DADOS, PREMISSAS E CRITÉRIOS	29
4.1	Critérios utilizados para modelagem da proteção	31
4.2	Critérios utilizados para o cálculo da energia para especificação do MOV...32	
4.2.1	Faltas externas:	32
4.2.2	Faltas internas:	32
5	O PROGRAMA MOVcalc	33
5.1	Funcionalidade	33
5.2	Versões	34
5.2.1	Versão 0 - Script.....	34

5.2.2	Versão 1 – Interface Gráfica.....	35
5.2.3	Versão 1.1 – Interface Gráfica	38
5.2.4	Versão 2 – Interface Gráfica.....	39
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	42
6.1	Modelo Inicial.....	42
6.2	Modelo da Interligação Norte-Sul III/Trecho 2	48
6.3	Banco de Capacitores Rondonópolis 230kV	54
7	LIMITAÇÕES DA FERRAMENTA.....	57
8	CONCLUSÃO.....	58
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	59
	ANEXO	60

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O conceito de compensação de reativos é tratado com grande afinco no Brasil e no mundo recentemente, pois, o aumento crescente dos custos de construção de novas linhas de transmissão, juntamente com a dificuldade de conseguir novas áreas para as mesmas levou a uma busca pelo aumento da capacidade de transmissão das linhas existentes.

O uso de capacitores série para a compensação da reatância indutiva de linhas de transmissão longas provou ser um meio muito efetivo de aumentar a capacidade da transmissão de potencia (Coursol, et al., 1993). Esta técnica tem importantes vantagens se comparada à alternativas (D'Ajuz, et al., 1985):

- Aumento da capacidade de transmissão de potência do sistema;
- Aumento da estabilidade do sistema;
- Diminuição das necessidades de controle da tensão, pois propicia menor queda de tensão ao longo da linha;
- Melhor divisão de potência entre linhas, reduzindo as perdas globais do sistema;
- Economia nos custos, quando comparados com alternativas.

Ainda segundo D'Ajuz (1985), o capacitor série apresenta a peculiaridade de ser na realidade um sistema composto por diversos equipamentos que tem a função de exclusiva de proteger as unidades capacitivas contra sobretensões.

Varistores de óxidos metálicos (MOV), notadamente os varistores de óxido de zinco apresentam uma característica de resistência não linear que tem provado ser muito efetiva e confiável para proteção das unidades capacitivas e tem sido usada na grande maioria das montagens deste gênero como proteção primária, sendo gap (ou centelhador, as duas referências serão usadas neste texto) e disjuntor de derivação, proteções consideradas secundárias (Vedam, 2009).

1.1 Problemática

Sendo a compensação de reativos uma necessidade para o Sistema Integrado Nacional (SIN), devido a sua grande extensão e linhas que cobrem distancias cada vez maiores, o número de capacitores série a ser implementado tem crescido nos últimos anos.

Durante meu estágio na empresa ALSTOM Grid, presenciei quantidade crescente de ofertas, leilões para novas linhas e reforço para outras. Isto ocasionou discussão entre as diversas equipes da empresa e pudemos concluir que um dos gargalos do processo de ofertas é a definição da quantidade de colunas de MOV que serão ofertadas juntamente com um capacitor série, devido a sua atual utilização como proteção primaria das unidades capacitivas.

Em linhas gerais uma proposta que considere uma quantidade muito grande de MOV's será extremamente custosa e terá poucas chances de vencer perante leilões da forma que são conduzidos no Brasil hoje, por outro lado, uma proposta que não leve em consideração uma quantidade adequada de MOV's, poderá ter durante sua fase de projeto a necessidade de acréscimo dos mesmos, acarretando assim um decréscimo da margem de lucro do projeto, podendo levar até mesmo a um prejuízo financeiro.

Dada esta problemática, sugeriu-se a criação de uma ferramenta que pudesse calcular a quantidade de MOV's de maneira automatizada e sem a necessidade de um estudo aprofundado da rede em questão. Foram discutidas várias plataformas para efetuar estes cálculos e simulações, dentre elas destacaram-se Excel, PSCad e MATLAB[®], que deveriam utilizar-se de modelos de banco série da própria empresa, já modelados em ATP (*Alternative Transients Program*). Fez-se a opção pelo MATLAB[®], programa já adotado pela equipe de engenharia para algumas de suas simulações.

1.2 Justificativa

Este tipo de ferramenta é uma demanda da empresa para automatizar cálculos para sistemas de potência, mais especificamente para o capacitor série.

A decisão de se utilizar o MATLAB[®] vem do fato de sua robustez para o pré e pós-processamento dos dados, dentre eles o tratamento dos gráficos gerados pelo programa ATP, que executará efetivamente os cálculos de falta, acrescido de uma familiaridade dos alunos com esta ferramenta.

A escolha do ATP é baseada no fato do mesmo ser o programa oficial utilizado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) e ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica) em todo o Sistema Nacional Integrado, sendo este ultimo já modelado em linguagem ATP. Podemos ainda adicionar o fato de o modelo inicial do capacitor série fornecido pela empresa também ser modelado na referida linguagem.

1.3 Objetivos

De maneira coerente com a problemática e justificativa apresentadas este trabalho visa o *Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Cálculo de MOV's ("Metal Oxide Varistor") para Banco Série de Capacitores*. Em outras palavras, desenvolver uma ferramenta computacional que forneça a quantidade de MOV's necessários para um determinado banco de capacitores inserido numa determinada rede já existente. Sendo a meta, de maneira mais geral que o objetivo, automatizar parte de um processo do departamento de ofertas de uma empresa, de modo a diminuir flutuações de custo muito grandes devido ao calculo incorreto deste equipamento sem demandar na fase de propostas um estudo aprofundado do capacitor série e a rede ao seu redor.

Devemos sempre entender quantidade de MOV's, neste trabalho, como a energia máxima exigida que será aplicada a este equipamento em determinadas circunstâncias descritas mais adiante. Isto porque baseados nesta energia e nas características ambientais e de projeto de cada fabricante teremos uma quantidade diferente de colunas de MOV's.

Esta ferramenta será baseada no programa MATLAB[®], deverá ser capaz de interagir com o programa ATP e de calcular a energia que deverá ser absorvida pelo sistema de proteção primário, conjunto de MOV's, de um banco de capacitores série.

2 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO:

O desenvolvimento deste projeto necessitou de várias frentes de estudos, desenvolvimento e análise dos resultados descritos a seguir.

2.1 Estudo do capacitor série e seus componentes.

Durante o curso, este equipamento é apresentado como parte do sistema de transmissão, porém o mesmo não é aprofundado da forma necessária para o desenvolvimento deste projeto. Foi necessária dedicação para entendimento dos diversos subsistemas que compõe este equipamento, notadamente os MOV's.

2.2 Estudo do ATP

Embora o ATP seja utilizado em grande escala na modelagem do Sistema Nacional Integrado, durante o curso de graduação não fazemos nenhum tipo de programação direta ou modelagem no mesmo. Ele utiliza uma programação do tipo FORTRAN, que embora seja considerada uma linguagem de alto nível também é considerada uma das linguagens de primeira geração, o que dificulta muito a programação de laços (loop do tipo for, por exemplo). Logo o projeto envolveu um estudo neste tipo de linguagem para poder entender os tipos de modelos de capacitor série pré-existentes em seu *core*.

2.3 Estudo do modelo de BCS fornecido pela empresa.

Após o entendimento da linguagem ATP, pudemos compreender melhor o modelo fornecido pela empresa. Isto proporcionou, juntamente com o estudo da proteção presente neste arquivo e o estudo dos componentes do BCS, as bases de simplificação para o modelo até atingirmos o modelo a ser utilizado durante o projeto.

2.4 Integração MATLAB ATP

Embora estejamos familiarizados com o MATLAB[®], alguns pontos tiveram que ser retomados, sobretudo como chamar outros programas através dele em linha de comando para execução. Através de ações mais simples no início, conseguimos chegar ao ponto de chamar o

ATP e o PL42MAT, este último responsável pela conversão de arquivos do tipo .pl4 (resultado do ATP) para arquivos do tipo .mat (compreensível pelo MATLAB®)

2.5 Estudos de caso

Todas as etapas anteriores vencidas, fazem-se necessário estudos de caso que validem nosso processo. Optamos por uma primeira análise de dados provenientes de um modelo básico utilizando uma barra infinita e duas linhas paralelas conectadas a mesma, sendo que em uma dessas linhas temos o nosso modelo simplificado de banco série.

A segunda análise é feita com base em um caso real de um banco série que foi inserido no sistema do Mato Grosso em 2004/2005. Foi utilizado o mesmo arquivo ATP do modelo de banco série, assim como o modelo do sistema regional no qual ele foi inserido (modelo também da época). Os resultados foram comparados para que possamos ver a efetividade da nossa ferramenta computacional.

3 O CAPACITOR SÉRIE

O banco de capacitores série é utilizado para aumentar a capacidade de transferência de potência da linha de transmissão. Sua aplicação melhora a estabilidade transitória e de regime permanente do sistema de potência, divide a carga de maneira mais equilibrada entre os circuitos paralelos, reduz as perdas do sistema e a queda de tensão nas áreas de carga durante graves perturbações. O BCS reduz as distâncias elétricas entre as barras onde é conectado, diminuindo a reatância série da linha, aumentando assim a capacidade de transmissão de potência da linha seja para transmissão contínua ou seja para eventuais coberturas do sistema durante contingência grave.

O banco de capacitores série pode ser considerado parte da linha de transmissão, devido a estar continuamente energizado. Sua operação é totalmente automática, significando que, uma vez o banco de capacitores série tenha sido energizado, este permanecerá no circuito enquanto a linha estiver em serviço (dependendo da corrente mínima de linha). No caso da linha ser desenergizada, o banco de capacitores será automaticamente desviado (bypassado) e será novamente reinserido quando a linha for re-energizada.

Em caso de perturbações da linha, tais como faltas polifásicas ou monofásicas, ou em condições de sobrecarga que excedam os limites de projeto do banco de capacitores série (máxima energia sobre MOV), o banco será automaticamente desviado (bypassado) e, nos casos principais, também reinserido após a falha ter sido eliminada pela proteção de linha.

Os requisitos operativos para a linha de transmissão dependem das recomendações da concessionária. Entretanto, é comum a especificação solicitar um ou dois religamentos automáticos do BCS, em caso de faltas monofásicas. Em muitos casos, um religamento automático pode ser também solicitado em caso de falta polifásica. A especificação de religamento considera sempre o local da falta, especificando normalmente que o banco não seja bypassado para faltas externas ao mesmo.

3.1 Aspectos teóricos

3.1.1 Capacidade de transferência

A capacidade de transferência de potência de uma linha de transmissão, exemplificada na Figura 1, equipada com um BCS é dada pela Equação 1:

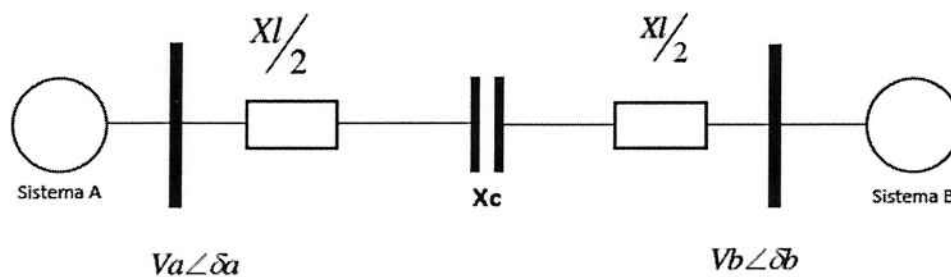


Figura 1 – Exemplo de linha de transmissão compensada

$$P = \frac{V_a \cdot V_b}{X_l - X_c} \cdot \text{sen}(\delta_a - \delta_b)$$

Equação 1 - Capacidade máxima de transferência de potência da linha

onde:

P – capacidade máxima de transferência de potência da linha.

V_a e V_b – magnitudes das tensões terminais de linha.

δ_a e δ_b – ângulos das tensões terminais V_a e V_b , respectivamente

X_l – reatância indutiva entre as voltagens terminais.

X_c – reatância do banco de capacitores série.

3.1.2 Taxa de compensação

A taxa ou grau de compensação de um BCS está na faixa de 25 a 70% da indutância da linha de transmissão a ser compensada. Os fatores que podem limitar o grau de compensação são os transitórios de chaveamento (sobretensões transitórias), ressonância subsíncrona e estabilidade sub-harmônica.

A taxa de compensação série instalada tem sido tradicionalmente limitada a valores inferiores a 70%, devido principalmente ao seu potencial para estabelecer, sob certas condições especiais, oscilações entre a rede elétrica e os sistemas torsionais (eixos) das

unidades geradoras. Valores de compensação abaixo de 25% não são economicamente viáveis.

$$S\% = \frac{Xc}{Xl} \cdot 100$$

Equação 2 - Taxa de compensação

onde:

$S\%$ – taxa de compensação do BCS

Xc – valor da reatância capacitiva do BCS

Xl – valor da reatância indutiva da linha de transmissão.

3.1.3 Frequência de ressonância

O BCS introduz um valor de reatância capacitiva em série com indutância da linha de transmissão, formando deste modo um circuito ressonante série, onde a frequência de ressonância é dada pela equação:

$$fr = f \cdot \sqrt{\frac{Xc_{1\phi}}{Xl}}$$

Equação 3 – frequência de ressonância

onde:

fr – frequência de ressonância do circuito.

f – frequência do sistema de energia

$Xc_{1\phi}$ – valor por fase da reatância capacitiva do BCS.

Xl – valor da reatância indutiva total da linha incluindo geradores e cargas conectadas ao final da linha.

O valor da frequência de ressonância é geralmente de valor menor que a frequência do sistema sendo desse modo denominado de ressonância subsíncrona.

Dependendo das características da rede elétrica, das máquinas geradoras e da taxa de compensação, podem ocorrer oscilações subsíncronas de grande amplitude nas máquinas geradoras, predominantemente nas térmicas e/ou surgir oscilações entre o sistema elétrico e o sistema mecânico (torsional) dos geradores, com possibilidades de sérios danos para o sistema de geração. Esse tipo problema deve ser investigado durante a execução dos estudos de dimensionamento e definição do sistema de potência, verificando se existe a possibilidade de sua ocorrência, não só para as condições mais críticas de falta, mas também para pequenos distúrbios do sistema de potência.

No passado, condições de ressonância causavam graves danos nas máquinas geradoras, principalmente no sistema mecânico, cisalhando o eixo do gerador entre outras destruições. Portanto, um estudo detalhado deve ser considerado quanto o BCS for instalado em uma linha de transmissão principalmente quando esta instalação for próxima de unidades térmicas de geração

3.1.4 Frequência de ressonância

A compensação série apresentada a seguir consiste no emprego de uma fonte controlada de reativos conectada em série com a linha de transmissão.

A Figura 2 propõe uma compensação série constituída por um capacitor que compensa parte da potência reativa indutiva da linha, ou seja :

$$X_e = X_l - X_c,$$

Equação 4

X_e - Impedância equivalente da linha compensada

X_l - Reatância indutiva série da linha

X_c - Reatância do capacitor série

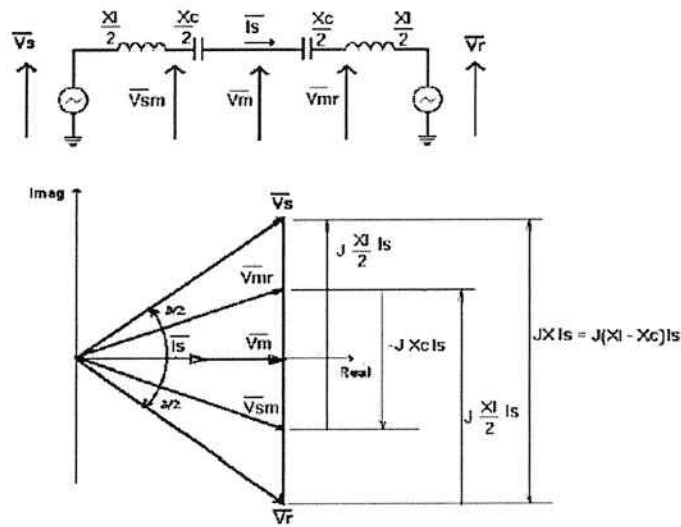


Figura 2 - Sistema elétrico com compensação série e diagrama fasorial

Assim, das equações 2 e 4, temos

$$X_e = X_l(1 - s),$$

O fasor que representa a corrente na linha (I_s) está sobre o eixo real, conforme ilustra a Figura 2.

A partir da equação da corrente de linha sem compensação e do valor da impedância equivalente da linha com compensação série, obtém-se o novo valor da corrente da linha.

$$I_s = \frac{2V}{X_l(1 - s)} \text{sen} \frac{\delta}{2} \angle 0^\circ$$

Da equação da potência elétrica e da expressão da impedância X_e , obtém-se a nova equação para a potência transmitida:

$$P_s = \frac{V^2}{X_l(1 - s)} \text{sen} \delta$$

Deve-se lembrar que a tensão da fonte controlada está em quadratura com a corrente I_s . Dessa forma, o valor da potência ativa fornecida pela fonte é nulo. Por outro lado, a potência reativa fornecida pelo compensador depende da taxa "s" de reativos que se deseja compensar, ou seja:

$$Q_{sc} = X_c |I_s|^2 = \frac{2V^2}{X_l} \frac{s}{(1 - s)} (1 - \cos \delta)$$

A Figura 3 apresenta as curvas de potência ativa transmitida e da potência reativa fornecida pelo compensador série em função do ângulo de potência (δ) e para algumas taxas (s) de compensação reativa. Dessa figura pode-se concluir, por exemplo, que para uma compensação de 30% ($s = 0.30$) da potência reativa da linha, a potência ativa máxima é incrementada de 43%, ($P_S = 1,43 \cdot V^2 / X_l$) enquanto que a potência reativa do compensador para este ponto de máximo ($\delta=90^\circ$) vale $1.22 \cdot V^2 / X_l$.

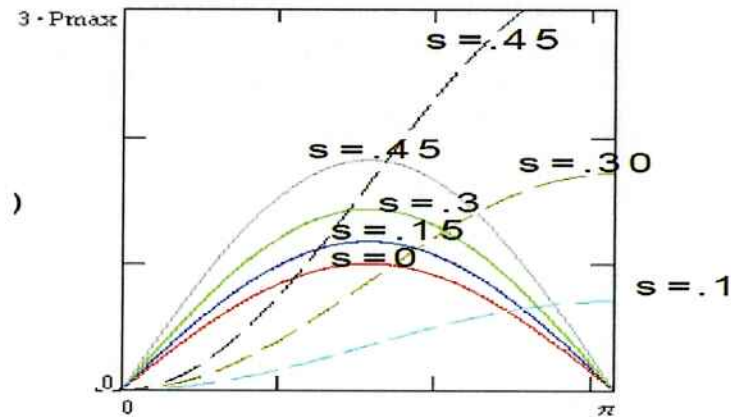


Figura 3 - Característica de impedância do sistema elétrico

3.2 Equipamentos

Sendo o objetivo maior deste relatório a metodologia aplicada e os resultados obtidos no trabalho desenvolvido, não nos alongaremos muito na descrição dos componentes do capacitor série, deve notar-se no entanto que a compreensão deste nos tenha tomado parcela importante do tempo nos primeiros meses. Descreveremos seus componentes, nos detendo um pouco mais na descrição dos MOV's, pois a compreensão dos mesmos é essencial para o trabalho.



Figura 4 - Bancos de capacitores série mostrando as três fases instaladas em 500kV

Observamos na Figura 4 um capacitor série onde se pode ver as três fases do sistema ligadas em 500kV enquanto que na Figura 5 temos o diagrama monofásico de um capacitor série, com a representação de seus componentes básicos. Grosso modo, com exceção dos capacitores, os outros componentes têm função de proteção para estes.

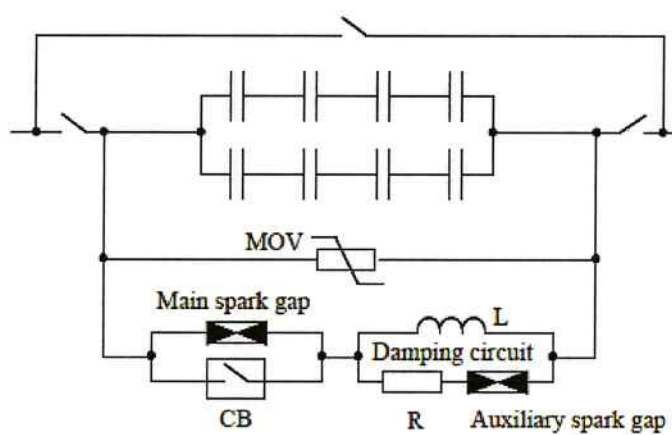


Figura 5 - Diagrama simplificado de um BCS

3.2.1 Unidades Capacitivas

Uma unidade capacitiva (também chamada lata ou célula) é na verdade um conjunto formado pela associação série/paralelo de capacitores individuais. As unidades capacitivas de um banco série são projetadas para atender especificações de tensões, correntes, condições ambientais, etc., do banco e conseqüentemente podem variar muito entre projetos.

Apresentamos na Figura 6 uma unidade capacitiva típica e seu desenho esquemático.

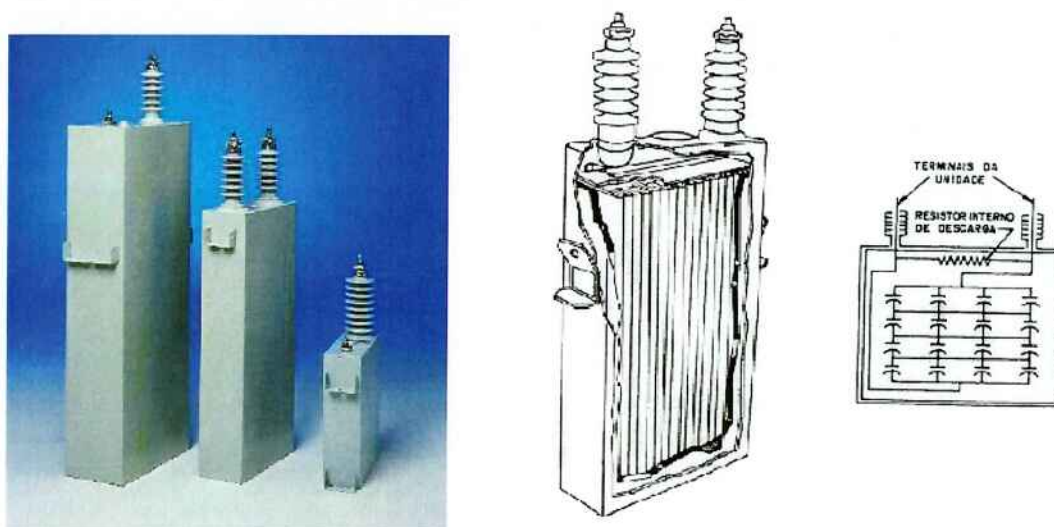


Figura 6 - Unidade capacitiva típica e seu desenho esquemático (à direita)

3.2.2 Dispositivos Limitadores de Tensão

Durante a operação normal, o capacitor série está sujeito a corrente transiente de manobras e correntes de falta que resultam em picos de tensão transiente através dos capacitores e dos equipamentos da plataforma. A magnitude e duração destes picos de tensão são parâmetros essenciais no projeto do capacitor série.

MOV's e spark gaps utilizados sozinhos ou em combinação são conectados em paralelo com o capacitor série para controlar a magnitude e duração das sobretensões. O método de proteção de sobretensão selecionado deve considerar um número de fatores que incluem corrente transitória de manobra e correntes de sobrecarga, operação do sistema, manutenção, capacidade de reinserção, magnitude da falta, ciclo da falta e fatores econômicos.

Ambos spark gap e MOV precisam ser protegidos contra o excesso de utilização durante um determinado tempo. Para os spark gaps isso significa excessivo tempo de condução medido em ciclos e para varistores a medida é tipicamente a energia (D'Ajuz, et al., 1985). Sobretensões e energia dissipada no MOV resultantes de correntes de falta são críticas no projeto do equipamento

3.2.3 Spark Gap ou centelhador

O spark gap, gap, ou centelhador, tem a função de proteger o capacitor diminuindo abruptamente a tensão sobre o mesmo e promovendo um caminho alternativo para a corrente. Spark gaps podem ser projetados para operar dependendo da tensão entre seus terminais ou ser induzido a conduzir por um circuito de disparo.

O circuito de disparo utiliza grandezas como energia dos varistores, amplitude de corrente, e taxas destas grandezas para determinar a operação do gap. Este, após operação, necessita ser deionizado para restaurar a rigidez dielétrica antes de o capacitor série ser reinserido no circuito.



Figura 7 – Foto da gaiola protetora do spark gap a direita e dos terminais do spark gap

3.2.4 Varistores de Óxido Metálico (MOV)

O MOV, como todo varistor, é um resistor não linear dependente da tensão em seus terminais. Ele limita a sobretensão temporária sobre o capacitor, conduzindo o excesso de corrente que passa pela linha naquele momento, geralmente causada por alguma falta, e que de outra forma causaria uma excessiva tensão sobre o capacitor (ilustrado na Figura 8). Esta condição ocorre em cada meio ciclo durante a condição de sobrecorrente da linha, até o disjuntor paralelo de by-pass fechar ou o gap conduzir. A tensão máxima resultante no capacitor depende da característica não linear tensão-corrente do varistor e da amplitude da sobrecorrente (no anexo 1 apresentamos algumas curvas típicas de um MOV).

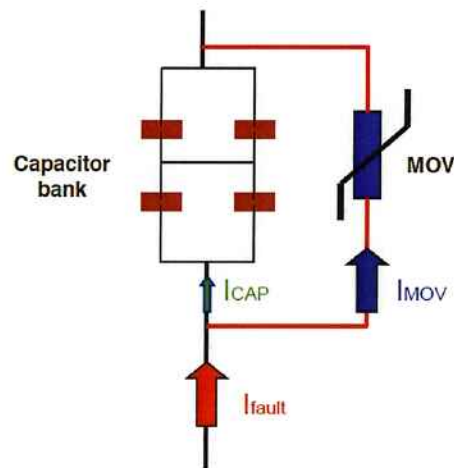


Figura 8 - Caminhos seguidos pelas correntes durante uma falta de curto circuito da linha

Devido à tensão no varistor aumentar com o aumento da corrente, o máximo nível de proteção é geralmente definido como o sendo a máxima corrente esperada no varistor durante uma falta do sistema (é esta definição que permite que este trabalho seja feito). A energia é absorvida pelo MOV durante a condução da corrente e a seleção da capacidade de absorção de energia é um aspecto importante do sistema de proteção do capacitor série.

A seleção do nível de proteção do varistor deve levar em conta a tensão associada com as várias correntes de não falta que passam pelo capacitor para condições normais, emergenciais e de manobra. O MOV deve ser capaz de resistir a estas tensões absorvendo a energia de falta para as mais desfavoráveis temperaturas ambiente.

A tensão associada às manobras é geralmente a de mais alto valor para tensão de não falta que o capacitor série e o varistor devem resistir (Coursol, 1993). Sendo assim, ela pode ser o fator determinante para o estabelecimento do nível de proteção. Um nível baixo de proteção pode significar que o MOV terá uma importante condução e absorção de energia durante uma manobra, necessitando um varistor com um nível de energia maior. A absorção de energia pode ser reduzida com um aumento o nível de proteção do MOV, no entanto, o projeto do capacitor esta sujeito a mudar devido à sobretensões maiores.



Figura 9 - Fotos de colunas de MOV de dois fabricantes diferentes

A escolha do nível de proteção pode também ser influenciada pela sua relação com os requerimentos de energia do MOV para faltas externas. Tipicamente, um nível mais baixo aumenta a absorção de energia. Este fator, mais a preferência do projetista e outras considerações do sistema de potência fazem parte do escopo do nível de proteção. Outro item a ser considerado é a ressonância subsíncrona, visto que a amplitude da tensão de grandes

oscilações subsíncronas é limitada pelo varistor. Em aplicações onde este tipo de consideração é concernida, há uma preferência por baixo nível de proteção.

O MOV é projetado com capacidade de absorção de energia que deve ser consistente com condições antecipadas de faltas do sistema. Além disso, outros fatores críticos determinando as características requeridas de um MOV são a impedância do sistema, a duração da falta, e a sequência de religamento dos disjuntores da linha de transmissão em que o capacitor está conectado, com essas informações a corrente do varistor e energia absorvida podem ser determinadas.

Em sistemas mais complexos, simulações computacionais são necessárias para determinar adequadamente o ciclo de trabalho do MOV. Tipicamente, este será projetado para resistir uma corrente e energia associadas com específicas faltas externas, isto, para que o capacitor série, na linha sem faltas, continue em serviço durante a falta e no período crítico de pós-falta para melhorar a estabilidade do sistema.

Faltas internas próximas ao capacitor série podem causar correntes muito mais altas no MOV, isto é verdadeiro especialmente se a instalação estiver localizada no fim de uma linha próxima a uma subestação com uma alta corrente de curto-circuito. Neste caso, a proteção do capacitor série, tipicamente incorpora um gap em paralelo para fazer um bypass no capacitor série rapidamente. O gap reduz grandemente a energia requerida pelo MOV, no entanto, este deve resistir à alta corrente de falta até o gap entrar em operação.

Em tais aplicações, a velocidade para o gap começar a conduzir é um fator importante no projeto do MOV, se a instalação estiver localizada fora da linha de transmissão, o ciclo de trabalho dele para uma falta próxima ao banco é substancialmente menor que a mesma aplicação no fim da linha (mas muito maior que para uma falta externa). Isto faz a velocidade de bypass menos importante.

3.2.5 Circuito de Amortecimento

Os efeitos da descarga do capacitor série, após um disparo do spark gap, ou o fechamento de um disjuncto de derivação, devem ser rapidamente reduzidos para a segurança das unidades capacitivas, do gap e do disjuncto.

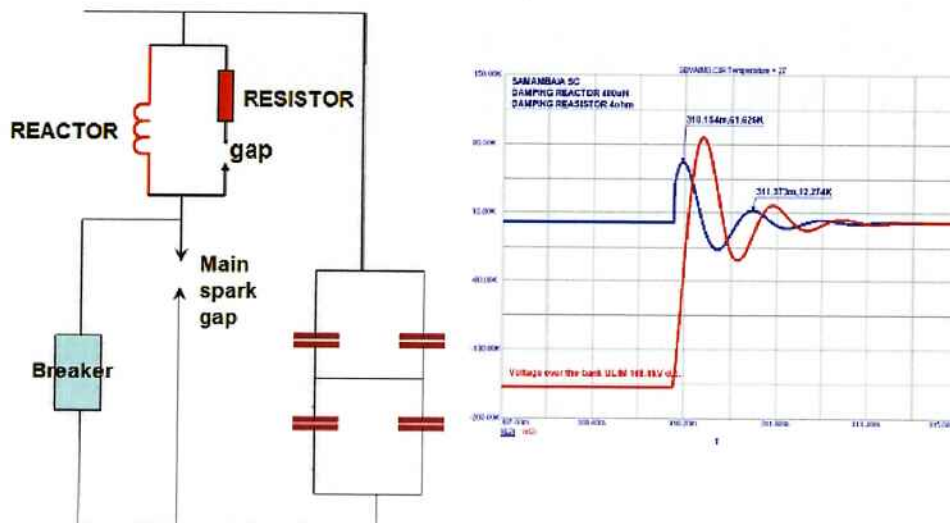


Figura 10 - Circuito de amortecimento e sinais de corrente e tensão que circulantes quando do disparo do spark gap

Para essa função se utiliza o circuito de amortecimento, que consiste de um reator em paralelo com um resistor.

O objetivo do pequeno gap em série com o resistor é inserir o resistor somente na ocorrência de sobretensões, isto é, durante o transitório de descarga, não introduzindo perdas adicionais em caso de necessidade de operação com o capacitor curto-circuitado

3.2.6 Disjuntor de derivação

Este disjuntor é solicitado em duas condições: para extinguir o arco, curto-circuitando o gap, sob condição de corrente de defeito ou para curto-circuitar o banco de capacitores (por contingências onde o gap não tiver atuado) quando correntes de descarga, de alta frequência e amplitude, podem ocorrer.

Devido a isso ele deve apresentar pequena capacidade de abertura, alta-tensão de restabelecimento e alta corrente de fechamento (corrente de descarga no capacitor série) diferente mente dos disjuntores de linha.



Figura 11 - Foto de um disjuntor de bypass

3.2.7 Outros equipamentos

Outros equipamentos como transformadores de corrente, coluna de sinal, para-raios, indicadores, medidores, relés, fontes... não serão abordados neste relatório por não serem o foco deste projeto, porém foram estudados e analisados, mesmo que superficialmente em alguns casos, por exemplo, não entramos no mérito de relés de proteção ou da coordenação da mesma com o resto do sistema, bem como a coordenação de isolamento.

4 DADOS, PREMISSAS E CRITÉRIOS

Cada um dos elementos do capacitor série tem que ser modelado matematicamente para que possamos utiliza-los nas simulações desejadas. Nesse aspecto o programa ATP (*Alternative Transients Program*) já traz em seu *core* esses elementos, restando coloca-los cada um em seu lugar da malha a ser simulada e acrescentar os elementos de proteção e controle.

Neste ponto, vale ressaltar que o ATP possui dois módulos distintos para programarmos esses elementos do nosso modelo, o TACS e o MODELS, ambos tem maneira de programação distinta no ATP, com respeito à sintaxe e blocos pré-estabelecidos. Apesar disso, para as necessidades do nosso modelo, ambas podem ser utilizadas.

O modelo inicial utilizado foi o modelo cedido pela empresa na qual fiz meu estágio. Este modelo é um modelo de um equipamento real, portanto contanto com a modelagem de todos os elementos reais e do sistema de proteção completo do BCS e é utilizado para a simulação de estudo de caso real, de forma a comparar os resultados obtidos, com os resultados fornecidos pela empresa.

Por este se tratar de um trabalho acadêmico de graduação, alguns dos sistemas de proteção e equipamentos não foram levados em consideração e criamos um modelo simplificado a ser adotado no trabalho para os cálculos relativos ao modelo de barra infinita. O modelo do BCS apresenta os sistemas de proteção MOV e Spark Gap, enquanto que o disjuntor de by-pass não foi simulado, pois não tem função para a análise da quantidade de energia que deve ser absorvida pelo MOV.

Os sinais a serem processados, deste novo modelo, são apresentados na Figura 12 a seguir:

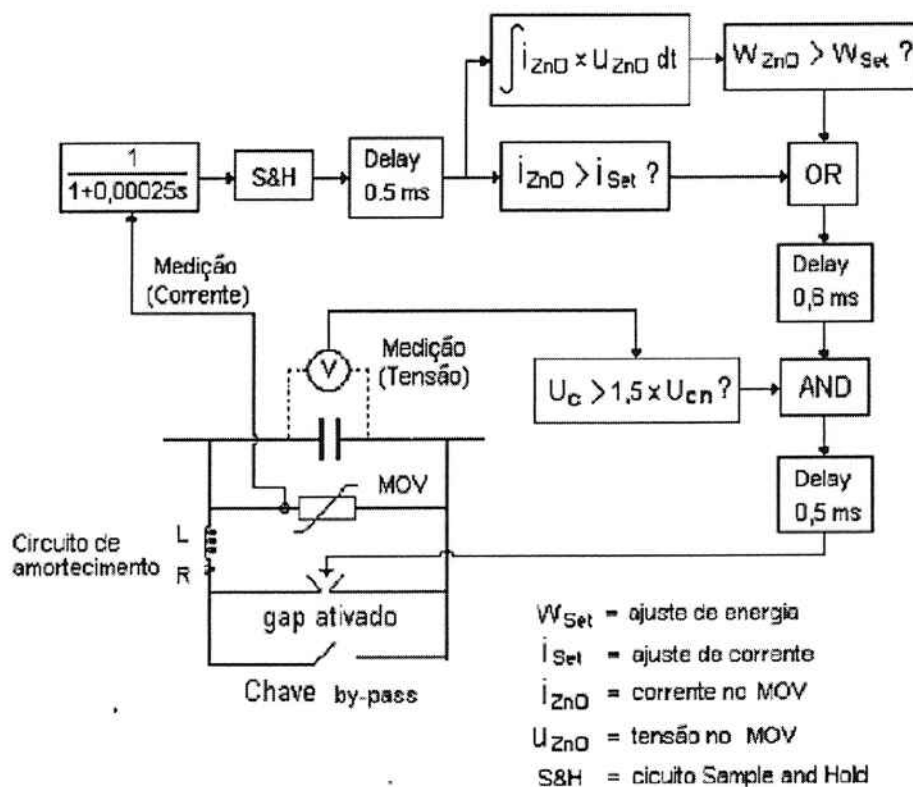


Figura 12 - Modelo de proteção dos capacitores série adotado

Podemos observar nessa figura que devido ao atraso na medição de corrente, para que o modelo se aproxime o máximo possível da realidade deve-se considerar uma função de atraso com constante de tempo de 0,25ms. São apresentados blocos “delay” referentes aos atrasos inerentes ao processo de cálculo e de envio de pulso para ativar o gap. Esses atrasos somam, no total, de 1,6 ms.

O bloco integrador tem a função de obter a energia nos MOV's. A corrente que percorre este ramo multiplicada pela tensão, também no ramo, é a potência instantânea desenvolvida no varistor e quando integrada no tempo, resulta na energia durante a falta. Essa energia é comparada com a *energy set* (W_{set}) cujo valor é ajustado com a máxima energia esperada para a pior condição de falta externa. Simultaneamente, é efetuada comparação da corrente no varistor com a “corrente set” (I_{set}), que é a máxima corrente de curto esperada nos varistores para as faltas externas. A decisão de ativar o gap só ocorre se for satisfeita uma das condições mencionadas; a energia ou a corrente maior que os seu correspondentes valores set de ajuste. Para garantir que o gap seja acionado somente para faltas internas, a decisão de ativá-lo é, ainda, condicionada à existência de uma tensão mínima de 1,5 vezes a tensão nominal do capacitor série.

No caso do gap ser ativado por superação de energia máxima admissível, significa que a falta interna é remota, isto é, o ponto de falta está afastado do capacitor série. O tempo necessário para essa ativação ocorrer é o tempo necessário para a energia calculada, por integração, atingir a máxima energia admissível (W_{set}) mais 1,6ms, tempo relativo ao atraso na medição. Por outro lado, se o gap for ativado por corrente, significa uma falta interna, isto é, provavelmente o ponto de falta está próximo à subestação, devendo o capacitor série ser imediatamente curto-circuitado para preservar a sua integridade. O tempo mínimo necessário, considerando a medição e a ativação, é praticamente de 1,6 ms. Essa seletividade de proteção visa evitar ao máximo a ativação do gap curto-circuitando o capacitor, preservando a sua integridade, para que, durante a manobra de religamento, o capacitor série esteja inserido no sistema concorrendo no auxílio à manutenção de estabilidade no sistema.

4.1 Critérios utilizados para modelagem da proteção

Para definição dos critérios a serem adotados foram utilizadas as normas NBR 8763 (1998) e IEC 60143-1 (2004), além dos Procedimentos de Rede do ONS. Adotando-se a posição mais rigorosa, temos que para o dimensionamento da proteção:

1. É permitida a atuação do gap de proteção do capacitor série somente para as faltas internas. Definem-se as faltas internas aquelas que ocorrem na linha de transmissão da instalação do capacitor série. As demais faltas são denominadas de faltas externas.
2. MOV de proteção do capacitor série deve estar dimensionado para suportar a máxima energia desenvolvida tanto durante uma falta externa quanto falta interna.
3. Para efeito de dimensionamento do MOV considera-se o seguinte ciclo de abertura e religamento, sem sucesso, dos disjuntores de proteção da linha para a operação de eliminação de uma falta (externa ou interna):
 - a. Abertura tripolar dos disjuntores de linha t_m ms após a aplicação da falta. ($t_m = 100$ ms para $V_N \geq 345$ kV e 150 ms para $V_N < 345$ kV)
 - b. Religamento, sem sucesso, 500 ms após a abertura dos disjuntores de linha. A manobra de religamento é efetuada sempre pelo lado do disjuntor de linha mais próximo do capacitor série.
 - c. Abertura tripolar do disjuntor t_m ms após o início da manobra de religamento.

4.2 Critérios utilizados para o cálculo da energia para especificação do MOV

No cálculo da energia máxima desenvolvida nos varistores consideram-se as faltas externas e internas.

4.2.1 Faltas externas:

Para a pior condição de falta externa são calculadas a energia (E_{ext}) e a corrente de curto-circuito máxima (I_{ext}). Esses dois parâmetros são utilizados para o ajuste da proteção do banco de capacitores.

4.2.2 Faltas internas:

Com a proteção ajustada com os parâmetros E_{ext} e I_{ext} , é calculada a máxima energia (E_{int1}) nos varistores com o gap sendo ativado por critério de corrente, isto é, com aplicação de uma falta próxima ao banco de capacitores. A energia desenvolvida nos MOV's quando o gap é ativado pelo critério de energia (E_{int2}), falta remota, é calculada como sendo a soma de E_{ext} mais a maior energia desenvolvida nos MOV's na manobra de religamento sem sucesso, devida a uma falta interna.

Esta metodologia simplificada para o cálculo de E_{int2} é justificada pela dificuldade de realizar simulações com aplicação de curtos-circuitos em diferentes pontos da linha, com o objetivo de maximizar a energia. Esse procedimento simplificado de cálculo conduz a resultados conservadores.

Define-se a energia de especificação do varistor a maior energia entre E_{ext} , E_{int1} e E_{int2} , acrescida de um fator de segurança especificado pela concessionária.

5 O PROGRAMA MOV CALC

5.1 Funcionalidade

Para execução deste projeto foram utilizadas duas plataformas computacionais, o programa Matlab® e o programa ATP. O objetivo foi fazer um programa codificado em linguagem Matlab® capaz de fazer o pré e o pós-processamento da simulação a ser efetuada utilizando o ATP.

O programa MOVcalc então faz a leitura do arquivo original contendo rede e modelo, cria uma cópia acrescentando os parâmetros de simulação modificados na interface gráfica do programa, e envia para o ATP, para que este faça a(s) simulação(os) desejada(s).

O resultado do ATP é gerado no formato PL4, que não é diretamente interpretado pelo Matlab®. Para fazer-se o pós-processamento, o MOVcalc utiliza uma ferramenta *OpenSource* chamada PL42MAT que é capaz de converter os arquivos de saída do ATP (.pl4) em arquivos nativos do Matlab® (.mat). Concluída esta etapa de conversão o MOVcalc apresentará então o resultado sobre a energia a ser especificada para o conjunto de MOV's.

É facultativa a visualização de pontos escolhidos do circuito onde foram simuladas as faltas (pontos estes, indicados pelo usuário). Na Figura 13 temos um exemplo típico dos gráficos gerados para um determinado ponto de falta do sistema (falta trifásica externa). Note o gráfico de condução do spark gap com sinal igual a 0, este gráfico apresentará valores igual a 1 ou 0, no caso do modelo utilizado, indicando que o gap esta conduzindo ou não, respectivamente.

Durante o processo inicial, os tipos de faltas simuladas foram fase – terra, dupla fase – terra, e faltas trifásicas. A Figura 13 apresenta o resultado de uma das primeiras versões do MOVcalc para a fase A, caso sintá-se a necessidade de visualizar as outras fases, poderemos fazer uma simples reprogramação de uma função do programa principal.

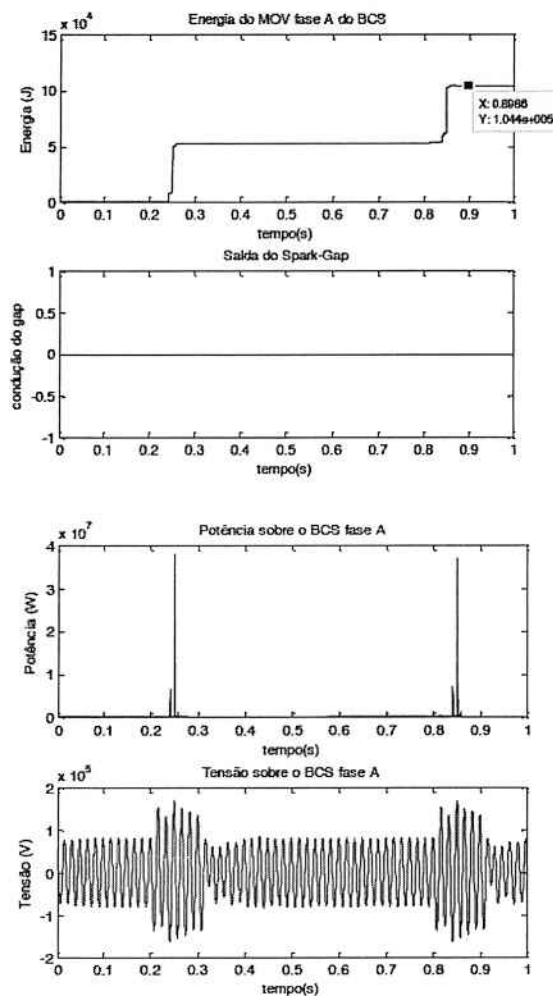


Figura 13 - Resultados gráficos de falta trifásica externa simulada em determinado ponto da linha não compensada. O gráfico apresenta a energia sobre o ramo dos MOV's, o status de condução do gap (ativado ou não), a potência instantânea na FASE A do banco e a tensão sobre a mesma fase

5.2 Versões

O MOVcalc, desde o início do projeto, passou por diversas versões de apresentação e funcionalidades. Estas modificações se deram, inicialmente, por conta discussões com o professor orientador visando facilidade para o usuário e com a familiarização do aluno com a programação de interface gráfica do Matlab outras mudanças foram propostas. Lembramos no entanto, que a função básica do MOVcalc se mantém a mesma desde sua primeira versão.

5.2.1 Versão 0 - Script

Esta versão, apresentada no final do primeiro semestre de trabalho, não apresentava interface gráfica, nada mais sendo do que um script Matlab para executar as funções

programadas. Qualquer mudança no nome de arquivo, ou nó em que ocorria a falta deveria ser escrito diretamente no código.

Na Figura 15, podemos ver a indicação do arquivo de entrada, no entanto primeiro precisamos mudar o diretório de trabalho e depois escolher o nome do arquivo a ser utilizado, o que não é prático ou intuitivo para um usuário leigo em linguagem de programação Matlab.

```
% clear workspace
clear
%for f=1.05:0.15:1.65
% changing directory
cd C:\EEUG05\ATPDRAW\ATP
%Open existing ATP archive and create a string variable for
modifications
saida =
char(textread('BcofaltV_final.atp','s','delimiter','\n','whitespace',
','));
```

Figura 15 - Indicação de nome de arquivos de entrada

```
%Modify ATP archive and preserve the base archive for future
iterations
fid = fopen('Bcoserie.atp','w');
dist='RAVEA'; %choses what node of the grid is going to be grounded
B, C, D or E
```

Figura 14 - Indicação do nó em que ocorre a falta

Na Figura 14, temos a indicação do ponto em que ocorre a falta (ponto a ser aterrado), temos o mesmo problema que no caso anterior, falta de praticidade e instintividade.

Estes pontos começaram a ser eliminados a partir da versão 1.

5.2.2 Versão 1 – Interface Gráfica

Neste ponto foi decidido por uma interface gráfica, de forma a facilitar a entrada e saída de nomes de arquivos e do ponto de falha, bem como a exibição dos gráficos de resultado. Procurou-se adotar o padrão Windows para abrir e salvar arquivos, visto que a grande maioria de usuários está adaptada ao mesmo.

Vemos na Figura 16 o primeiro esboço da interface, criada utilizando a ferramenta GUIDE específica para a criação de interfaces gráficas. Já nas Figura 17 e Figura 18, podemos ver a interface já em pleno funcionamento para buscar o arquivo fonte e salvar o

arquivo de saída. Esta interface já executa a mesma função do programa em sua versão 0, e ao acionarmos o botão “Gráficos” temos como saída o que se vê na Figura 19.

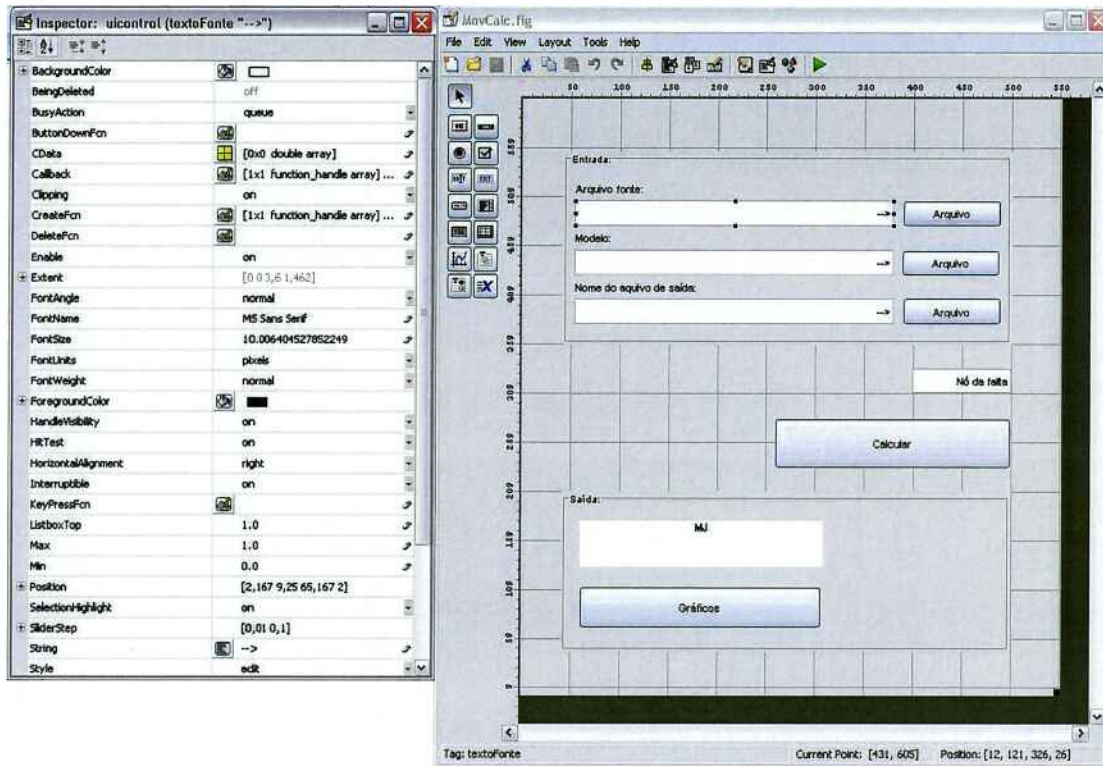


Figura 16 - Ferramenta para criação de interfaces gráficas do Matlab (GUIDE)

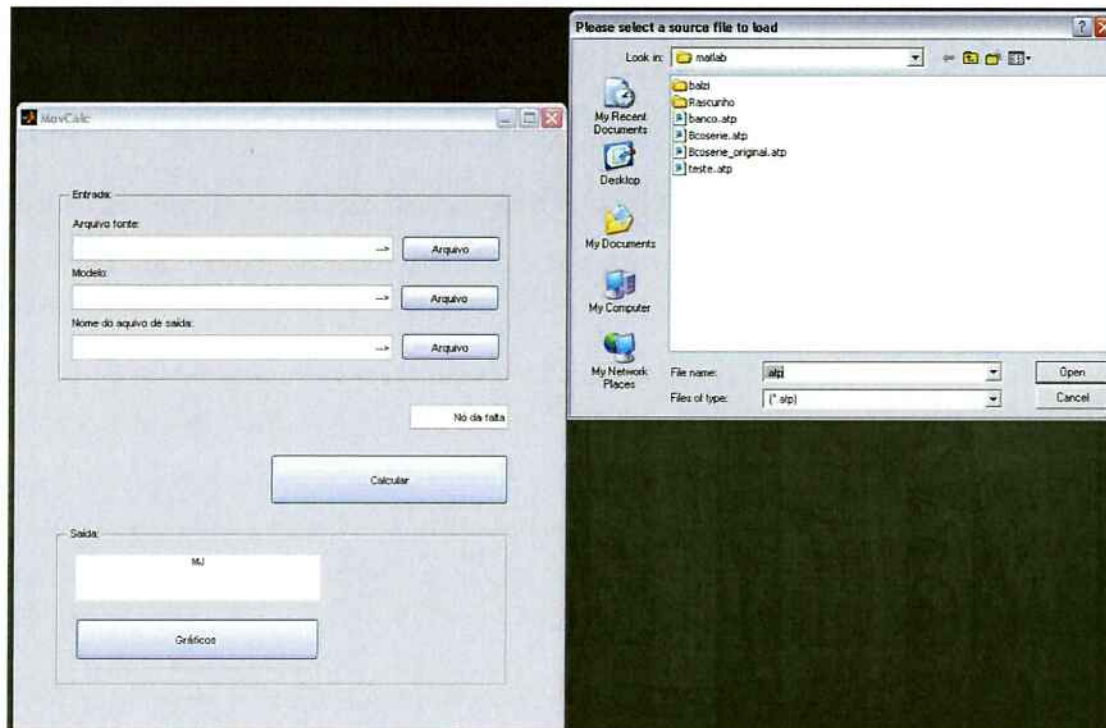


Figura 17 - Interface sendo executada após comando de abertura de arquivo, notar a janela para escolha do arquivo fonte.

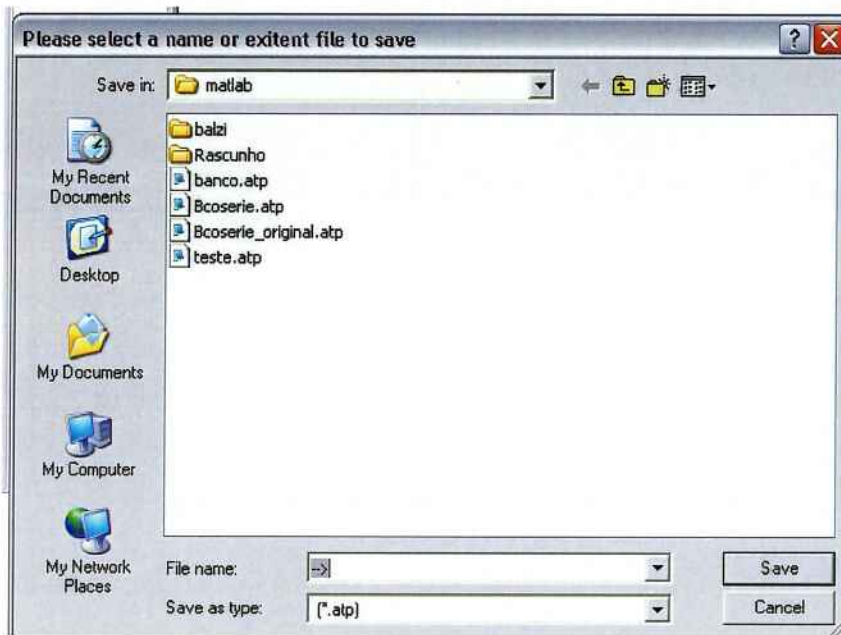


Figura 18 - Pop up para salvar o arquivo de saída (que será rodado pelo ATP)

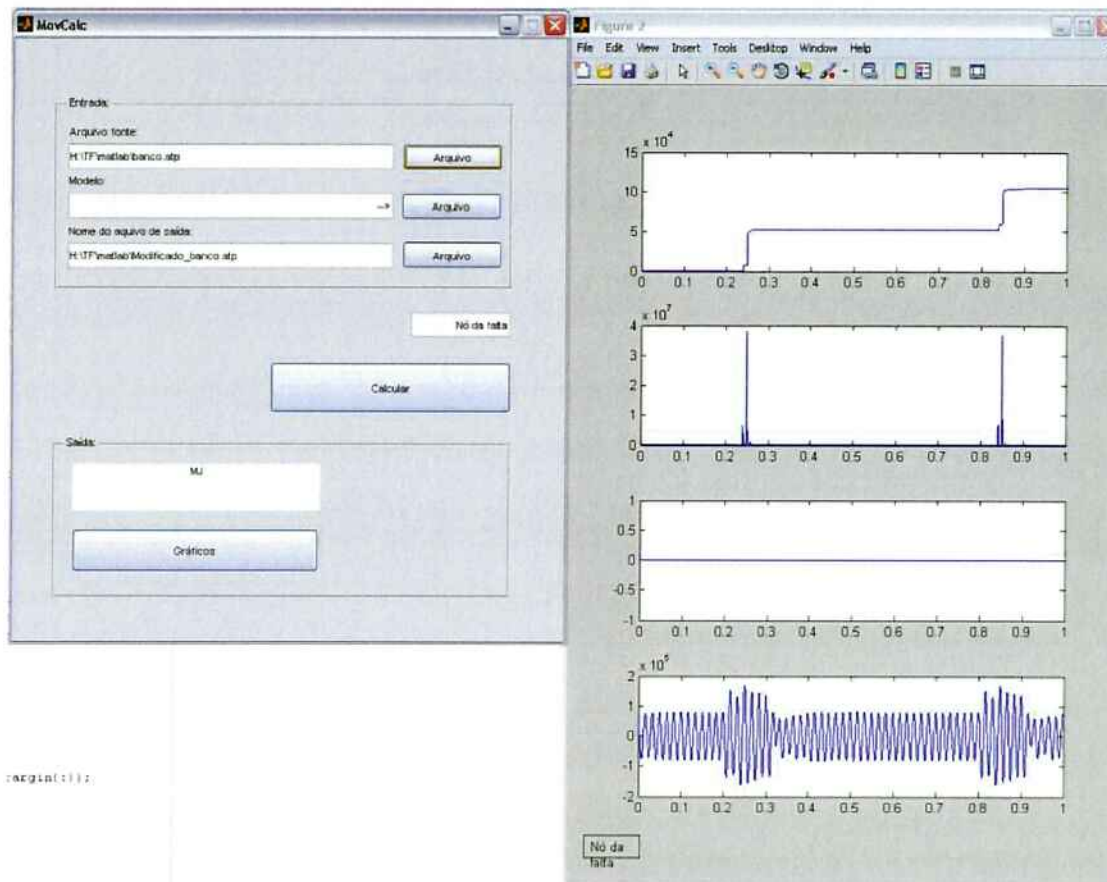


Figura 19 - Interface gráfica, mais gráficos plotados após o acionamento do botão "Gráficos".

5.2.3 Versão 1.1 – Interface Gráfica

Vemos a Interface desta versão na Figura 20. Temos notadamente mais casos de trabalho, isto é, mais nós que serão aterrados sequencialmente, para melhor análise (por exemplo, através da comparação).

Ao clicarmos no botão “Gráficos”, temos, agora, a plotagem de todos os casos numa mesma imagem (para que a comparação seja facilitada).

Houve um acréscimo de no numero de linhas de código, saindo de pouco menos de 100 linhas para mais de 400, e que ainda deverão ser aumentadas, visto as diversas funções ainda a serem adicionadas.

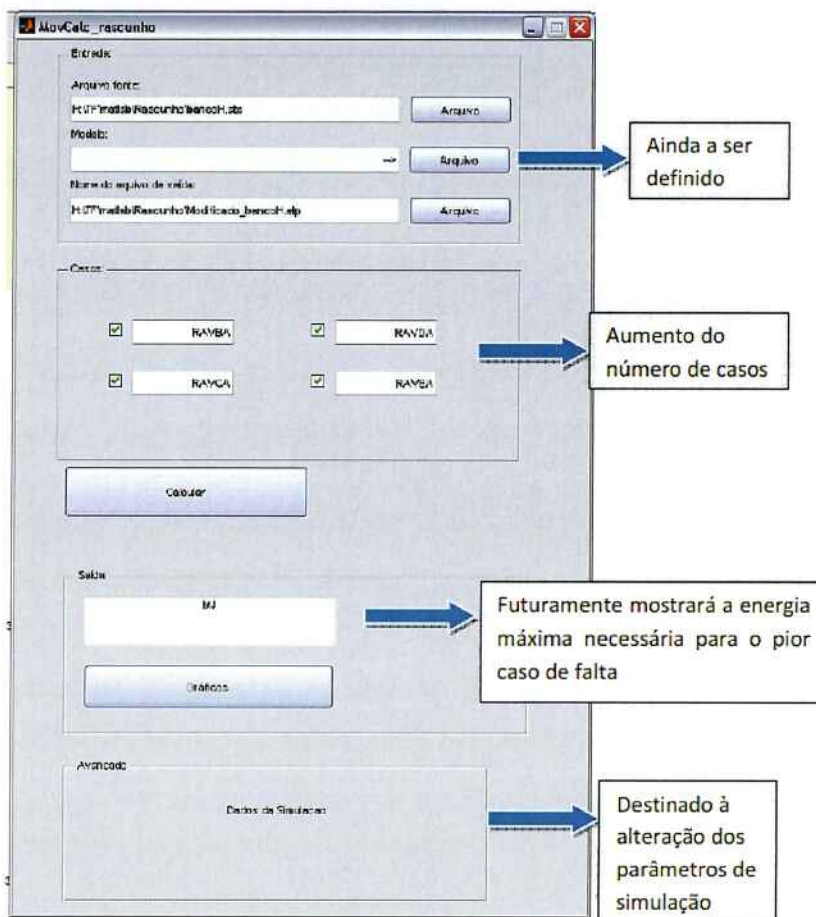


Figura 20 – Nova interface de trabalho, notar o aumento do número de casos e área destinada aos parâmetros no futuro.

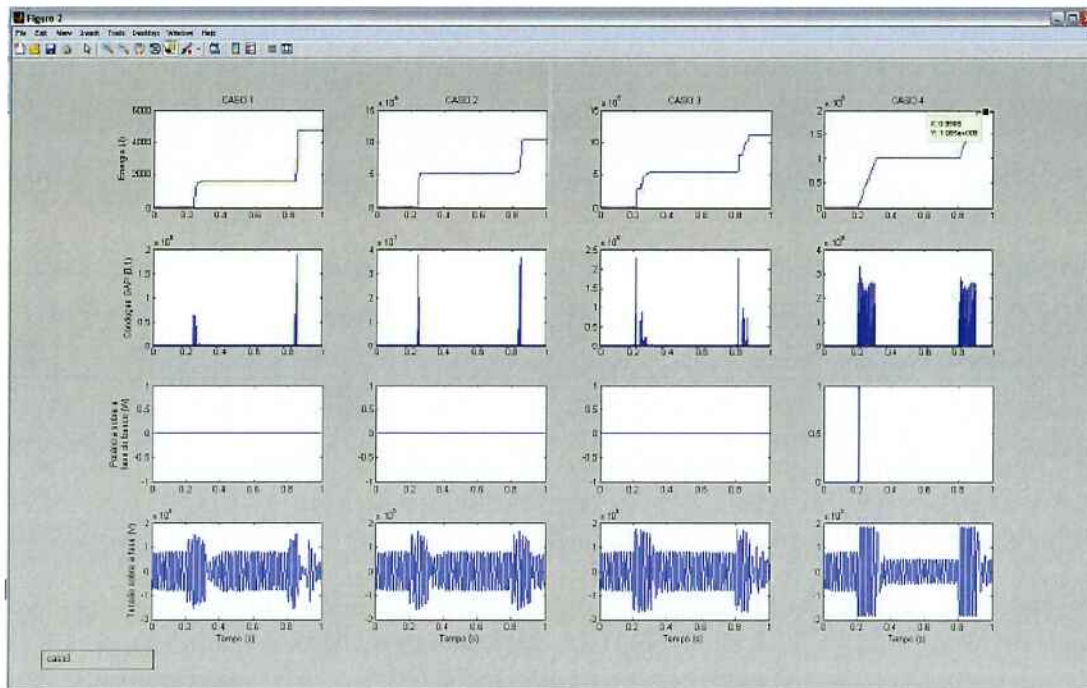


Figura 21 - Resultados comparados da ultima versão de trabalho do programa

5.2.4 Versão 2 – Interface Gráfica

A corrente versão do programa, Figura 22, adicionou à sua interface, além da análise gráfica, uma análise de lote, onde uma sequencia de pontos de falta a serem analisadas é digitada, separando-se os mesmos por ponto e virgula, e esses pontos são simulados gerando no final uma tabela de resultados e não somente os gráficos da análise anterior. Desta forma temos que os as duas análises são complementares

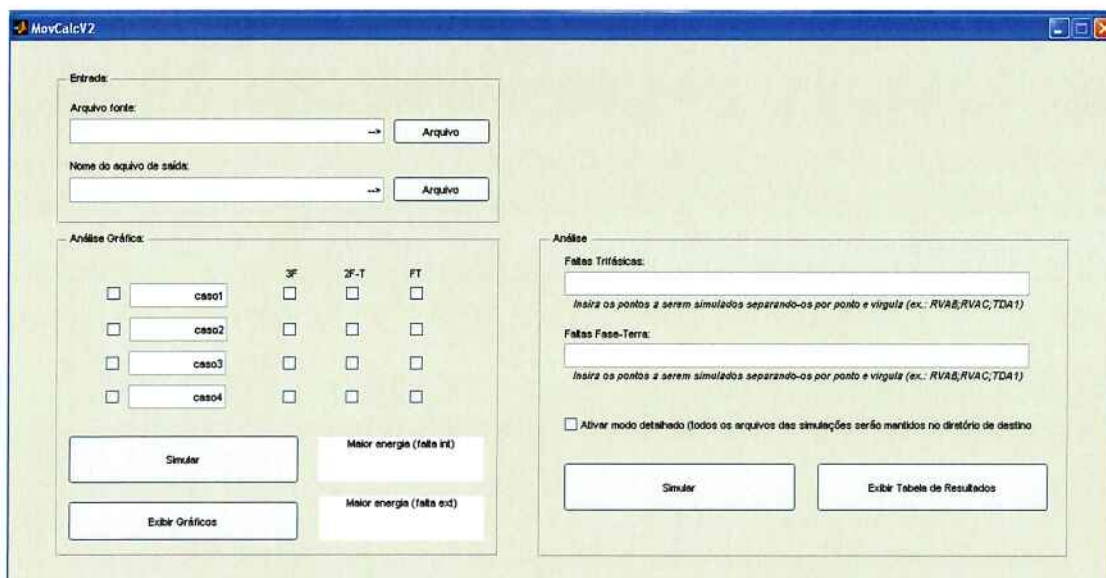


Figura 22 – Versão atual do programa, contendo a análise gráfica e a análise de lote

O layout da parte gráfica também foi alterado, de forma a facilitar a visualização das curvas mais relevantes, a saber, Energia acumulada no MOV, status de condução do GAP e tensão sobre os capacitores/MOV (visto que os dois se encontram em paralelo). Estas modificações podem ser vistas na **Error! Reference source not found.**

Por fim, na **Error! Reference source not found.** temos um exemplo da listagem fornecida pelo MOVcalc após Análise de Lote, nesta listagem conseguimos visualizar os valores máximos de energia para cada uma das fases, em cada um dos pontos de falta.

Especificamente para a Análise de Lote são consideradas apenas as faltas fase-terra e trifásicas, numa análise mais minuciosa, deveríamos levar em consideração também faltas de dupla-fase terra e as manobras do sistema.

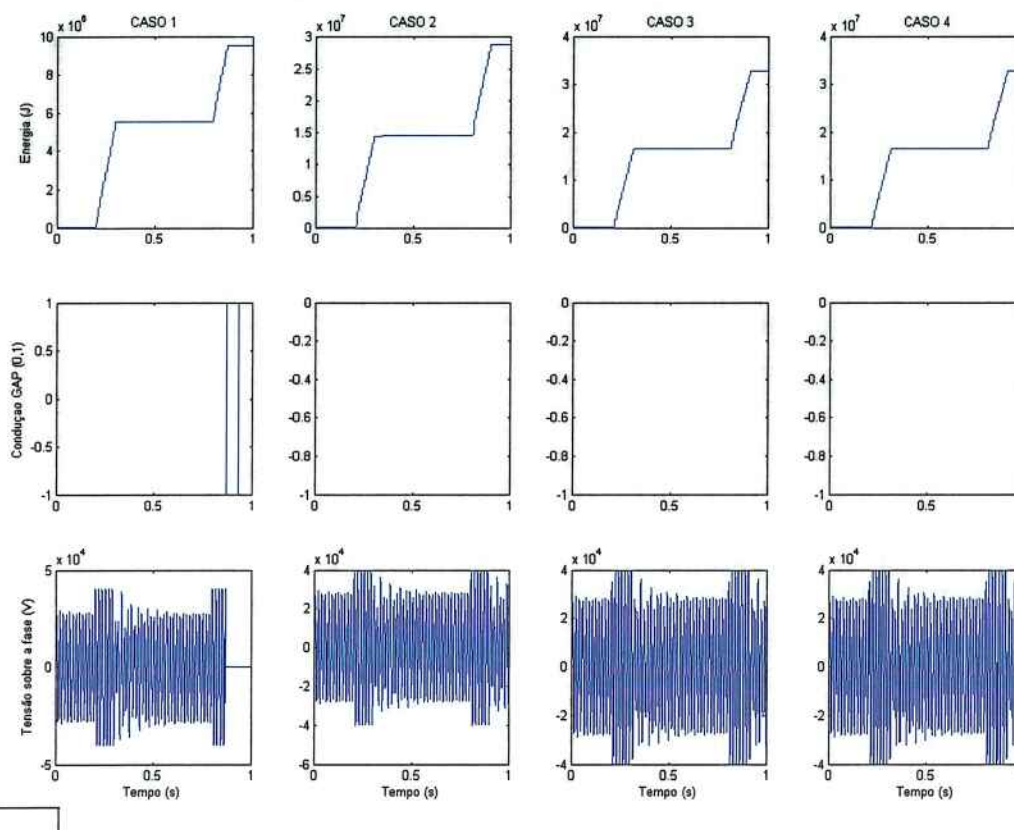


Figura 23 - Nova estrutura de gráficos com sem a curva de potencia instantânea sobre o MOV

```

resultado.txt - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

FALTA TRIFASICA
Pontos      fase A(J)      fase B(J)      fase C(J)
MICO3      8.641377000E+06  2.880459000E+06  2.880459000E+06 - falta interna
COM31      3.291398800E+07  9.874196800E+07  9.874196800E+07 - falta externa
L1_04      2.878692400E+07  8.636076800E+07  8.636076800E+07 - falta externa
CO50-      3.291398800E+07  9.874196800E+07  9.874196800E+07 - falta externa
GU50-      8.956964000E+06  2.985654750E+06  2.985654750E+06 - falta interna
L2_04      2.151520500E+06  7.171735000E+05  7.171735000E+05 - falta interna
MIG31      8.641377000E+06  2.880459000E+06  2.880459000E+06 - falta interna
MI50-      8.641377000E+06  2.880459000E+06  2.880459000E+06 - falta interna

FALTA FASE-TERRA
Pontos      fase A      fase B      fase C
MICO3      9.513005000E+06  3.171001750E+06  3.171001750E+06 - falta interna
COM31      3.291398800E+07  9.874196800E+07  9.874196800E+07 - falta externa
L1_04      2.878692400E+07  8.636076800E+07  8.636076800E+07 - falta externa
CO50-      3.291398800E+07  9.874196800E+07  9.874196800E+07 - falta externa
GU50-      8.956964000E+06  2.985654750E+06  2.985654750E+06 - falta interna
L2_04      2.151520500E+06  7.171735000E+05  7.171735000E+05 - falta interna
MIG31      9.513005000E+06  3.171001750E+06  3.171001750E+06 - falta interna
MI50-      9.513005000E+06  3.171001750E+06  3.171001750E+06 - falta interna

O ponto que solicita maior energia do MOV durante falta interna é o ponto MICO3 =
9.513005000E+06 J - falta monofasica

O ponto que solicita maior energia do MOV durante falta externa é o ponto COM31 =
9.874196800E+07 J - falta trifasica

```

Figura 24 – Resultados emitidos pelo MOVcalc em formato texto

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Foram realizadas diversas simulações com a ferramenta MOVcalc ao longo da preparação do projeto de formatura. Neste relatório apresentaremos os três casos mais relevantes: modelo inicial, Interligação Norte-Sul III/trecho2, BSC Rondonópolis 230kV

6.1 Modelo Inicial

Para simulação inicial foi desenvolvida uma pequena rede baseada num dos exemplos do Apedra. Esta rede simples corresponde a duas barras, interligadas por duas linhas em paralelo. Estas linhas inicialmente são idênticas, mas para desenvolvimento do trabalho foi adicionado um capacitor série no ponto central da linha 1, compensando 50% da impedância da linha. A mesma pode ser visualizada na Figura 25

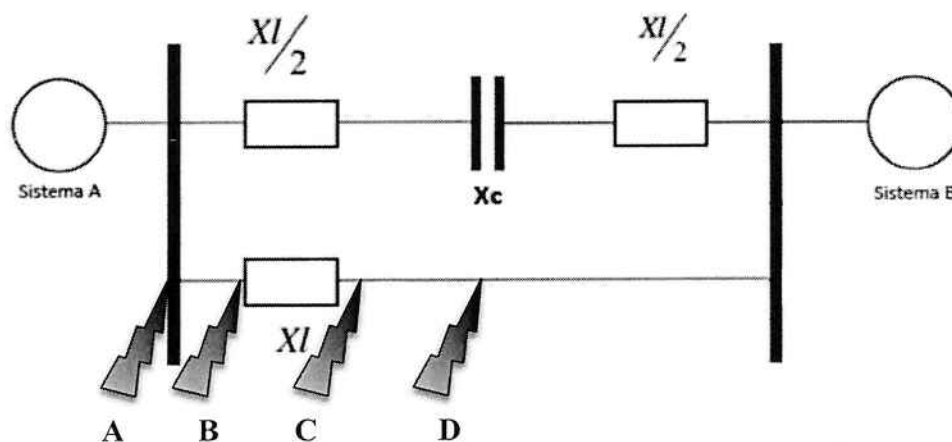


Figura 25 – Caso a ser simulado, onde o ponto A representa uma falta interna e os demais pontos faltas externas

Nestas duas linhas de transmissão foram colocadas diversas chaves seccionadoras trifásicas que servem para simular as faltas. Foram colocadas duas chaves em série em cada ponto para podermos empregar o critério de religamento proposto pela ONS para determinação da quantidade de energia que deve ser absorvida pelo MOV.

Foram geradas faltas nos pontos A, B, C e D representados na Figura 25, pois os demais pontos não tinham representatividade por se tratarem de pontos muito distantes ou de mesma distância ao banco em relação aos já estudados.

Como podemos observar na Figura 26, temos que o gráfico da saída do Gap atinge o valor binário 1 o que corresponde ao acionamento do mesmo. Isto se dá, pois uma falta

ocorrida no ponto A representa uma falta interna ao BCS, e como já foi discutido neste trabalho, o MOV deve atuar sem auxílio das demais proteções apenas para casos de faltas externas como veremos abaixo. Vale lembrar que para o modelo em ATP utilizado neste caso prevê uma saída binária para o acionamento do Gap, quando ela for 0 o Gap não atua e quando for 1 ele atuará (nas seções 6.2 e 6.3 a saída do para o acionamento do Gap será -1 ou 1)

Caso semelhante ocorre para a Figura 27, pois no modelo não há impedância entre este ponto e a barra do Sistema A, desta forma se dá um crescimento muito alto da corrente e energia no MOV, que faz com que o Gap dispare.

Nas Figura 28 e Figura 29, podemos ver que a medida que o local da falta se distancia do BCS temos cada vez uma energia menor a ser absorvida pelo MOV até o limite do ponto da médio da linha 2, a partir deste ponto a energia volta a aumenta até chegarmos ao barramento do Sistema B.

Este foi o primeiro modelo estudado, para que nos familiarizássemos tanto com o ATP, quanto o ATP, além de retomar alguns conceitos da matérias de Sistemas de Potência.

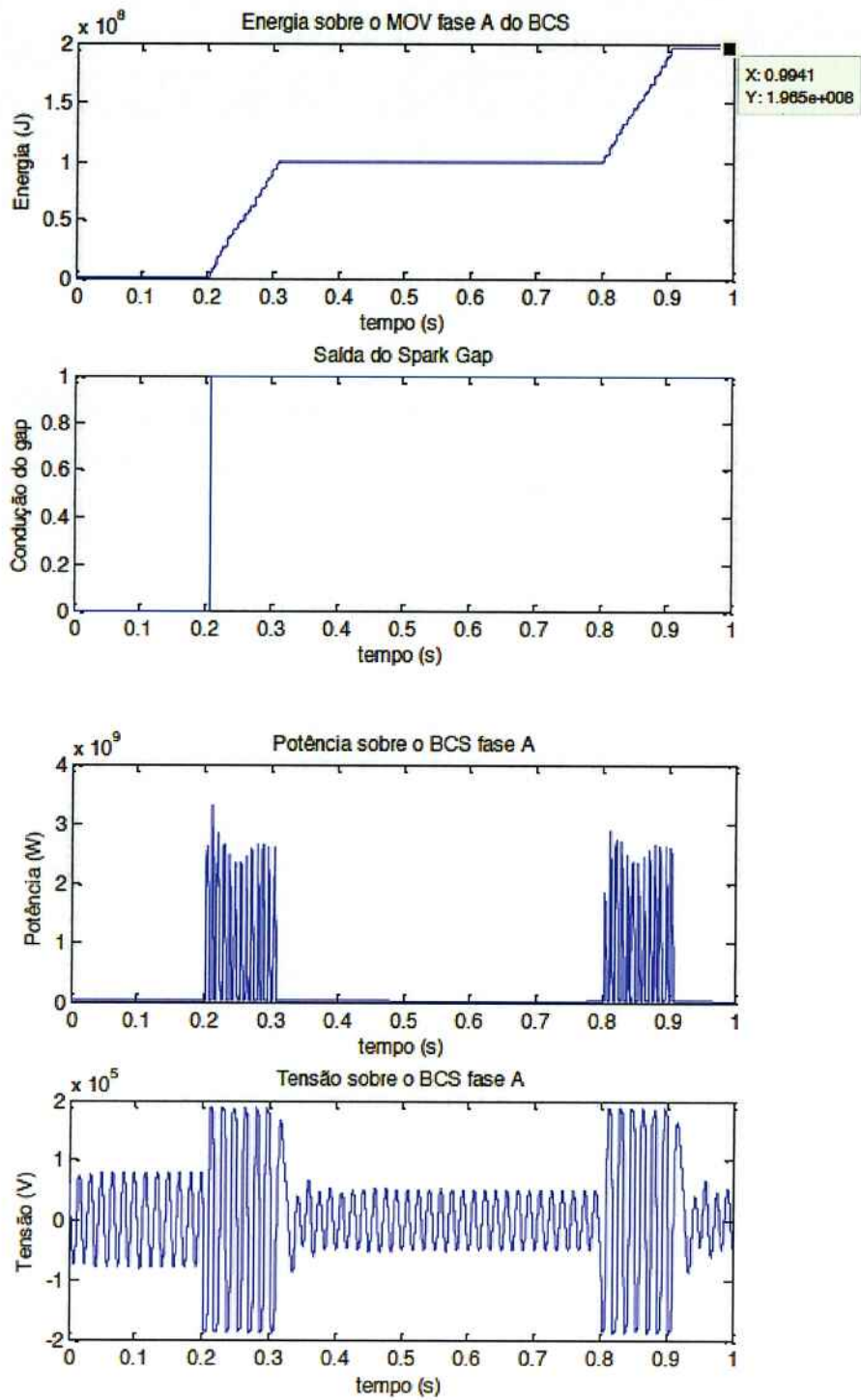


Figura 26 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto A

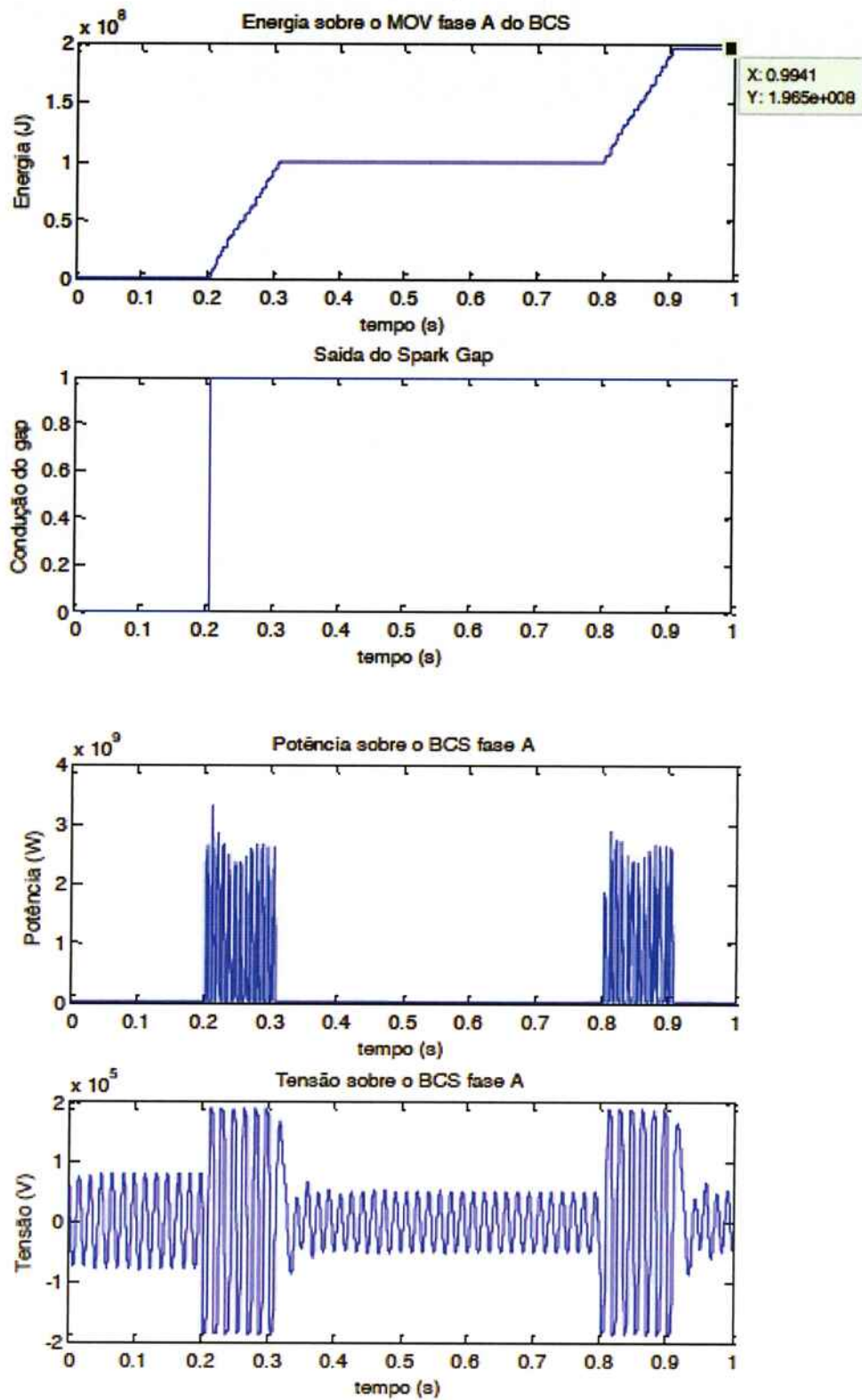


Figura 27 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto B

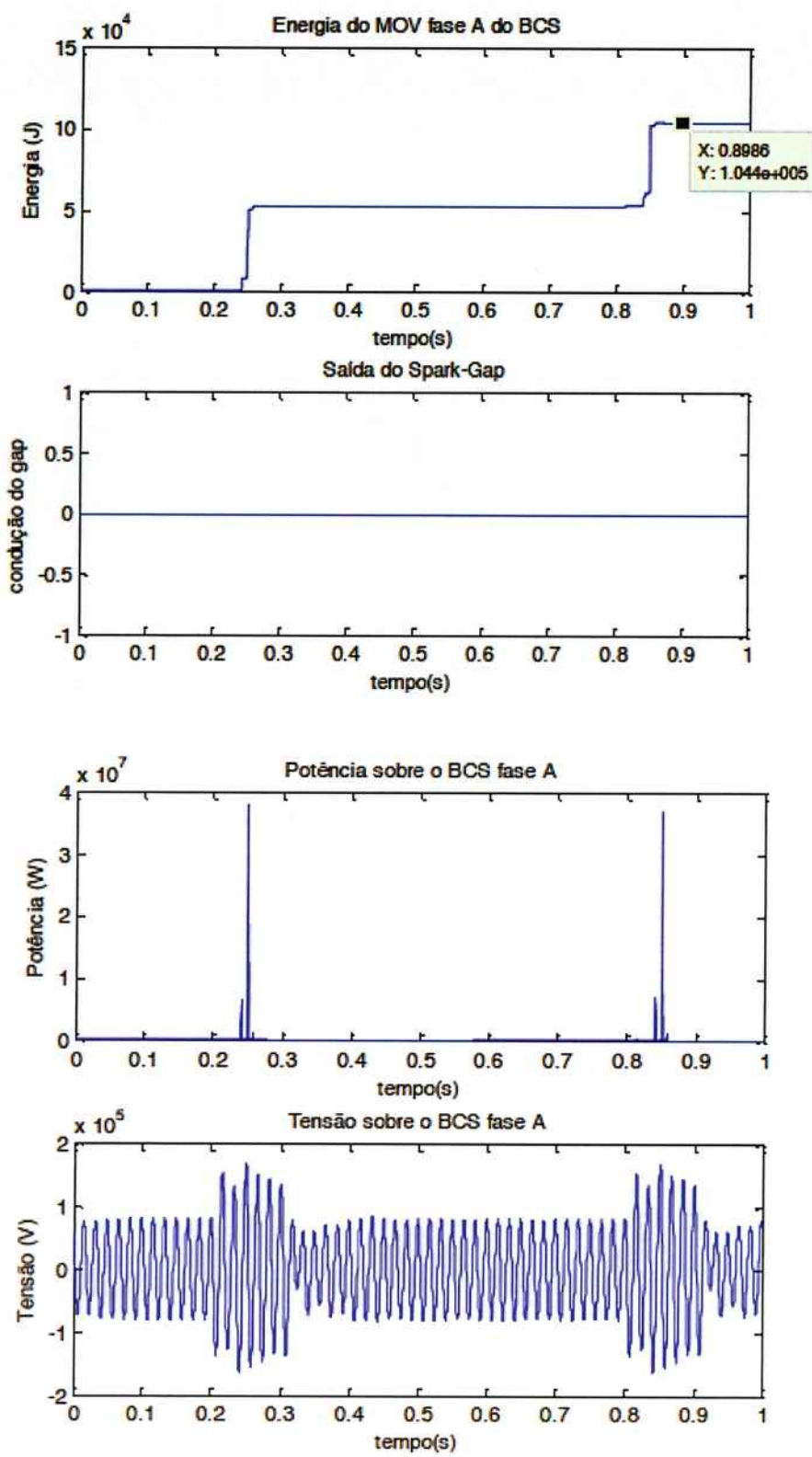


Figura 28 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto C

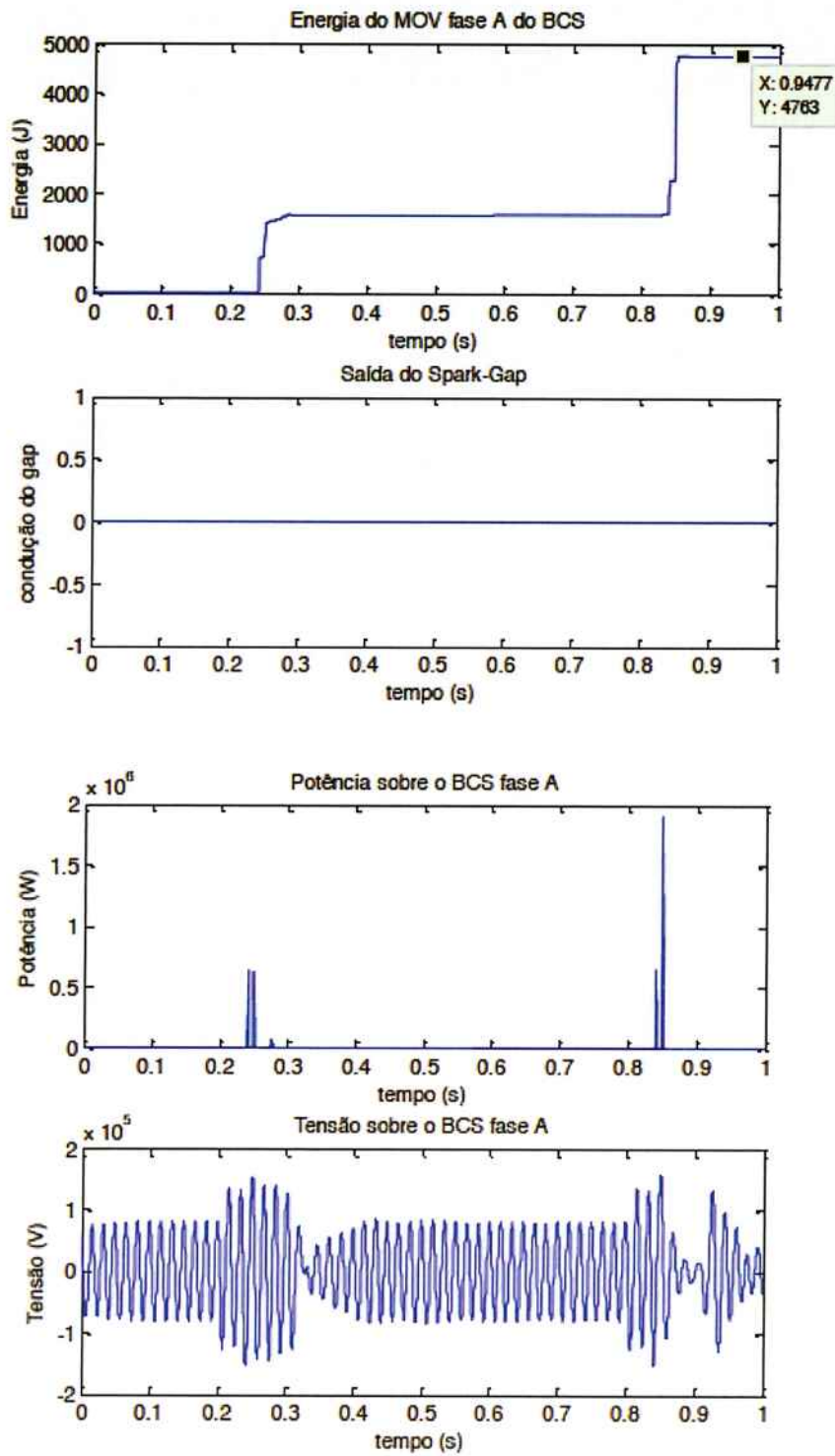


Figura 29 - Gráficos resultantes de uma falta no ponto D

6.2 Modelo da Interligação Norte-Sul III/Trecho 2

Para este modelo, partimos de um modelo pronto fornecido pela empresa que instalou os bancos de capacitores série do Trecho 2 da interligação, destacados na Figura 30. No entanto, não nos foi fornecido o relatório com o memorial de cálculo dos MOV's. Devido a este fato não pudemos comparar se os valores encontrados pelo MOVCalc estão próximos dos valores do estudo inicial.

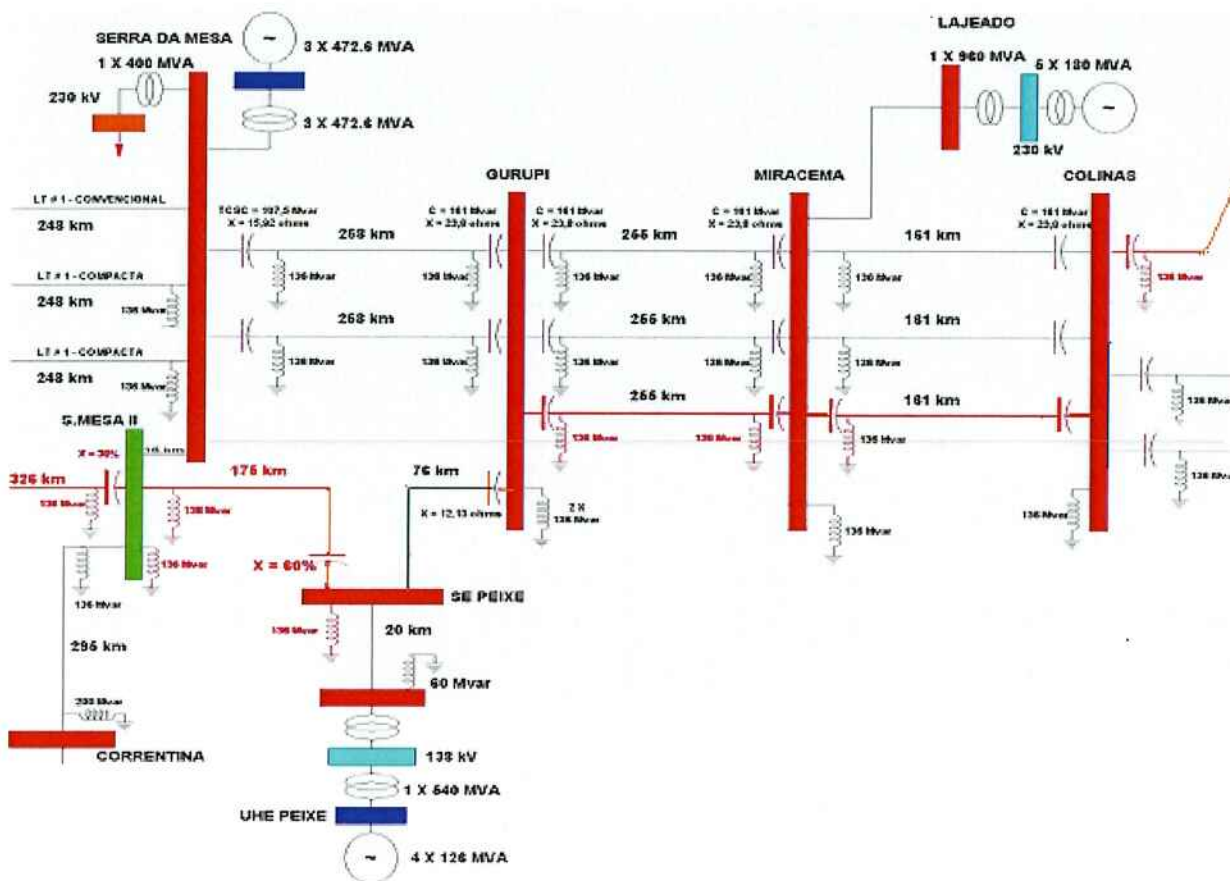


Figura 30 - Interligação Norte Sul III / Trecho 2

Para efeitos de simulação foi utilizada a rede com equivalentes para as 5 barras e que contem os Capacitores Série “C1 – Colinas”, “C2 – Miracema”, “C3 – Gurupi M”, “C4 – Gurupi P” e “C5 – Peixe”. E o Banco de capacitores que foi contemplado para estudo foi o C2

Foram feitas simulações em quase todos os pontos possíveis dentro de cada modelo e chegamos à conclusão que curtos trifásicos na linha Miracema-Colinas, eram os que possuíam os maiores valores. Para apresentação no relatório serão utilizados os pontos “CO50-”, “MICO3”, “COM31” e “L1-04”. Estes pontos são mostrados na Figura 31

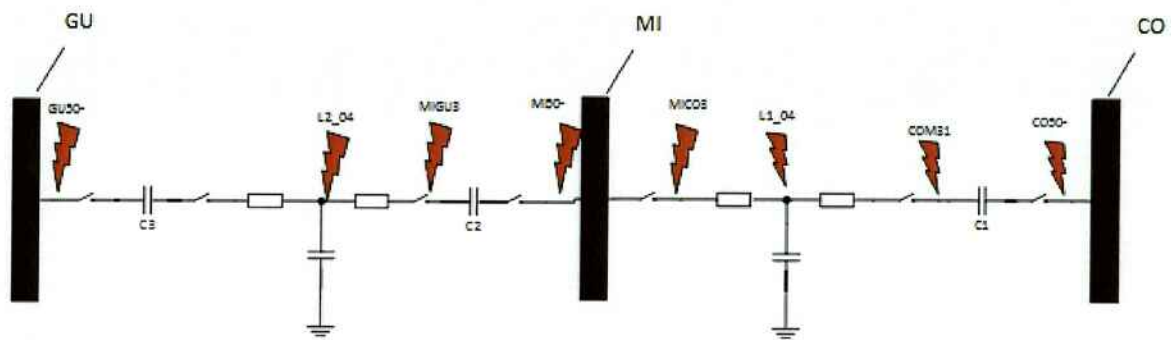


Figura 31 – Pontos que estão sendo utilizados para calculo das maiores energias para faltas externas e internas ao Banco de Capacitores de Miracema – C2

Na Figura 32, temos uma falta trifásica aplicada a estes pontos, com tentativa de reinserção e nova falta após 300ms. Este processo é repetido, agora aplicando-se faltas fase-terra nos mesmo pontos (verificar a Figura 33), e podemos observar um aumento da energia sobre o MOV, conforme nos afastamos da SE Miracema, em direção a SE Colinas.

Para que possamos observar os valores máximos de energia para todas as fases de cada ponto, temos na Figura 34 o resultado pós Análise de lote efetuada pelo MOVcalc.

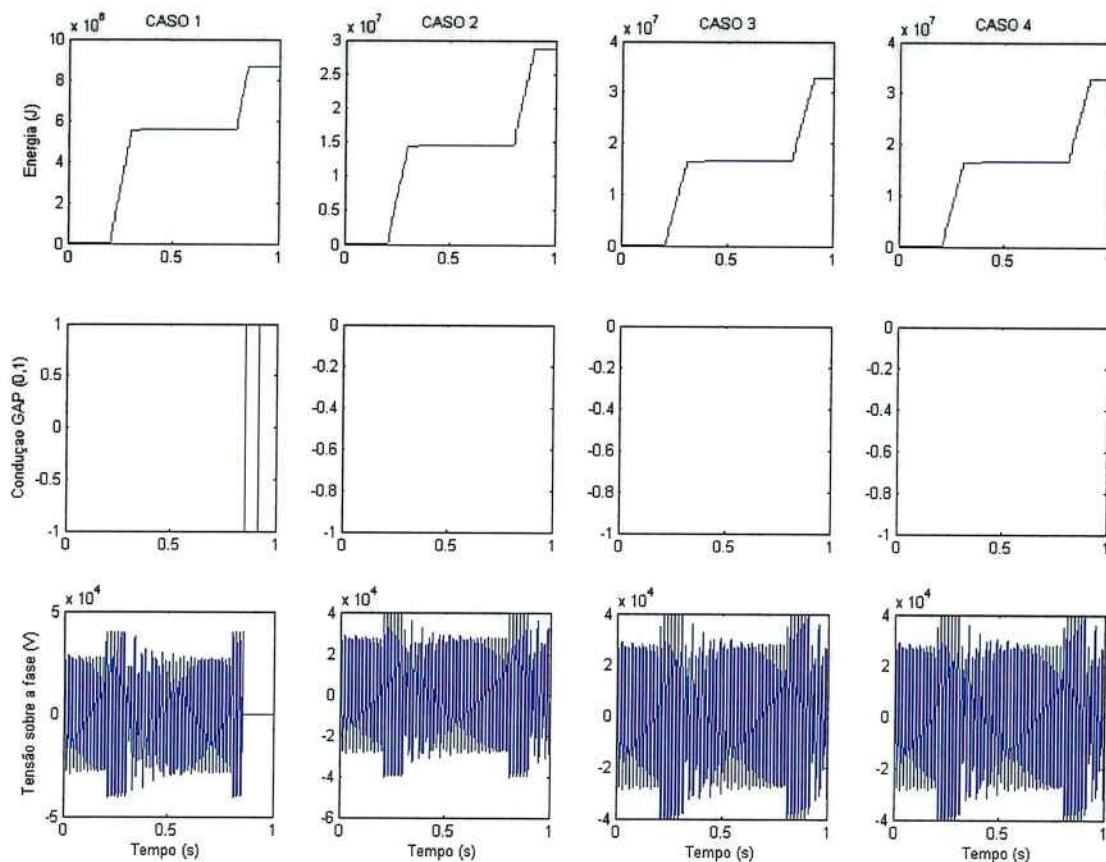


Figura 32 – Falta trifásica aplicada aos pontos MICO3, L1-04, COM31 e CO50- , esquerda para a direita, respectivamente

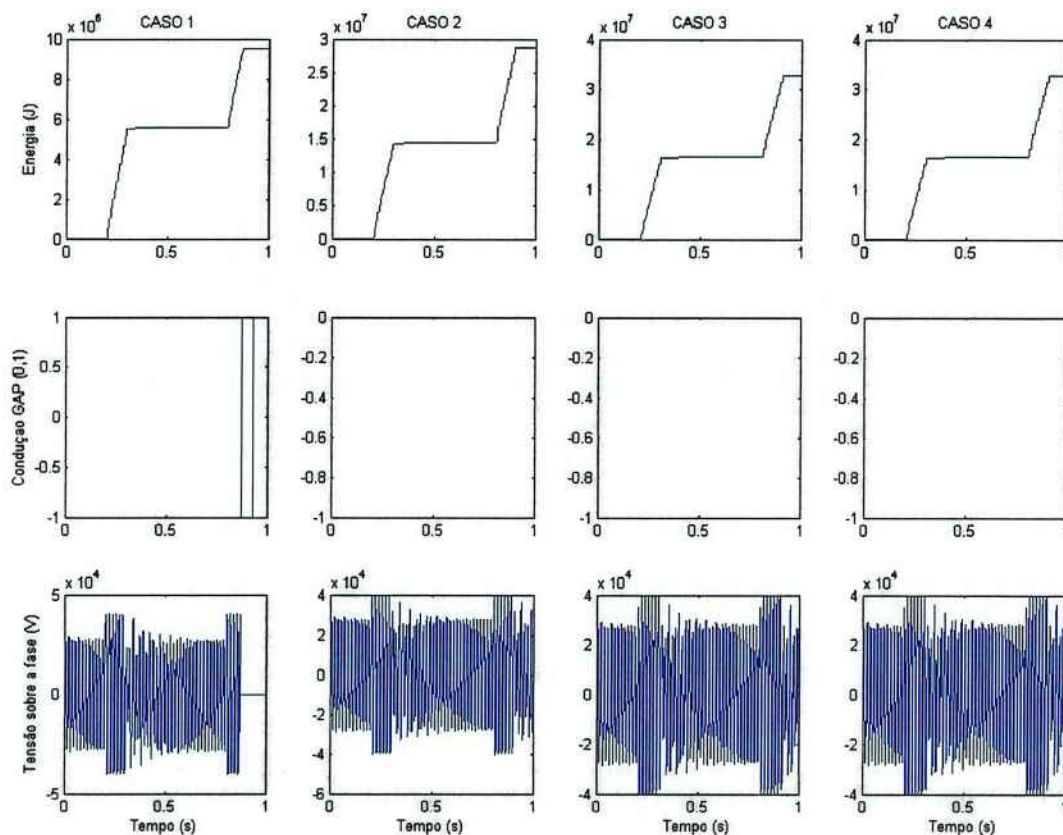


Figura 33 - Falta fase-terra aplicada aos pontos MICO3, L1-04, COM31 e CO50- , esquerda para a direita, respectivamente

resuladotxt - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

```

FALTA TRIFASICA
Pontos      fase A(J)      fase B(J)      fase C(J)
MICO3      8.641377000E+06  9.062507000E+06  9.054589000E+06 - falta interna
L1_04     2.878692400E+07  3.048455400E+07  3.154423800E+07 - falta externa
COM31     3.291398800E+07  3.274953000E+07  3.230218400E+07 - falta externa
CO50-     3.291398800E+07  3.274953000E+07  3.230218400E+07 - falta externa

FALTA FASE-TERRA
Pontos      fase A      fase B      fase C
MICO3      9.513005000E+06  6.819830933E+02  6.817295532E+02 - falta interna
L1_04     2.878692400E+07  6.137847656E+03  6.135566406E+03 - falta externa
COM31     3.291398800E+07  6.137847656E+03  6.135566406E+03 - falta externa
CO50-     3.291398800E+07  6.137847656E+03  6.135566406E+03 - falta externa

O ponto que solicita maior energia do MOV durante falta interna é o ponto MICO3 =
9.513005000E+06 J - falta monofasica

O ponto que solicita maior energia do MOV durante falta externa é o ponto COM31 =
3.291398800E+07 J - falta trifasica

```

Figura 34 - Listagem resultante da Análise de lotes dos pontos MICO3, L1-04, COM31 e CO50-, para faltas do tipo fase-terra e trifásica

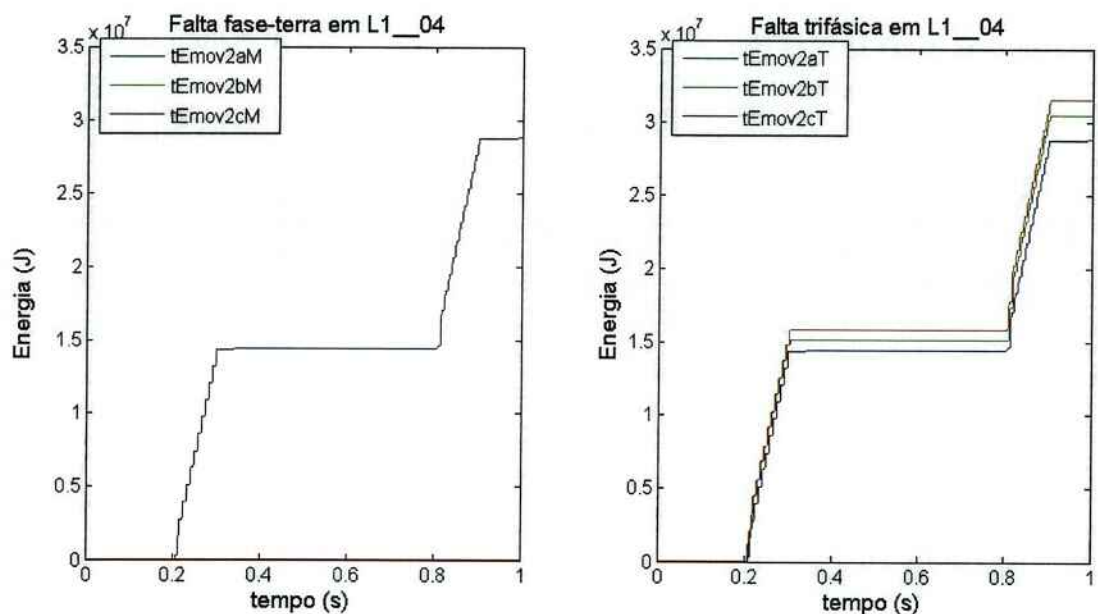


Figura 35 – Gráficos das Energias no ponto L1_04 para falta trifásica e fase-terra

Confirmamos pela Figura 34 que durante falta trifásica a energia máxima sobre os MOV's é praticamente a mesma em todas as fases. Já durante falta do tipo fase terra, como era esperado, temos maior energia acumulada na fase que sofreu a falta. Manipulando as variáveis disponíveis nos arquivos .mat, conseguimos construir o gráfico das energias nas três fases para o ponto L1_04 tanto para a falta trifásica, quando a monofásica, estes gráficos podem ser vistos na Figura 35.

Exclusivamente para as faltas internas, foram simulados os pontos sobre a linha Miracema – Gurupi, incluindo falhas nas respectivas subestações. Uma dessas falhas pode ser percebida nas figuras anteriores, o ponto MICO3 está muito próximo a SE Miracema, logo uma falta aplicada ao mesmo, ocasiona disparo do Gap. Notemos que nas próximas figuras, que o sinal de disparo do Gap é dado por um sinal que sai do valor -1 e vai para o valor 1.

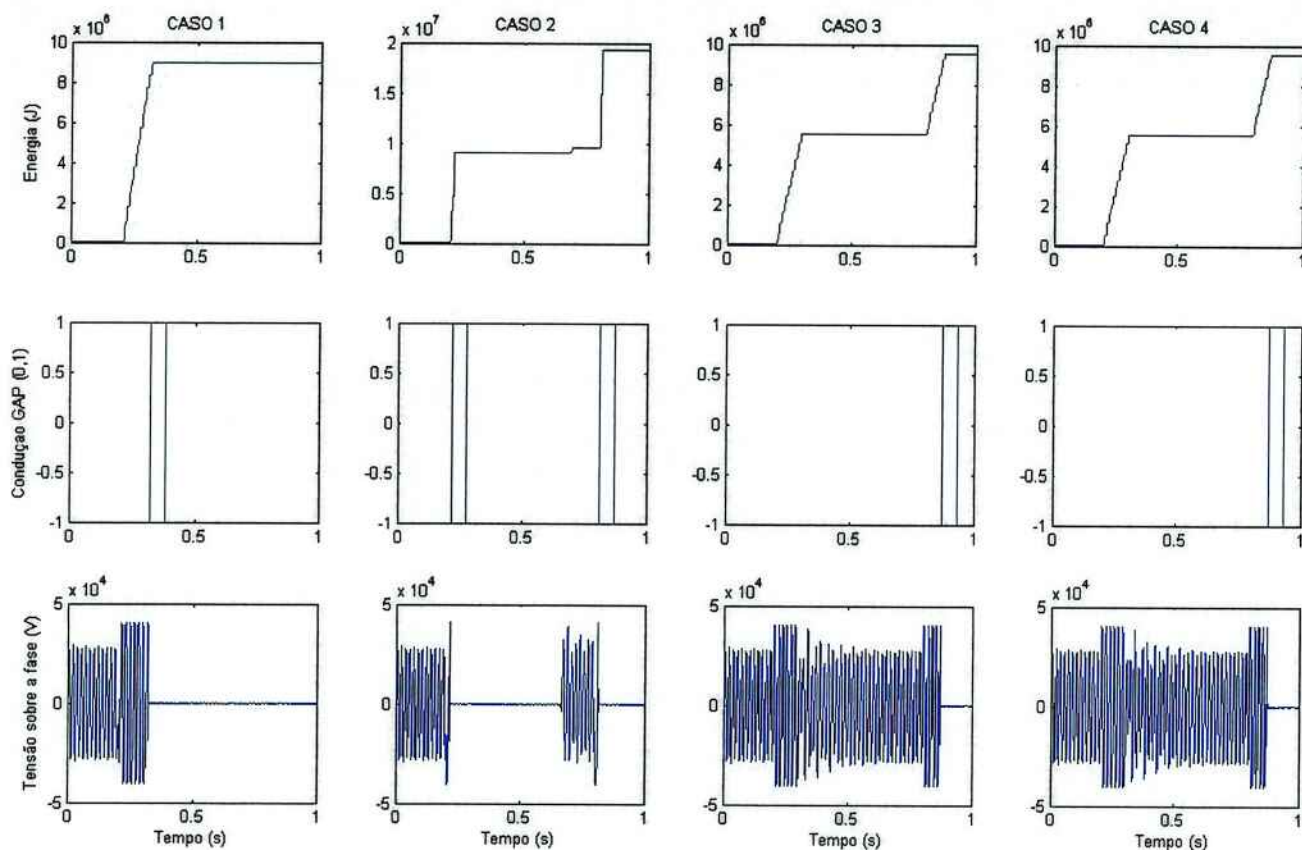


Figura 36 - Falta fase-terra aplicada aos pontos na linha de MI-GU

```

resutado.txt - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
FALTA TRIFASICA
Pontos      fase A(J)      fase B(J)      fase C(J)
GU50-      8.956964000E+06  8.595888000E+06  8.747491000E+06 - falta interna
L2_04      2.151520500E+06  4.070909250E+06  4.390494500E+06 - falta interna
MIG31      8.641377000E+06  9.062507000E+06  9.054589000E+06 - falta interna
MI50-      8.641377000E+06  9.062507000E+06  9.054589000E+06 - falta interna

FALTA FASE-TERRA
Pontos      fase A      fase B      fase C
GU50-      8.956964000E+06  6.819830933E+02  6.817295532E+02 - falta interna
L2_04      2.151520500E+06  6.819830933E+02  6.817295532E+02 - falta interna
MIG31      9.513005000E+06  6.819830933E+02  6.817295532E+02 - falta interna
MI50-      9.513005000E+06  6.819830933E+02  6.817295532E+02 - falta interna

O ponto que solicita maior energia do MOV durante falta interna é o ponto MIG31 =
9.513005000E+06 J - falta monofasica
  
```

Figura 37 – Listagem dos resultados para faltas fase-terra e trifásica na linha MI - GU

A Figura 37 mostra que o ponto crítico para falha interna é a SE Miracema, um curto fase-terra nesta SE é o que causa o valor máximo de energia acumulada no MOV. Os gráficos para o caso de falta fase-terra podem ser vistos na Figura 36.

Dos gráficos e tabelas acima, para o caso do Banco de Capacitores Série de Miracema, deveremos considerar a máxima energia durante falta externa somada a máxima energia da falta interna, de tal forma a termos total segurança para os elementos capacitivos.

Temos 32.9MJ para falta externa, mais 9,5MJ para falta interna, somando assim 42,4 MJ como valor mínimo para os MOV's, por fase. A este número pode-se ainda ser adicionado fator de segurança do fabricante do banco série e uma margem do futuro usuário.

6.3 Banco de Capacitores Rondonópolis 230kV

Grande projeto do Edital 001/2003, o BCS de Rondonópolis fazia parte da construção de duas interligações, uma simples entre Rondonópolis/Cuiabá e uma interligação dupla Cuiabá/Coxipó. O sistema do Mato Grosso do Sul, assim como a indicação de posicionamento do banco podem ser vistos na Figura 38.

Para este banco de capacitores, recebemos além do modelo em ATP do banco, o modelo da rede (da época) bem como o estudo dos MOV's. Desta forma, nos coube retrilhar os passos da equipe de engenharia inicial, para averiguarmos se a ferramenta MOVcalc está realizando o prometido.

O estudo de referência conta com uma quantidade muito grande de pontos onde o sistema sofreu algum tipo de falta a ser analisada. Como no início do projeto decidimos que deveríamos fazer algumas simplificações e também tendo o relatório em mãos já sabíamos quais seriam os pontos críticos, optamos por focar nesses pontos e nos tipos de faltas que mais causariam stress aos MOV's.

Foram escolhidos 29 pontos de falta externa ao banco e 4 pontos de falta interna. Foram aplicadas faltas trifásicas, que como no relatório de referência se mostraram as que mais exigiam dos MOV's e também aplicamos faltas fase-terra, que para este estudo se mostraram sempre menores que os valores trifásicos.

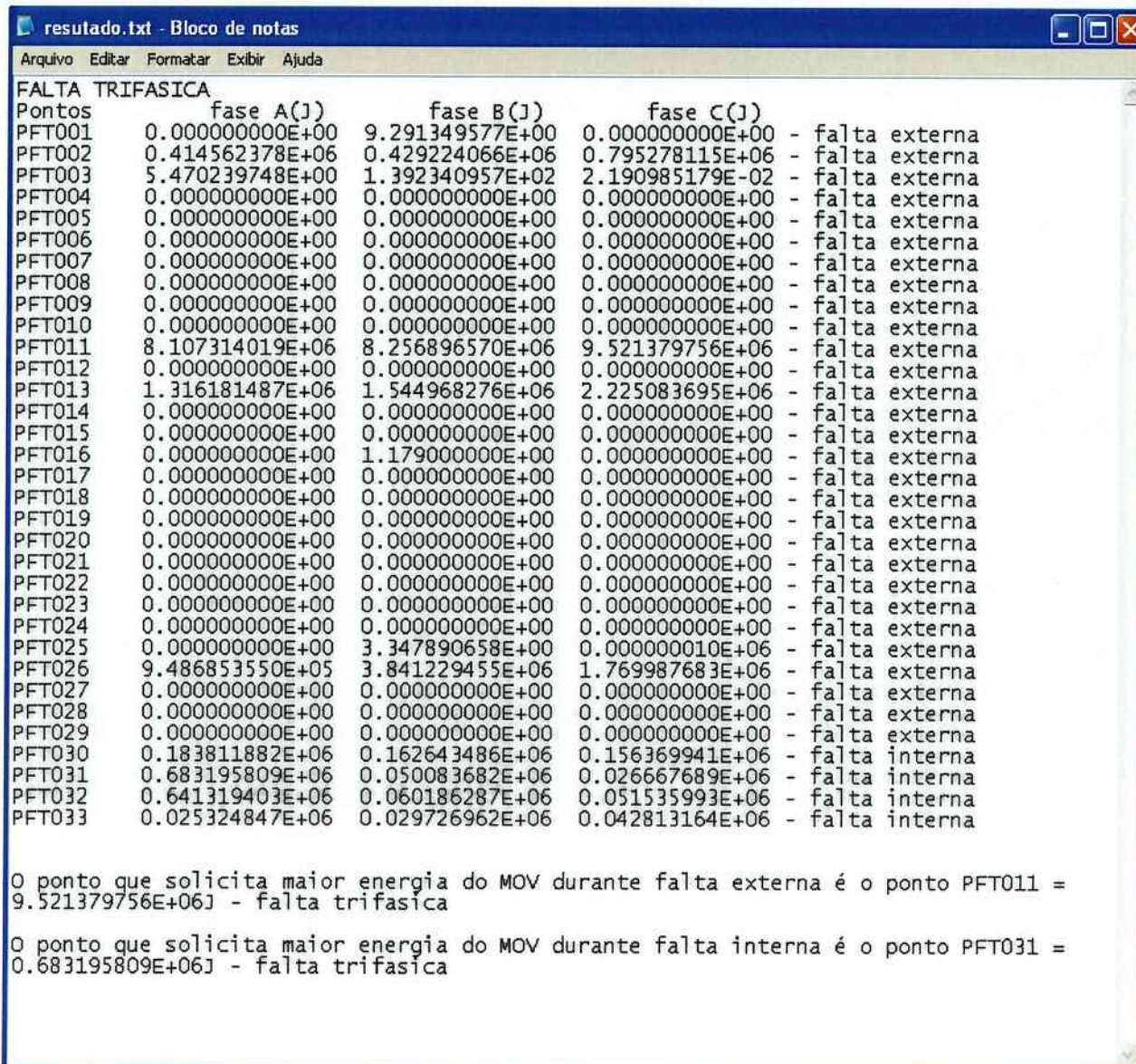


Figura 39 – Falta trifásica aplicada aos pontos de considerados no relatório de referencia

Os dados obtidos na simulação, apresentados na Figura 39 foram de encontro aos dados do relatório de referencia, de forma que a ferramenta MOVCalc, pode ser validada, dados os parâmetros específicos deste sistema. Temos como ordem de grandeza valores idênticos até a nona casa decimal.

7 LIMITAÇÕES DA FERRAMENTA

Ao contrário do esperado inicialmente, de que a ferramenta poderia ser utilizada por pessoas com pouco conhecimento de ATP, vimos que ainda é necessário um alto grau de conhecimento nesta linguagem de programação.

Da forma que a mesma esta programada hoje, ela também se limita à Análise Gráfica de curtos circuitos trifásicos, dupla fase-terra e fase-terra, enquanto que a Análise de Lote faz leva em consideração faltas trifásicas e fase-terra.

Este fator limita aqueles com pouco conhecimento da Linguagem Matlab, pois outros tipos de falta são facilmente programáveis.

8 CONCLUSÃO

Usando a ferramenta MOVCalc somos capazes de fazer uma análise simplificada da quantidade de energia que deverá ser absorvida pelo MOV, num modelo de capacitor série que utilize esse tipo de proteção, para um determinado ponto de falta. Escolhendo-se pontos estratégicos da rede, podemos observar onde a energia tem tendência a crescer e então concentrar as simulações em pontos próximos e com menor passo de simulação, refinando assim os resultados.

A maior complexidade se encontra no modelo do capacitor série utilizado, que apesar de representado o mais fielmente possível, dentro do nosso universo de simplificações, pode possuir ainda diferentes arranjos e diferentes equipamentos dependendo de cada fabricante.

Dada a existência, durante a fase de propostas inicial de um projeto, da rede e do modelo de capacitor série utilizado, seria possível utilizar esta ferramenta como primeira abordagem da quantidade de MOV's a ser utilizada no projeto.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Coursol, M. Nguyen, C.T. Lord, R. Do, X.-D.. Modeling MOV-protected series capacitors for short-circuit studies. IEEE Transactions on Power Delivery. 8, 1: 448 - 453. Jan 1993.

D'Ajuz, A. e outros. Equipamentos elétricos especificação e aplicação em subestações de alta tensão . Rio de Janeiro : Editora da UFF - Furnas. 1985.

D'Ajuz, A. e outros. Experiência da Eletronorte com o Dimensionamento dos Varistores dos Capacitores Série da Interligação Norte-Sul e Norte-Nordeste. XV SNPTEE 17 à 22 de outubro de 1999 – Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil

Gajbhiye, R.K. Gopi, B. Kulkarni, P. Soman, S.A.. Computationally Efficient Methodology for Analysis of Faulted Power Systems With Series-Compensated Transmission Lines: A Phase Coordinate Approach. IEEE Transactions on Power Delivery. 23, 2: 873 - 880 . April 2008.

IEC Series capacitors for power systems, IEC Standart 60143-1, 2004.

Nan Zhang, Mladen Kezunovic, Implementing an Advanced Simulation Tool for Comprehensive Fault Analysis Appears in Proceeding of IEEE PES T&D Asia Pacific Conference, Da Lian, China, August 2005.

Natarajan, R.. Power system capacitors. Boca Raton, FL : Taylor & Francis. 2005.

NBR Capacitores série para sistemas de potencia, NBR 8763, 1998.

PROCEDIMENTOS DE REDE, Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos, submódulo 2.3, revisão 2.0, Novembro 2011

ANEXO

Dados presentes em uma oferta de um modelo de MOV

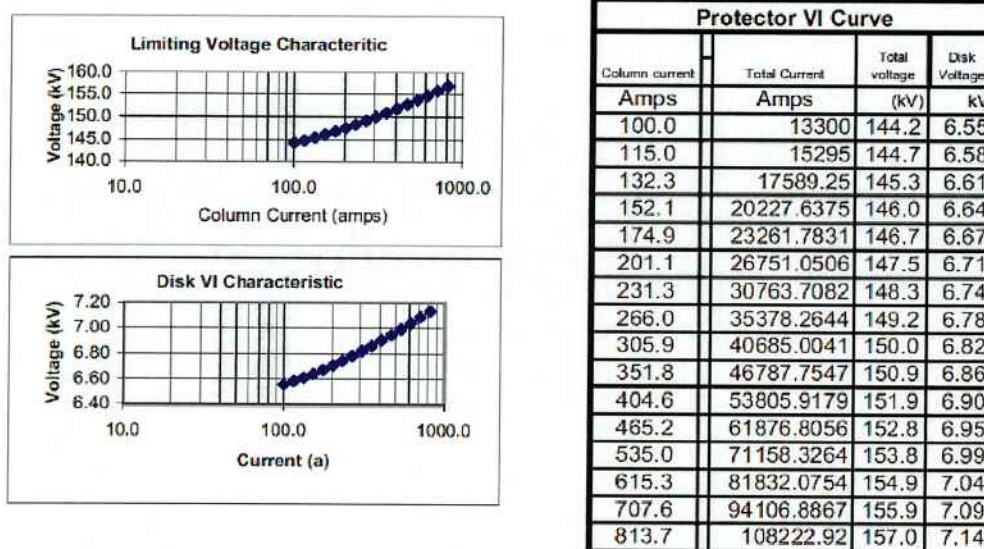


Figura 40 - Curvas VI de uma coluna de MOV's e de apenas um disco e valores de corrente e tensão de uma coluna de MOV

A Figura 41 é uma curva gerada por simulação (via ATP ou outro software semelhante) de faltas trifásicas externas a um banco de capacitor, verificando a pior condição determinamos a quantidade mínima de energia que o MOV deve absorver para proteger o banco de capacitores.

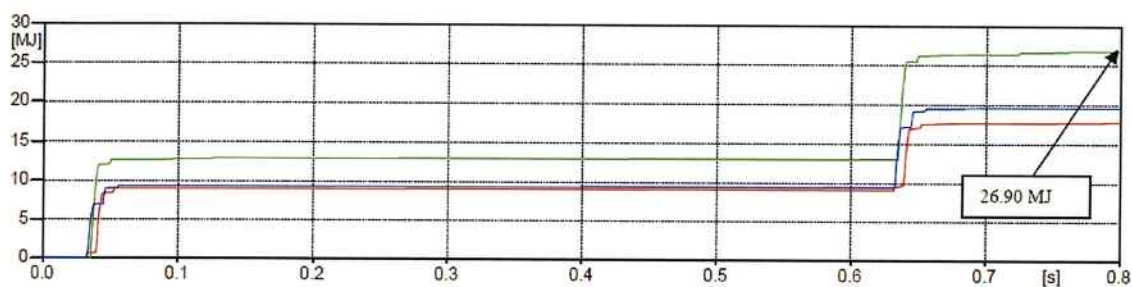


Figura 41 - Gráfico da energia absorvida por uma falta em um ponto da LT

A Figura 42 representa uma curva obtida em estudos que determinam o material do MOV, pois diferentes tipos de materiais tem curvas de resfriamento diferentes, resfriando mais rapidamente ou menos. A escolha do material depende normalmente dos requisitos de projetos impostos pelas especificações de um edital, por exemplo.

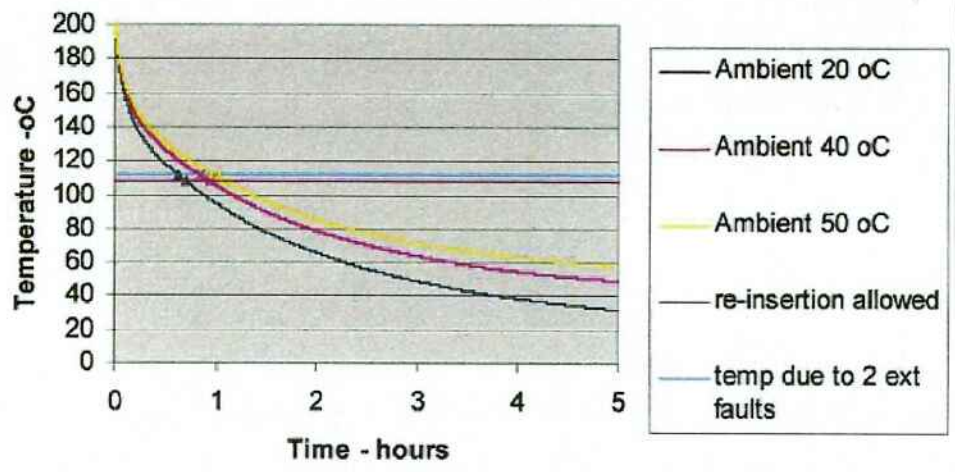


Figura 42 - Gráfico do resfriamento do MOV e valores permitidos para reconexão do banco em um caso real