

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**OTIMIZAÇÃO DA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE
SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO A
PROGRAMAÇÃO INTEIRA BINÁRIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rafael Corrêa

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**OTIMIZAÇÃO DA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE
SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO A
PROGRAMAÇÃO INTEIRA BINÁRIA**

Rafael Corrêa

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**

Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**OTIMIZAÇÃO DA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE
SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO INTEIRA BINÁRIA**

elaborada por
Rafael Corrêa

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Ghedy Cardoso Junior, Dr. Eng. (UFSM)

Olinto César Bassi de Araújo, Dr. (CTISM)

Mauricio Sperandio, Dr. Eng. (UNIPAMPA)

Santa Maria, 23 de Fevereiro de 2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Corrêa, Rafael

Otimização da Coordenação de Relés de Sobrecorrente Direcionais em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando a Programação Inteira Binária / Rafael Corrêa.-2012.

91 p.; 30cm

Orientador: Ghendy Cardoso Jr.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012

1. Sistemas elétricos de potência 2. Proteção de sobrecorrente 3. Relé de sobrecorrente 4. Programação inteira binária 5. Coordenação I. Cardoso Jr., Ghendy II. Título.

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Rafael Corrêa. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Duque de Caxias, 1055/302, Bairro Centro, Santa Maria, RS, 97015-190.

Fone (0xx)55 32227887; E-mail: rafael.serra@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à orientação competente e entusiasmada do Prof. Ghendy Cardoso Jr. e pela grande ajuda prestada pelo Prof. Olinto Cesar Bassi de Araújo.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM.

À CAPES, pelo fomento da pesquisa.

Aos colegas de trabalho e amigos que contribuíram intelectualmente e proporcionaram um ambiente sadio para o desenvolvimento da pesquisa.

E por fim, mas não menos importante, à minha namorada e à minha família como um todo, pelo suporte físico e mental durante essa jornada.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

OTIMIZAÇÃO DA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO INTEIRA BINÁRIA

AUTOR: RAFAEL CORRÊA

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de Fevereiro de 2012

Este trabalho visa otimizar a coordenação de relés de sobrecorrente direcionais microprocessados em sistemas elétricos de potência com o auxílio da Programação Inteira Binária (PIB). Dois novos modelos matemáticos de PIB são apresentados. O primeiro determina somente o Multiplicador de Tempo de cada relé, enquanto que o segundo determina simultaneamente o Multiplicador de Tempo e o Multiplicador de Corrente de cada relé. Esses modelos possuem como grande vantagem em relação aos modelos de Programação Linear (PL) e de Programação Não Linear (PNL) a determinação dos ajustes dos relés diretamente dentro da faixa por estes disponibilizada, ao contrário desses últimos que utilizam variáveis contínuas. Dessa forma, evita-se o arredondamento dos ajustes para os valores mais próximos disponíveis nos relés, o que pode causar falhas na coordenação. Ainda, os algoritmos destinados à resolução desses modelos de PIB não necessitam de um valor inicial, ao contrário do que ocorre na PNL, e evita-se que a solução fique estagnada em ótimos locais durante o processo de busca. Este trabalho apresenta os modelos de PNL e PL considerados e as alterações necessárias para que se obtenha os dois novos modelos de PIB. Para validar os novos modelos de coordenação de relés de sobrecorrente e compará-los com os modelos que utilizam variáveis contínuas, a metodologia proposta é aplicada na proteção de fase e de neutro de dois sistemas teste de diferentes portes considerando, ou não, a unidade instantânea de cada relé. Os resultados são avaliados em termos da Função Objetivo, dos ajustes obtidos e dos tempos de operação dos relés para faltas dentro da zona de proteção primária. Desse modo, é demonstrado que os modelos propostos têm a capacidade de determinar a solução ótima do problema em um tempo computacional reduzido e sem a necessidade de se realizar quaisquer modificações na solução final. Esses modelos podem, ainda, integrar um *software* de auxílio à tomada de decisões por parte do engenheiro de proteção, permitindo a interação na construção do modelo matemático para que a solução final seja personalizada.

Palavras-chave: Coordenação; Otimização; Programação inteira binária; Programação linear; Programação não linear; Proteção de sobrecorrente; Relé de sobrecorrente; Sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

Master of Science Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

OPTIMIZATION OF COORDINATION OF DIRECTIONAL OVERCURRENT RELAYS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS USING BINARY INTEGER PROGRAMMING

AUTHOR: RAFAEL CORRÊA
ADVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR
Santa Maria, February 23, 2012

This work aims to optimize the coordination of microprocessor-based directional overcurrent relays in power systems using Binary Integer Programming (BIP). Two new mathematical models of BIP are presented. The first determines only the Time Multiplier of each relay, while the second determines simultaneously the Time Multiplier and Current Multiplier of each relay. These models have a great advantage over the Linear Programming (LP) and Nonlinear Programming (NLP) models to determine the relay settings directly within the range provided by these instead of the LP and NLP which use continuous variables. Thus, it avoids the rounding of settings to the closest values available in the relays, which can cause failures in coordination. Still, the algorithms used to solve these BIP models do not require an initial guess, unlike what happens in NLP, and the search from getting trapped in local minima. This paper presents the NLP and LP models considered and the necessary changes in order to obtain the two new BIP models. To validate the new mathematical models of coordination of overcurrent relays and compare them with the models which use continuous variables, the proposed methodology is applied in phase and earth protection of two test systems of different sizes considering whether or not the instantaneous unit of each relay. The results are evaluated in terms of the Objective Function, the obtained settings and operating times of relays for faults within the zone of primary protection. Thus, it is shown that the proposed models have the ability to determine the optimal solution of the problem in a reduced computational time and without the need to make any changes to the final solution. These models can also integrate a software aid to decision making by the protection engineer, allowing to interact in the construction of mathematical model to customize the final solution.

Keywords: Binary integer programming; Coordination; Electric power systems; Linear programming; Nonlinear programming; Optimization; Overcurrent protection; Overcurrent relay.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 | Considerações Gerais | 9 |
| 1.2 | Objetivos..... | 9 |
| 1.3 | Motivação | 10 |
| 1.4 | Revisão Bibliográfica | 11 |
| 1.5 | Estrutura da Dissertação | 14 |
| 2 | PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE | 16 |
| 2.1 | Considerações Gerais | 16 |
| 2.2 | Filosofia de Proteção | 16 |
| 2.2.1 | Zonas de Proteção | 16 |
| 2.2.2 | Proteção Primária | 17 |
| 2.2.3 | Proteção de Retaguarda | 17 |
| 2.3 | Transformadores de Corrente | 18 |
| 2.4 | Tipos de Tecnologia..... | 19 |
| 2.5 | Relé de Sobrecorrente Temporizado (ANSI 51/51N)..... | 20 |
| 2.5.1 | Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido (RSTD) | 21 |
| 2.5.2 | Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso (RSTI) | 22 |
| 2.6 | Relé de Sobrecorrente Instantâneo (ANSI 50)..... | 25 |
| 2.7 | Relé de Sobrecorrente Direcional (ANSI 67) | 26 |
| 2.8 | Coordenação de Relés de Sobrecorrente..... | 27 |
| 2.8.1 | Tempo de Coordenação..... | 27 |
| 2.8.2 | Método de Coordenação..... | 27 |
| 2.9 | Considerações Finais..... | 29 |
| 3 | FORMULAÇÃO DO PROBLEMA | 30 |
| 3.1 | Considerações Gerais | 30 |
| 3.2 | Modelagem Matemática..... | 30 |
| 3.2.1 | Função Objetivo | 31 |
| 3.2.2 | Restrições | 32 |
| 3.2.2.1 | Restrições do Tempo de Coordenação | 32 |
| 3.2.2.2 | Restrição do Tempo de Operação | 35 |
| 3.2.2.3 | Limites das Variáveis | 36 |
| 3.2.3 | Caráter Contínuo das Variáveis..... | 37 |
| 3.3 | Linearização do Modelo..... | 37 |
| 3.4 | Considerações Finais..... | 38 |
| 4 | PROGRAMAÇÃO INTEIRA BINÁRIA APLICADA NA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE | 39 |
| 4.1 | Considerações Gerais | 39 |
| 4.2 | Programação Inteira Binária | 39 |
| 4.3 | Novos Modelos Propostos | 40 |
| 4.3.1 | Modelo 1 – Determinação do MT_{51} | 40 |
| 4.3.2 | Modelo 2 – Determinação do MT_{51} e do MC_{51} | 42 |
| 4.4 | Fluxograma da Metodologia Proposta | 45 |
| 4.4.1 | Inicialização dos Dados..... | 45 |
| 4.4.2 | Cálculo das Correntes de Curto-Circuito | 46 |
| 4.4.3 | Cálculo do Fluxo de Carga..... | 46 |
| 4.4.4 | Pré-Processamento dos Dados..... | 46 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.4.5 | Construção do Modelo Matemático | 46 |
| 4.4.6 | Aplicação do Resolvedor..... | 47 |
| 4.4.7 | Validação e Apresentação dos Resultados | 47 |
| 4.5 | Considerações Finais..... | 47 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 48 |
| 5.1 | Considerações Gerais..... | 48 |
| 5.2 | Softwares Utilizados..... | 48 |
| 5.3 | Relés de Sobrecorrente Utilizados | 49 |
| 5.4 | Padronizações das Simulações | 49 |
| 5.5 | Sistema Teste 1..... | 49 |
| 5.5.1 | Caso 1: Proteção de Fase e de Neutro sem Unidades Instantâneas..... | 50 |
| 5.5.2 | Caso 2: Proteção de fase e de neutro com unidades instantâneas | 55 |
| 5.6 | Sistema Teste 2..... | 57 |
| 5.6.1 | Caso 3: Proteção de Fase e de Neutro sem Unidades Instantâneas..... | 58 |
| 5.6.2 | Caso 4: Proteção de Fase e de Neutro com Unidades Instantâneas | 59 |
| 5.7 | Considerações Finais..... | 60 |
| 6 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS | 62 |
| 6.1 | Conclusões..... | 62 |
| 6.2 | Sugestões para Futuros Trabalhos | 63 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 64 |
| | APÊNDICES..... | 68 |
| | ANEXOS | 89 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A expansão dos sistemas elétricos decorrente do aumento das demandas energéticas provocado pela atividade humana faz com que investimentos financeiros e novas tecnologias sejam aplicados não apenas em equipamentos mais modernos e mais eficientes para a geração, a transmissão e a distribuição de energia, mas também em dispositivos de proteção que garantam a integridade dos sistemas elétricos e dos consumidores de energia.

Dentre esses dispositivos de proteção, destaca-se o relé de sobrecorrente, largamente utilizado desde a geração até a distribuição de energia devido a sua simplicidade e custo reduzido. Um dos problemas decorrentes do uso desses relés é o estudo da coordenação, que visa determinar os ajustes dos relés de tal modo que as faltas sejam eliminadas rapidamente em qualquer ponto do sistema, mesmo que um relé mais próximo ao ponto com defeito venha a falhar. Dessa forma, evita-se o sobreaquecimento indesejado dos transformadores, geradores, condutores, entre outros, proporcionando-lhes uma maior vida útil. Ainda, a eliminação da falta deve interromper o fornecimento de energia do menor número possível de consumidores, minimizando o aumento dos indicadores de continuidade.

Assim, fica clara a importância de se realizar um bom estudo de coordenação dos relés, independentemente do porte do sistema elétrico e de suas características topológicas, com o objetivo de maximizar a continuidade do serviço e proporcionar a velocidade, a segurança e a confiabilidade do sistema de proteção.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova metodologia para a coordenação de relés de sobrecorrente direcionais microprocessados de tempo inverso em sistemas elétricos de potência malhados, onde a coordenação se torna mais complexa e mais trabalhosa. Essa metodologia utiliza uma técnica de otimização de programação matemática como ferramenta computacional para determinar os melhores ajustes para os relés, auxiliando o projetista do sistema de proteção na tomada de decisões de forma rápida e interativa.

Como objetivos específicos, cita-se:

- O desenvolvimento de uma ferramenta computacional que ofereça boas soluções em um tempo reduzido, automatizando o estudo da coordenação, e que não possua um grande número de parâmetros a serem ajustados;
- Considerar a coordenação dos relés de sobrecorrente com e sem suas unidades instantâneas, com característica tempo-corrente da unidade temporizada fixa;
- O levantamento e o uso das restrições e das funções objetivo relevantes para a construção de modelos matemáticos que reproduzam o mais próximo do real as condições de falta de um sistema elétrico;
- A transformação de modelos matemáticos não lineares em modelos lineares;
- A determinação direta dos ajustes dos relés dentro da faixa por eles disponibilizada.

1.3 Motivação

Com o advento do computador digital, grandes avanços foram dados na tentativa de criar uma ferramenta computacional capaz de resolver os problemas inerentes à coordenação de relés de sobrecorrente direcionais, principalmente em sistemas interconectados e com múltiplas fontes de energia, onde os efeitos de *infeed* e *outfeed* e as diferentes topologias que esses sistemas podem assumir aumentam consideravelmente a complexidade da análise do sistema de proteção se comparados aos sistemas de distribuição que são, em sua grande maioria, radiais.

No entanto, muitas das técnicas propostas para esse fim são de difícil implementação, têm uma grande variedade de parâmetros a serem ajustados e exigem uma elevada carga computacional, não sendo aplicáveis a sistemas de grande porte e que possuem um grande número de dispositivos de proteção a coordenar.

Algumas dessas técnicas determinam os ajustes dos relés considerando somente parte do problema (por exemplo, testa-se a coordenação somente para uma corrente de falta, normalmente a máxima do trecho protegido, que determina o ponto onde as curvas do tempo de atuação dos relés mais se aproximam), o que pode ocasionar falhas na coordenação para outras correntes de falta.

Outras técnicas determinam os ajustes dos relés na forma contínua, valores esses que muitas vezes não são disponibilizados pelo relé. Dessa forma, faz-se necessário o arredondamento desses valores para os mais próximos disponíveis, o que pode acarretar

falhas na coordenação uma vez que os novos ajustes arredondados diferem dos determinados pelo algoritmo.

Ainda, outras técnicas consideram somente o ajuste de tempo do relé, ou dial de tempo, como variável do problema. Será mostrado ao longo desse trabalho que quando o ajuste de corrente do relé, ou tape, também for uma variável do problema é possível reduzir o tempo de operação dos relés sem comprometer a sua coordenação.

Assim, justifica-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que contemple a determinação dos ajustes dos relés de sobrecorrente de forma rápida e sem a necessidade de se parametrizar o algoritmo, independentemente do porte do sistema elétrico e da sua topologia, reproduzindo as condições reais de falta a que esse sistema é submetido e determinando ajustes que possam ser utilizados diretamente nos relés.

1.4 Revisão Bibliográfica

Desde os anos 1960, um grande esforço tem sido despendido no desenvolvimento de um sistema computacional direcionado a automatizar o estudo da coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas de potência.

Os primeiros algoritmos basicamente automatizaram a filosofia tradicional de solução interativa, onde o usuário executava diferentes simulações com distintas faltas e configurações da rede até que uma solução aceitável fosse obtida (URDANETA et al., 1988). Nessas técnicas, a inexistência de um ponto de partida requeria repetidas execuções do algoritmo para todos os relés. Para contornar isso, Damborg et al. (1984) e Ramaswami et al. (1984) propuseram, primeiramente, uma análise topológica do sistema fundamentada na teoria dos grafos para determinar a sequência de coordenação dos relés e, posteriormente, procedeu-se com a coordenação propriamente dita. Aqui, a solução encontrada é a melhor apenas entre todas as situações testadas, e não a ótima global.

A partir do final da década de 1980 a coordenação de relés passou a ser modelada e resolvida como um problema de otimização. Utilizando o equacionamento das curvas do tempo de operação dos relés eletromecânicos em função de seu tape e de seu dial de tempo proposta por Sachdev et al. (1978), Urdaneta et al. (1988) propuseram uma técnica iterativa para encontrar o dial de tempo e o tape de cada relé. Inicialmente, é arbitrado um valor para o tape de cada relé, o que lineariza o modelo e torna possível a aplicação de um resolvidor de problemas de Programação Linear (PL) para determinar os diais de tempo. Na primeira iteração, utiliza-se um resolvidor de problemas de Programação Não Linear (PNL) para

determinar os tapes baseados nos valores dos diais encontrados na etapa inicial. Na próxima iteração, utiliza-se novamente o resolvidor de PL para determinar os diais baseados nos tapes determinados na iteração anterior. Esse processo se repete até que a solução convirja, ou seja, nenhuma mudança nos ajustes seja detectada de uma iteração para a próxima. Deve-se ressaltar que os ajustes são determinados na forma contínua quando utilizada essa metodologia.

Diversas técnicas de PL foram utilizadas para determinar o dial de tempo dos relés (URDANETA et al., 1996, 1997; CHATTOPADHYAY et al., 1996; ABDELAZIZ et al., 2002), uma vez que o tape pode ser fixado previamente, não sendo incluído no processo de otimização. O tape é determinado segundo uma base de regras que envolvem a corrente de carga máxima e a menor corrente de falta vista pelo relé. Essas técnicas são simples de serem implementadas e proporcionam uma convergência garantida para o ótimo em reduzidos tempos computacionais. O problema dessas técnicas é que os diais de tempo são determinados na forma contínua e o arredondamento da solução pode ocasionar falhas na coordenação. Também, como poderá ser visto nesse trabalho, quando os tapes forem variáveis no problema, melhores soluções podem ser obtidas sem o comprometimento da coordenação.

Em Zeineldin et al. (2004) utilizou-se um resolvidor exato para uma formulação de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), onde o tape e o dial de tempo de cada relé são determinados simultaneamente: o primeiro na forma discreta e o segundo na forma contínua.

Em Zeineldin et al. (2005) o problema de PNLIM de Zeineldin et al. (2004) foi reformulado em um modelo de Programação Inteira Mista (PIM) e utilizou-se, também, um resolvidor exato. Por meio dessa formulação, garante-se a convergência para o ótimo global, porém se introduz um maior número de restrições.

Em Birla et al. (2006) e em Birla et al. (2007) os autores propuseram o uso de um resolvidor exato fundamentando na técnica de Programação Quadrática Sequencial para resolver um problema de PNL, acarretando novamente no problema do arredondamento dos ajustes da solução. No primeiro, investiga-se a influência da corrente de falta no final do trecho protegido por cada relé na composição da função objetivo e uma nova função objetivo é proposta. No segundo, propõe-se uma abordagem em duas etapas para resolver o problema do disparo indevido de relés antes do relé mais próximo ao ponto em falta.

A partir do final dos anos 1990, metaheurísticas passaram a ser utilizadas. Em So et al. (1997) foi utilizado um Algoritmo Genético (AG) com codificação binária onde tanto o Multiplicador de Tempo (MT) quanto o Multiplicador de Corrente (MC) de cada relé foram

determinados na forma discreta. Já em Razavi et al. (2008), um AG foi utilizado para determinar somente MT de cada relé, diminuindo a complexidade do problema.

Uma Otimização por Enxame de Partículas (OEP) foi utilizada em Zeineldin et al. (2006) para resolver um problema de PNLIM, enquanto que em Mansour et al. (2007) a mesma metaheurística foi aplicada para encontrar apenas o MT dos relés, com o problema linearizado.

Uma comparação entre o desempenho de diferentes operadores de mutação para algoritmos evolutivos diferenciais modificados foi proposta por Thangaraj et al. (2010) para resolver um problema de PNL para coordenar relés de sobrecorrente em três sistemas teste.

As metaheurísticas utilizadas nesses trabalhos apresentaram um bom resultado em comparação com os métodos exatos. Entretanto, um dos problemas dessas metaheurísticas é a presença de uma quantidade razoável de parâmetros a serem ajustados para que se obtenha uma boa solução, sendo que a escolha desses depende do tamanho da instância.

Mais recentemente, em Noghabay et al. (2009) e em Bedekar e Bhide (2011) foram utilizadas técnicas híbridas que consistem em unir as vantagens das metaheurísticas com as dos resolvedores exatos. Em Noghabay et al. (2009), um resolvidor exato para a PL é executado a cada iteração de um AG, de modo que o primeiro determina os valores contínuos do MT e o segundo determina os valores discretos do MC dos relés. A coordenação é realizada para diferentes topologias do sistema elétrico, contemplando possíveis condições de operação do mesmo. Já em Bedekar e Bhide (2011), um AG é executado por um pequeno número de iterações para obter-se uma boa solução inicial, que é posteriormente carregada como ponto de partida em um método exato de PNL. Esse último opera, então, como uma busca local e determina ambos os ajustes dos relés na forma contínua para uma topologia fixa do sistema elétrico.

Em Noghabay et al. (2010) propõe-se o uso da Programação Linear Intervalar (PLI) para determinar somente o MT dos relés, na forma contínua, para um sistema elétrico considerando as diferentes topologias que esse sistema pode assumir. A PLI é uma variante da PL que consiste em resolver um problema linear com o objetivo de determinar dois vetores solução, sendo que a solução final é igual a diferença entre ambos. Essa modelagem é capaz de tratar problemas de grande porte devido à velocidade de convergência e simplicidade dos cálculos dos resolvedores de problemas de PL.

Em Mohammadi et al. (2011), os autores propõem um método que utiliza o AG com uma nova função objetivo para determinar o MT dos relés, considerando a prioridade de algumas restrições. A importância de cada restrição, representada por um valor de peso

específico, é determinada por meio de um conjunto de regras que dependem da topologia do sistema elétrico. Essas restrições ponderadas são incluídas na função objetivo com a finalidade de minimizar o tempo de operação dos relés e satisfazer um maior número de restrições, segundo a ordem de importância de cada uma.

O AG também é utilizado por Chabanloo et al. (2011) para coordenar relés de sobrecorrente e de distância em um sistema elétrico, determinando tanto o MT quanto a característica tempo-corrente dos relés. Novas restrições e função objetivo são elaboradas para contemplar a coordenação entre dois relés de sobrecorrente; entre relé de sobrecorrente e relé de distância; e entre relé de distância e relé de sobrecorrente. O uso de diferentes características tempo-corrente possibilita a redução do tempo de operação dos relés.

A determinação de diferentes características tempo-corrente na coordenação de relés de sobrecorrente também é contemplada por Ezzedine e Kaczmarek (2011). Nesse trabalho, os autores propõem, além disso, a determinação do MT e do MC dos relés, em valores discretos. Já em Ezzedine et al. (2011) os autores propõem a utilização da mesma técnica utilizada por Ezzedine e Kaczmarek (2011), à exceção da determinação da característica tempo-corrente de cada relé, que foi fixada previamente.

1.5 Estrutura da Dissertação

No capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência, tratando principalmente dos relés de sobrecorrente, foco deste trabalho, e de como se dá a coordenação desses dispositivos com ou sem a presença das suas unidades instantâneas.

No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento e a construção dos modelos matemáticos que servem como base para os que são apresentados no capítulo 4. Os modelos do capítulo 3, quando resolvidos, retornam variáveis na forma contínua e que não podem ser ajustados nos relés microprocessados. São mostradas e explicadas, também, as funções objetivo e as restrições utilizadas para cada problema.

O capítulo 4 trata do desenvolvimento dos dois novos modelos propostos, que têm por objetivo determinar diretamente os ajustes dentro da faixa disponibilizada pelos relés. São mostradas as alterações nos modelos anteriores que se fazem necessárias para que isso ocorra. Também, são mostrados e explicados os passos da metodologia utilizada para construir e resolver esses modelos.

O capítulo 5 apresenta, inicialmente, os *softwares* utilizados ao longo desse trabalho e as características dos relés considerados. Posteriormente, mostra-se os resultados obtidos pela resolução dos modelos matemáticos dos capítulos 3 e 4 para a proteção de sobrecorrente de fase e de neutro, com e sem a unidade instantânea dos relés, aplicados a dois sistemas teste malhados de diferentes portes. Os resultados são apresentados na forma dos ajustes obtidos para os relés, os tempos de atuação desses para algumas correntes de falta de interesse e o valor da função objetivo da solução final. Ainda, alguns comentários são tecidos sobre os resultados e as implicações práticas dessas soluções.

2 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

2.1 Considerações Gerais

Os relés de sobrecorrente são dispositivos largamente utilizados na proteção dos sistemas elétricos de potência. Podem ser utilizados na:

- a) Proteção primária de linhas de sistemas de subtransmissão e de sistemas industriais, onde o uso de proteções mais caras e mais sofisticadas, como a teleproteção ou relés de distância não se justifique;
- b) Proteção primária de alimentadores de sistemas de distribuição radiais;
- c) Proteção de retaguarda em linhas de transmissão;
- d) Proteção primária de transformadores de pequeno porte ou que não utilizem relé diferencial;
- e) Proteção de retaguarda de transformadores que utilizem relé diferencial;
- f) Proteção de motores elétricos.

Para o entendimento da metodologia proposta nessa dissertação, faz-se necessária uma introdução sobre os relés de sobrecorrente, seus tipos de tecnologia, suas aplicações, a filosofia adotada para a obtenção da coordenação e como eles são alimentados por meio dos transformadores de corrente.

2.2 Filosofia de Proteção

Os relés de sobrecorrente, assim como todos os dispositivos de proteção dos sistemas elétricos de potência, devem atender aos requisitos de confiabilidade, velocidade, simplicidade, sensibilidade e segurança. Para que esses sejam atendidos, é essencial que se tenha bem delineados os conceitos de zonas de proteção, proteção primária e de retaguarda.

2.2.1 Zonas de Proteção

O relé será considerado seguro se ele responder somente para as faltas ocorridas dentro da sua zona de proteção (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

A Figura 2.1 ilustra as zonas de proteção referentes às linhas de transmissão, aos barramentos e ao transformador de um sistema de potência. De modo a proteger todos os

equipamentos, essas zonas devem atender os seguintes requisitos (HOROWITZ; PHADKE, 2008):

- Todos os elementos do sistema devem estar cobertos por pelos menos uma zona;
- As zonas devem se sobrepor para evitar que um elemento do sistema fique desprotegido.

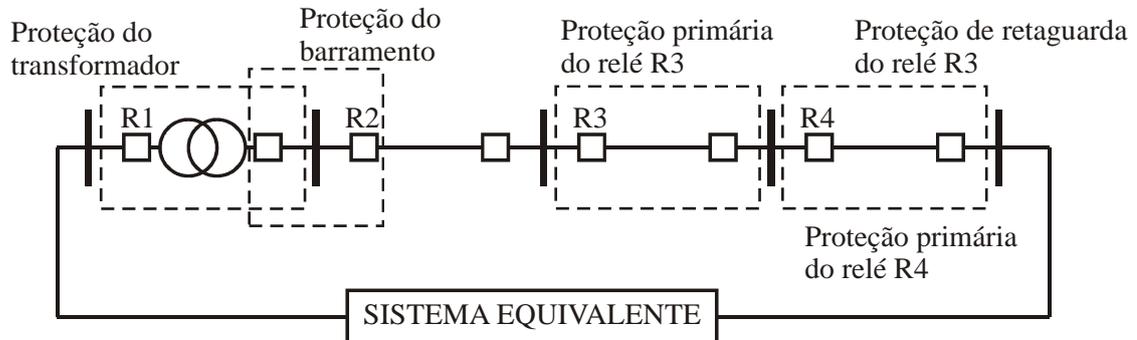


Figura 2.1 – Zonas de Proteção

2.2.2 Proteção Primária

O sistema de proteção principal de uma determinada zona de proteção é chamado de proteção primária. Este deve operar o mais rapidamente possível – para que, em decorrência das anomalias do circuito, os equipamentos não sejam danificados – e remover do serviço a menor quantidade de equipamentos, interrompendo o fornecimento de energia a uma menor quantidade de consumidores.

2.2.3 Proteção de Retaguarda

Uma vez que a proteção primária pode falhar durante o seu tempo de operação, é essencial a adoção de alternativas para que o trecho em falta seja isolado do restante do sistema. Esses sistemas de proteção alternativos podem ser de redundância, onde um relé com os mesmos ajustes da proteção primária é instalado junto a esta; de retaguarda, onde um relé opera com um retardo de tempo em relação à proteção primária, caso essa falhe; e de falha do disjuntor, onde um relé é responsável pela identificação de falha na operação do disjuntor.

A proteção de retaguarda pode ser local, ou seja, na mesma subestação onde está localizada a proteção primária, ou remota. Os relés de retaguarda remota são completamente independentes do sistema de proteção para o qual ele fornece retaguarda. O uso dessa filosofia

tem como desvantagens a remoção de uma maior quantidade de equipamentos e o aumento nos tempos de operação.

A principal vantagem da filosofia de retaguarda remota é a redução da quantidade necessária de relés em um sistema de proteção, pois um relé pode ser proteção tanto primária (para faltas ocorridas dentro de sua zona de proteção), quanto de retaguarda (para faltas ocorridas em uma zona de proteção adjacente).

2.3 Transformadores de Corrente

Os Transformadores de Corrente (TCs) são equipamentos indispensáveis para o funcionamento adequado do sistema de proteção. Como as magnitudes das correntes que fluem pelo sistema elétrico são elevadas, os relés de sobrecorrente são energizados por meio dos TCs, cuja função é replicar as altas correntes que fluem no seu enrolamento primário em uma escala menor no seu enrolamento secundário, fornecendo aos dispositivos de proteção conectados ao seu secundário o acesso aos sinais de corrente da rede (SANTOS, 2011). Assim, é importante que o TC esteja bem dimensionado para que não ocorra o fenômeno da saturação, que faz com que a forma de onda do enrolamento secundário seja distorcida em relação à forma de onda do enrolamento primário, o que pode causar a atuação indevida dos relés a ele conectados.

A razão entre as correntes que passam pelo primário e pelo secundário do TC, denominada Relação de Transformação de Corrente (*RTC*), é expressa por (2.1).

$$RTC = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_{1,nom}}{I_{2,nom}} \quad (2.1)$$

Onde:

- N_1 e N_2 são, respectivamente, os números de espiras do enrolamento primário e do enrolamento secundário do TC;
- I_1 e I_2 são, respectivamente, as correntes que passam pelo enrolamento primário e pelo enrolamento secundário do TC;
- $I_{1,nom}$ e $I_{2,nom}$ são, respectivamente, as correntes nominais do enrolamento primário e do enrolamento secundário do TC.

Em aplicações na América, utiliza-se o padrão ANSI com a corrente nominal do secundário de 5 A, e em aplicações na Europa utiliza-se o padrão IEC com a corrente nominal do secundário de 1 A.

O dimensionamento correto do TC para que esse não sature, mesmo na ocorrência de curtos-circuitos de elevada magnitude, deve atender aos critérios de corrente de carga e de máximo curto-circuito no ponto de instalação do TC, com fator de sobrecorrente igual a 20 (KINDERMANN, 2005).

2.4 Tipos de Tecnologia

A tecnologia utilizada no desenvolvimento de relés de proteção de sistemas elétricos progrediu dos eletromecânicos até o de estado sólido em um período de tempo relativamente curto (BLACKBURN; DOMIN, 2006). Essas tecnologias podem ser divididas, segundo Alstom (2011), em:

- a) Eletromecânico: todas as medições, comparações e mecanismos de disparo são analógicas. O seu princípio de funcionamento se dá por uma força mecânica operando em um contato, como resposta a um estímulo. Estes podem, ainda, serem do tipo de atração eletromagnética ou de indução eletromagnética.
- b) Estático: o termo estático indica que o relé não possui partes móveis para definir sua característica de operação, mas sim dispositivos eletrônicos analógicos para essa função. Versões mais antigas utilizavam transistores, diodos, resistores, capacitores e indutores, enquanto nas versões mais modernas, com os avanços no desenvolvimento de circuitos integrados lineares e digitais, tornou-se possível a implementação de funções lógicas e o processamento de sinais.
- c) Digital: microprocessadores e microcontroladores substituíram os circuitos eletrônicos analógicos dos relés estáticos com o objetivo de implementar suas funções. Esses relés utilizam uma conversão analógica para digital de todas as grandezas medidas e, posteriormente, utilizam um microprocessador para implementar as funções de proteção. Comparado aos relés eletromecânico e estático, o relé digital oferece uma maior disponibilidade de ajustes, uma maior precisão e canais para a comunicação com um computador remoto.
- d) Numérico: a distinção entre relés digitais e numéricos se dá por meio da evolução natural dos primeiros devido aos avanços na tecnologia. Os relés numéricos utilizam um ou mais processadores digitais de sinais, otimizados para processar

sinais em tempo real, que executam os algoritmos das funções de proteção até mesmo em paralelo. Outro grande avanço é a possibilidade da implementação de diversas funções de proteção em um único exemplar, que anteriormente estavam presentes em *hardwares* separados.

Embora a tendência seja a sistemática substituição dos relés eletromecânicos pelos microprocessados, dadas as inerentes vantagens desses últimos, os primeiros ainda se fazem presentes em muitos sistemas elétricos devido à sua boa confiabilidade.

2.5 Relé de Sobrecorrente Temporizado (ANSI 51/51N)

O relé de sobrecorrente temporizado é um dispositivo de proteção utilizado tanto para fases (51) quanto para o neutro (51N) que tem como principal característica a sua operação após um retardo de tempo. São condições para que o relé inicie essa contagem de tempo:

- a) A corrente que passa pelos terminais do relé deve exceder um valor pré-fixado, dado pelo ajuste da corrente de disparo (I_{51});
- b) Essa mesma corrente deve permanecer passando pelos terminais do relé até que esse opere, ou seja, desde o início da contagem do tempo até que se atinja o tempo característico de disparo.

Na proteção de linhas, o ajuste da corrente de disparo de fase deve obedecer ao critério dado por (2.2), enquanto que no neutro o ajuste da corrente de disparo deve obedecer ao critério dado por (2.3). Todos os valores são referidos ao secundário do TC.

$$a \times I_{c,\max} \leq I_{51F} \leq \frac{I_{FF,\min}}{b} \quad (2.2)$$

Onde:

- I_{51F} é o ajuste da corrente de disparo de fase;
- $I_{c,\max}$ é a corrente de carga máxima vista pelo relé;
- a é selecionado usualmente entre 1,5 e 2,5. Tem como função evitar que o relé opere indevidamente em condições de sobrecargas de curta duração;
- $I_{FF,\min}$ é a menor corrente de curto-circuito bifásico no final do circuito a ser protegido;
- b tem valor 1,5 se considerado um relé eletromecânico e 1,1 se considerado um relé microprocessado. Tem como função garantir que o relé seja sensibilizado pela menor corrente de curto-circuito do circuito protegido.

$$I_{desb,max} \leq I_{51N} \leq \frac{I_{FT,min}}{b} \quad (2.3)$$

Onde:

- I_{51N} é o ajuste da corrente de disparo de neutro;
- $I_{desb,max}$ é a máxima corrente de desbalanço que passa pelo neutro de circuitos aterrados, usualmente de 10% a 45% da corrente de carga nominal;
- $I_{FT,min}$ é a menor corrente de curto-circuito entre fase e terra no final do circuito protegido.

Usualmente, seleciona-se o valor mais próximo do limite inferior dessas expressões para aumentar a sensibilidade dos relés.

Nos relés de sobrecorrente temporizados microprocessados, a corrente de disparo de fase depende da corrente nominal do relé (1 A ou 5 A) e da seleção de um Multiplicador de Corrente (MC_{51F}), que pode ser calculado por meio de (2.4). A corrente de disparo de neutro depende da corrente nominal do relé e da seleção de um Multiplicador de Corrente (MC_{51N}), que pode ser calculado por meio de (2.5).

$$MC_{51F} = I_{51F} / I_{nom} \quad (2.4)$$

$$MC_{51N} = I_{51N} / I_{nom} \quad (2.5)$$

Onde:

- I_{51F} é o ajuste da corrente de disparo de fase;
- I_{51N} é o ajuste da corrente de disparo de neutro;
- I_{nom} é a corrente nominal do relé.

Os valores de MC_{51F} e MC_{51N} variam entre um mínimo e um máximo com um passo constante.

Os relés de sobrecorrente temporizados podem, ainda, serem classificados segundo o seu tempo de operação como sendo de tempo definido ou de tempo inverso.

2.5.1 Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido (RSTD)

Nesses relés, o tempo de atuação independe do valor da corrente que passa por seus terminais, ou seja, é constante, podendo ser ajustado através do dial de tempo. A Figura 2.2

ilustra a característica do tempo de operação desses relés para uma corrente maior do que o ajuste da corrente de disparo (I_{51}).

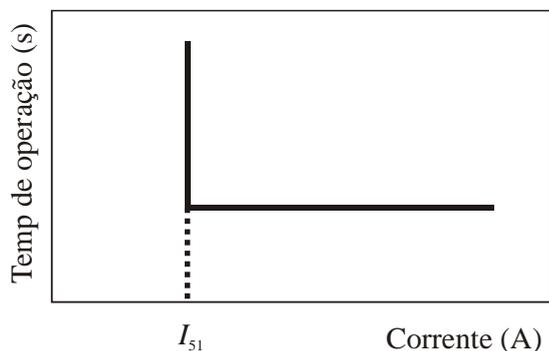


Figura 2.2 – Tempo de operação do RSTD

As melhores aplicações do RSTD se dão, segundo Elmore (2003), quando:

- a) Não há restrições na sua coordenação com outros dispositivos da cadeia de proteção;
- b) Em linhas curtas, onde as variações na corrente entre faltas na barra onde o relé está instalado e na barra remota do circuito protegido for muito pequena para tirar vantagem da característica inversa;
- c) Quando a unidade instantânea fornecer uma boa cobertura do circuito protegido.

O RSTD eletromecânico possui algumas temporizações pré-definidas, cada uma com um dial de tempo associado, e alguns valores para a escolha do tape. Ambos os ajustes são disponibilizados em uma pequena faixa de ajuste.

Já nos dispositivos microprocessados, o tempo de operação é dado por $t = MT_{51}$, onde o MT_{51} é um Multiplicador de Tempo (MT_{51F} para fase e MT_{51N} para neutro) que varia entre um mínimo e um máximo com passo constante.

2.5.2 Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso (RSTI)

O RSTI tem como principal característica o fato de que o seu tempo de operação é inversamente proporcional à corrente que passa por seus terminais, ou seja, quanto maior a corrente, mais rapidamente o relé irá operar.

Tanto para os RSTIs eletromecânicos quanto para os microprocessados existe uma variedade de características da inclinação das curvas, ou características tempo-corrente, cada uma com aplicações específicas. Por exemplo, nos relés eletromecânicos da família CO da

ABB existem os tipos CO-7, CO-8, CO-9 e CO-11 que representam, respectivamente, as características moderadamente inversa, inversa, muito inversa e extremamente inversa.

A Figura 2.3 ilustra a família de curvas de tempo de operação vs. múltiplo do tape de um relé eletromecânico, onde a elevação da curva pode ser obtida por meio da seleção do dial de tempo e o múltiplo do tape M é a razão entre a corrente que passa pelos terminais do relé e o seu tape. Observa-se que todas as curvas tem início em $M = 1,5$, pois para valores de M inferiores a 1,5 o relé está na sua região de incerteza de operação, onde não é possível garantir sua operação correta.

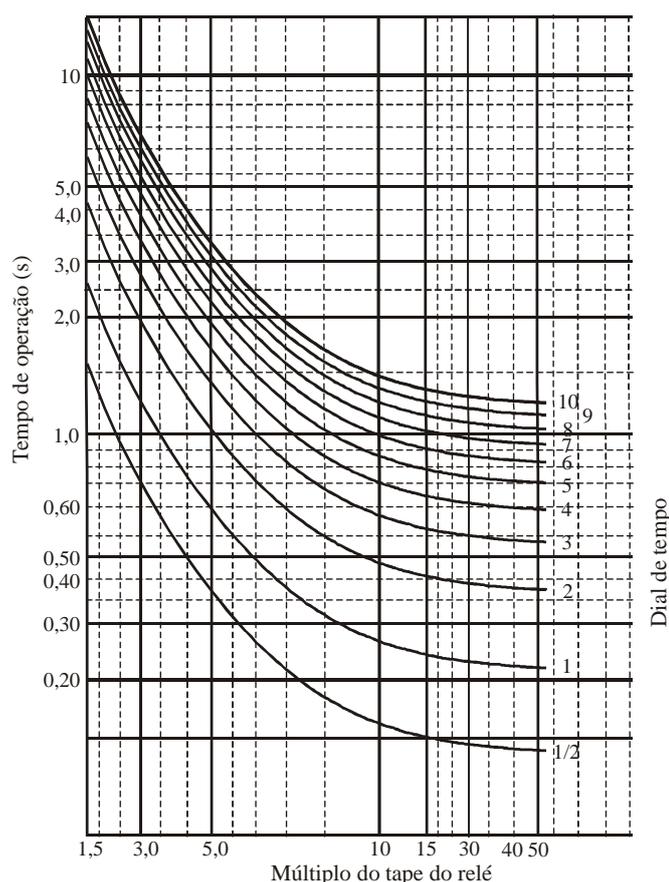


Figura 2.3 – Família de curvas de um relé eletromecânico

As melhores aplicações das diferentes características da inclinação das curvas do RSTI se dão, segundo Elmore (2003) quando:

- a) A característica inversa fornece um menor tempo de operação para correntes de falta de baixa magnitude em relação às características mais inclinadas. Esse fato possibilita a aplicação dessa característica em linhas longas, onde a corrente de falta

no ponto de instalação do relé é muito maior do que a corrente de falta no final do circuito protegido.

- b) As características muito inversa e extremamente inversa são utilizadas quando a corrente de falta no ponto de instalação do relé é muito maior do que a corrente de falta no final do circuito protegido, há uma corrente de *inrush* considerável durante a reenergização do sistema e quando há a necessidade de coordenar o relé com dispositivos como, por exemplo, elos fusíveis.
- c) Essas três características são ideais em sistemas com topologia em anel.

No RSTI microprocessado, utiliza-se a equação dada por (2.6) para calcular o seu tempo de operação (t) considerando as diferentes características da inclinação das curvas previstas pelas normas IEC 60255-3 e ANSI C37.112-1996, que são as mais utilizadas mundialmente. A condição para que o relé opere é dada por (2.7), onde Δt_{amos} é o intervalo de amostragem e k_{op} é a quantidade de amostras processadas até que o relé opere.

$$t = MT_{51} \times \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_{51}} \right)^P - 1} + B \right] \quad (2.6)$$

Onde:

- MT_{51} é o Multiplicador de Tempo do relé;
- I é a corrente de entrada do relé;
- I_{51} é o ajuste da corrente de disparo do relé;
- A , B e P são coeficientes que definem a característica da curva.

$$\Delta t_{amos} \sum_{k=1}^{k_{op}} \left(\frac{1}{t} \right) = 1 \quad (2.7)$$

As diferentes características são alcançadas por meio da seleção dos coeficientes A , B e P , dados na Tabela 2.1. Ressalta-se que os fabricantes utilizam diferentes coeficientes para essas características, conforme a faixa de valores do MT disponível, e também disponibilizam características adicionais não contempladas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Coeficientes da característica da curva do RSTI microprocessado

| Norma | Tipo de curva | A | P | B |
|-------|-----------------------|--------|------|--------|
| IEC | A | 0,14 | 0,02 | 0 |
| | B | 13,5 | 1,0 | 0 |
| | C | 80 | 2 | 0 |
| ANSI | Moderadamente Inversa | 0,0515 | 0,02 | 0,1140 |
| | Muito Inversa | 19,61 | 2 | 0,4910 |
| | Extremamente Inversa | 28,2 | 2 | 0,1217 |

Na Figura 2.4 é ilustrado o comportamento do tempo de operação de um relé considerando as características da norma IEC 60255-3, para MT igual a 1.

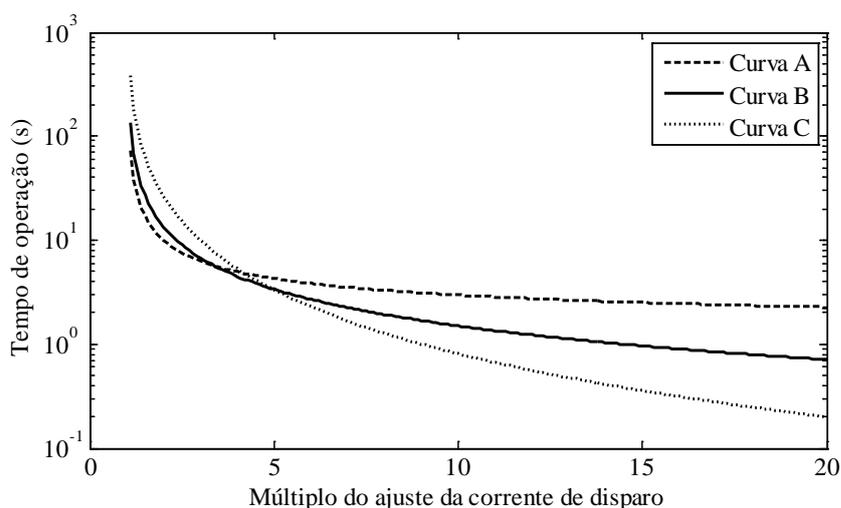


Figura 2.4 – Tempo de operação do RSTI considerando as características da norma IEC 60255-3

2.6 Relé de Sobrecorrente Instantâneo (ANSI 50)

O relé de sobrecorrente instantâneo é um dispositivo de proteção de alta velocidade utilizado tanto para fases (50) quanto para o neutro (50N) que tem como principal característica a sua operação em um tempo reduzido, uma vez que a corrente que passa pelos terminais do relé exceder o ajuste da corrente de disparo (I_{50}).

As suas principais aplicações se dão na proteção primária de linhas e transformadores em conjunto com os relés de sobrecorrente temporizados, aumentando a velocidade do sistema de proteção.

Na proteção de linhas, o ajuste da corrente de disparo de fase (I_{50F}) deve obedecer ao critério dado por (2.8), onde $I_{FFF,85\%}$ é a corrente de curto-circuito trifásico a 85% do início da linha protegida. Dá-se uma folga de 15% na linha de transmissão para garantir o relé não

sobrealcance o relé a jusante (KINDERMANN, 2005). O ajuste da corrente de disparo de neutro (I_{50N}) deve obedecer ao critério dado por (2.9), onde $I_{FT,85\%}$ é a corrente de curto-circuito entre fase e terra, com impedância de falta nula, a 85% do início da linha protegida. Todos os valores são referidos ao secundário do TC.

$$I_{50F} = I_{FFF,85\%} \quad (2.8)$$

$$I_{50N} = I_{FT,85\%} \quad (2.9)$$

Na proteção de transformadores, I_{50F} deve ser maior do que a corrente de *inrush* de fase e do que a corrente de curto-circuito trifásico no secundário do transformador, enquanto que I_{50N} deve ser maior do que a corrente de *inrush* de neutro e do que a corrente de curto-circuito entre fase e terra, com impedância de falta nula, no secundário do transformador.

Nos dispositivos instantâneos microprocessados, I_{50F} é calculado por meio de (2.10) e I_{50N} é calculado por meio de (2.11), onde MC_{50F} e MC_{50N} são Multiplicadores de Corrente que variam entre um mínimo e um máximo com um passo constante e I_{nom} é a corrente nominal do relé.

$$I_{50F} = MC_{50F} \times I_{nom} \quad (2.10)$$

$$I_{50N} = MC_{50N} \times I_{nom} \quad (2.11)$$

2.7 Relé de Sobrecorrente Direcional (ANSI 67)

O relé de sobrecorrente direcional é um dispositivo de proteção de fase (67) e de neutro (67N) que pode ter característica de operação tanto temporizada quanto instantânea, com princípio de funcionamento análogo para ambos, à exceção de que este opera para as correntes que passam pelos seus terminais em um único sentido, somente.

A direcionalidade se faz necessária em circuitos com múltiplas fontes de energia ou com topologia em anel e tem como objetivo limitar o disparo dos relés para faltas em uma única direção. Do contrário, pode se tornar impossível a obtenção da coordenação e a seletividade com os dispositivos de proteção à montante e à jusante, uma vez que a mesma magnitude de corrente pode fluir em ambos os sentidos (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

Elmore (2003) apresenta um critério para a determinação da necessidade de haver direcionalidade nos relés de sobrecorrente temporizado e instantâneo na proteção de linhas, tanto para fase quanto para neutro. Esse critério foi utilizado neste trabalho.

2.8 Coordenação de Relés de Sobrecorrente

Diz-se que um sistema de proteção está coordenado quando os relés operarem o mais rápido possível para faltas ocorridas dentro de suas zonas de proteção, porém com um retardo de tempo intencional na proteção de retaguarda (BLACKBURN; DOMIN, 2006). A operação da proteção de retaguarda é incorreta e indesejável, a menos que a proteção primária falhe na eliminação da falta ocorrida na sua zona de proteção.

2.8.1 Tempo de Coordenação

Na ocorrência de uma falta, correntes de mesma ou diferente magnitude passam pelos terminais dos relés primários e das respectivas retaguardas remotas. Considerando as diversas condições de falta que podem ocorrer em um sistema elétrico, para evitar que as retaguardas operem antes das proteções primárias, faz-se necessária uma discriminação mínima de tempo entre as sucessivas proteções da cadeia, de forma a maximizar a continuidade do serviço. A essa discriminação é dada o nome de Tempo de Coordenação (Δt), que segundo Elmore (2003) é um valor dependente do tempo de interrupção da falta pelo disjuntor, o tempo de sobrepercurso do relé eletromecânico ou de estado sólido após a corrente de falta ser interrompida e de uma margem de segurança para compensar os erros relativos ao cálculo das correntes de falta, da seleção dos ajustes do relé, do tempo de operação do relé e da *RTC* do TC. O seu valor é selecionado, usualmente, entre 0,2 a 0,5 segundos, dependendo do conservadorismo e da tecnologia dos dispositivos utilizados no sistema de proteção.

2.8.2 Método de Coordenação

O objetivo geral do estudo da coordenação de relés de sobrecorrente é a determinação dos ajustes de tempo de cada relé, de modo a atender os critérios estabelecidos pela filosofia de proteção adotada.

A inequação básica do processo de coordenação de relés de sobrecorrente sem o elemento instantâneo na proteção primária é dada por (2.12). Com o elemento instantâneo na

proteção primária, a coordenação é assegurada por (2.13) se a corrente de falta sensibilizá-lo e por (2.12) se a corrente de falta sensibilizar o seu elemento temporizado.

$$t_r(F) - t_p(F) \geq \Delta t \quad (2.12)$$

$$t_r(F) \geq \Delta t \quad (2.13)$$

Onde:

- $t_r(F)$ é o tempo de operação da proteção de retaguarda para uma falta em F ;
- $t_p(F)$ é o tempo de operação da proteção primária para uma falta em F ;
- Δt é o Tempo de Coordenação.

Utilizando-se (2.12) ou (2.13), determina-se o tempo de operação necessário à coordenação para o relé de retaguarda remota. Feito isso, pode-se determinar o MT da retaguarda por meio de (2.6), no caso de RSTI microprocessados, e o dial de tempo de RSTI eletromecânicos por meio das curvas fornecidas pelo fabricante do dispositivo.

Em sistemas elétricos radiais, é usual iniciar o estudo partindo das linhas mais a jusante (que possuem níveis de curto-circuito menores), indo em direção aos relés mais próximos à fonte de geração. É por isso que se evita a utilização de RSTDs em uma cadeia de proteção, pois os tempos de atuação dos relés mais próximos à fonte serão altos se comparados àqueles provindos da utilização de RSTIs.

A disseminação da Geração Distribuída (GD) nos sistemas elétricos atuais causa problemas na coordenação dos dispositivos de proteção devido ao fato de que estes não foram ajustados considerando a direcionalidade, uma vez que sem a GD a corrente de falta flui em um único sentido, somente. Essa disseminação tende a transformar os sistemas radiais em interconectados, onde a direcionalidade se faz necessária (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

A coordenação em sistemas malhados é mais complexa e difícil de ser realizada. Para cada falta, a corrente vista pelo relé de retaguarda pode ser diferente daquela vista pelo relé primário. Efeitos como o *infeed* e o *outfeed* fazem com que as correntes de falta menos severas (como as do final do trecho protegido pela proteção primária) sejam vistas pela retaguarda como sendo semelhantes à corrente de carga do circuito por ela protegido. Também, uma mudança na configuração do sistema, como a retirada de uma linha para a manutenção, altera o fluxo de potência nas linhas e também os níveis de curto-circuito. Desse modo, em sistemas malhados são utilizados dois relés direcionais por linha, cada um

protegendo uma extremidade, para que ocorra a discriminação do sentido da corrente e o mesmo método de coordenação de sistemas radiais é aplicado, com a diferença de que diversas condições operativas são consideradas.

2.9 Considerações Finais

Neste capítulo, introduziu-se os fundamentos e as principais aplicações da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência por meio dos relés de sobrecorrente temporizados e instantâneos, com ou sem direcionalidade. Também, abordou-se o método de coordenação desses dispositivos, que usualmente é utilizado pelos engenheiros de proteção. O entendimento desse método se faz necessário para a compreensão dos modelos matemáticos para a coordenação que são apresentados no próximo capítulo.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Considerações Gerais

A coordenação de relés de sobrecorrente, quando efetuada por meio do método exposto no capítulo anterior, produz uma solução que é a melhor somente dentre aquelas que foram testadas. Portanto, para se determinar a melhor solução dentre todas as possíveis, pode-se testá-las uma a uma, o que apresentaria um custo computacional elevado, dependendo do porte do sistema elétrico.

Para determinar bons ajustes para os relés sem a necessidade de testar todas as possíveis soluções, pode-se fazer uso das técnicas de otimização.

A aplicação dessas técnicas se justifica, principalmente, em sistemas elétricos interconectados, onde há uma dificuldade na aplicação do método de coordenação exposto no capítulo anterior devido à inexistência de um ponto de partida para o estudo da coordenação, ao contrário do que ocorre em sistemas radiais.

Esse capítulo formula a coordenação de relés como um problema de otimização, sendo apresentadas as particularidades do modelo utilizado, bem como a sua linearização.

3.2 Modelagem Matemática

Nos relés microprocessados o tempo de operação é representado por meio de uma equação. Desse modo, o problema da coordenação de relés de sobrecorrente pode ser modelado como sendo de PNL, onde as variáveis a serem determinadas para cada relé são os ajustes da unidade temporizada: MC_{51F} e MT_{51F} para fase; MC_{51N} e MT_{51N} para neutro. Esses ajustes são discretos e possuem valores definidos pelos fabricantes.

Um problema de PNL é aquele onde a sua Função Objetivo (FO) e as suas restrições são não lineares em relação às suas variáveis. A coordenação de relés é um problema não linear, pois tanto a FO quanto as suas restrições são modeladas utilizando a equação do tempo de operação dada pela equação (2.6), que possui o MC_{51} no denominador e elevado em um expoente.

O modelo genérico de um problema de PNL cujo objetivo é minimizar uma função é dado por (3.1).

$$\min_x f(x)$$

sujeito a:

(3.1)

$$\begin{cases} g_j(x) \leq 0 & \forall j, 1 \leq j \leq nj \\ h_k(x) = 0 & \forall k, 1 \leq k \leq nk \\ li \leq x \leq ls \end{cases}$$

Onde:

- x é a variável do problema;
- $f(x)$ é a Função Objetivo;
- nj e nk são, respectivamente, os números de restrições de desigualdade e de igualdade;
- $g_j(x)$ é a restrição de desigualdade j ;
- $h_k(x)$ é a restrição de igualdade k ;
- li e ls são, respectivamente, os limites inferior e superior de x .

Com base nesse modelo genérico, a seguir serão apresentadas e comentadas as Funções Objetivo e as restrições utilizadas no modelo de PNL com variáveis contínuas, as quais diferem devido ao uso, ou não, da unidade instantânea de cada relé. O mesmo modelo vale para o estudo da proteção tanto de fase quanto de neutro, diferindo apenas pelas correntes utilizadas na sua construção. Também, serão tecidos alguns comentários acerca do caráter contínuo das variáveis.

3.2.1 Função Objetivo

O objetivo é aumentar a velocidade do sistema de proteção, ou seja, reduzir o tempo de operação dos relés, independentemente da magnitude da falta. Dessa forma, a FO é modelada pela equação (3.2), no caso em que os relés não possuem unidade instantânea, ou por (3.3), na presença da unidade instantânea.

$$FO = \sum_{i=1}^{ni} t_i(I_i) + \sum_{j=1}^{nj} t_j(I_j) \quad (3.2)$$

$$FO = \sum_{k=1}^{nk} t_k(I_k) + \sum_{j=1}^{nj} t_j(I_j) \quad (3.3)$$

Onde:

- I_i é a máxima corrente de curto-circuito vista pelo relé i , considerado como proteção primária (logo após o ponto de instalação do seu TC);
- I_j é a mínima corrente de curto-circuito vista pelo relé j , considerado como proteção primária (no final da linha protegida pelo relé j);
- I_k é a corrente de curto-circuito em 85% da linha protegida pelo relé k ;
- nI_i é o número de relés que têm sua unidade temporizada sensibilizada por I_i ;
- nI_j é o número de relés que têm sua unidade temporizada sensibilizada por I_j ;
- nI_k é o número de relés que têm sua unidade temporizada sensibilizada por I_k ;
- $t_i(I_i)$ é o tempo de operação da unidade temporizada do relé i , sensibilizado por I_i ;
- $t_j(I_j)$ é o tempo de operação da unidade temporizada do relé j , sensibilizado por I_j ;
- $t_k(I_k)$ é o tempo de operação da unidade temporizada do relé k , sensibilizado por I_k .

Utilizando em (3.2) a maior e a menor corrente vista por cada relé quando estes operarem como proteção primária, faz-se com que os tempos de operação destes sejam minimizados não somente considerando essas duas correntes, mas para todas as contidas no intervalo delimitado pelas mesmas. Em outras palavras, a proteção primária será veloz para qualquer curto-circuito dentro da zona de proteção primária. O mesmo vale para (3.3), com a diferença de que se utiliza, para cada relé, a corrente de disparo da unidade instantânea I_{50} ao invés da maior corrente de curto-circuito, pois eles atuam de forma temporizada somente para correntes menores do que I_{50} .

3.2.2 Restrições

3.2.2.1 Restrições do Tempo de Coordenação

Embora o objetivo do problema seja minimizar o tempo de operação dos relés para as faltas ocorridas em sua zona de proteção, deve-se respeitar o tempo de coordenação entre as curvas das proteções de retaguarda e primária, de modo a garantir a coordenação. Todavia, não é viável testar a coordenação por meio de (2.12) e (2.13) para as correntes de curto-circuito decorrentes de todas as faltas que podem ocorrer na linha.

No método de coordenação apresentado no capítulo anterior, desconsiderando as unidades instantâneas, é usual se utilizar a máxima corrente de curto-circuito ocorrida na zona de proteção do relé que opera como proteção primária para se testar a coordenação e

determinar os ajustes dos relés das subestações a montante. Em sistemas radiais, onde a corrente de carga (em p.u.) cresce no sentido carga-fonte e não for recomendada a utilização de características tempo-corrente diferentes entre dois relés adjacentes (ALSTOM, 2011), a utilização dessa corrente é suficiente para garantir a coordenação. No entanto, em sistemas malhados, a utilização unicamente dessa corrente não é suficiente: se a corrente de carga (em p.u.) da proteção de retaguarda for maior do que a da proteção primária, a corrente de disparo da retaguarda (em p.u.) também será maior, podendo ocasionar falhas na coordenação para curtos-circuitos de menor magnitude, onde as curvas estarão mais próximas uma da outra.

Desse modo, as restrições do tempo de coordenação entre uma proteção primária e a sua respectiva retaguarda, desconsiderando as unidades instantâneas, são dadas por (3.4). Considerando suas unidades instantâneas, as restrições ficam na forma de (3.5). Essas restrições podem ser mais bem compreendidas por meio da Figura 3.1.

$$\begin{cases} t_{R2}(F_0) - t_{R1}(F_0) \geq \Delta t \\ t_{R2}(F_{100}) - t_{R1}(F_{100}) \geq \Delta t \\ t'_{R2}(F_0) - t'_{R1}(F_0) \geq \Delta t \\ t'_{R2}(F_{100}) - t'_{R1}(F_{100}) \geq \Delta t \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} t_{R2}(F_0) \geq \Delta t \\ t_{R2}(F_{85}) - t_{R1}(F_{85}) \geq \Delta t \\ t_{R2}(F_{100}) - t_{R1}(F_{100}) \geq \Delta t \\ t'_{R2}(F_{100}) - t'_{R1}(F_{100}) \geq \Delta t \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde:

- F_0 , F_{100} e F_{85} são, respectivamente, o ponto de curto-circuito em 0%, em 100% e em 85% da linha protegida por R_1 ;
- $t_{R1}(F_0)$ e $t_{R2}(F_0)$ são, respectivamente, os tempos de operação da proteção primária e da sua retaguarda para uma falta em F_0 , com o disjuntor de R_3 fechado;
- $t_{R1}(F_{100})$ e $t_{R2}(F_{100})$ são, respectivamente, os tempos de operação da proteção primária e da sua retaguarda para uma falta em F_{100} , com o disjuntor de R_3 fechado;

- $t'_{R1}(F_0)$ e $t'_{R2}(F_0)$ são, respectivamente, os tempos de operação da proteção primária e da sua retaguarda para uma falta em F_0 com o disjuntor de R_3 aberto.
- $t'_{R1}(F_{100})$ e $t'_{R2}(F_{100})$ são, respectivamente, os tempos de operação da proteção primária e da sua retaguarda para uma falta em F_{100} com o disjuntor de R_3 aberto.
- $t_{R1}(F_{85})$ e $t_{R2}(F_{85})$ são, respectivamente, os tempos de operação da proteção primária e da sua retaguarda para uma falta em F_{85} , com o disjuntor de R_3 fechado. Ressalta-se que essa restrição não é incluída no modelo quando o relé primário estiver protegendo um transformador, pois correntes de falta a 85% do transformador não fazem sentido.

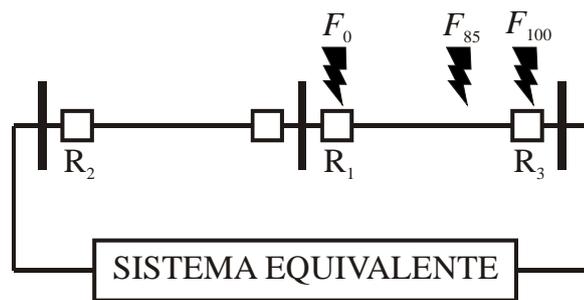


Figura 3.1 – Local das faltas das restrições do tempo de coordenação

Como a coordenação se dá por pares de relés da cadeia de proteção, é necessário levantar todas as possíveis combinações desses pares, o que pode ser realizado automaticamente por meio da teoria dos grafos, ou manualmente por meio de inspeção visual.

Cada restrição foi modelada de maneira a possibilitar a coordenação não apenas para faltas no início da linha protegida, mas também para outras três situações, aumentando as chances de que para faltas em qualquer ponto da linha, sob qualquer condição operativa do sistema, o sistema de proteção permaneça coordenado.

As restrições relativas à abertura do disjuntor associado ao relé R_3 são importantes no que diz respeito à abertura deste antes de R_1 , para uma falta ocorrida na zona de proteção compreendida por esses relés. Com isso, ocorrerá uma alteração na magnitude das correntes vistas pelos relés R_1 e R_2 , fazendo com que esses operem em tempos diferentes daqueles da situação onde o disjuntor de R_3 estava fechado, devido à mudança na topologia do sistema. Se essas restrições não forem incluídas e os tempos de operação diminuïrem, pode ser que R_2 opere antes de R_1 .

Ainda, se consideradas as unidades instantâneas, desconsidera-se a restrição relativa a curtos-circuitos em F_0 com o disjuntor do final da linha aberto, pois a corrente de falta proveniente dessa configuração vista pelo par de relés pode ser suficientemente alta para

disparar a unidade instantânea da proteção de retaguarda, impossibilitando a coordenação (ambos os relés irão atuar simultaneamente) e tornando o problema infactível.

É importante ressaltar que se procurou fazer com que cada relé fosse sensível à faltas até o final da zona de proteção do relé adjacente, ou seja, opere como proteção de retaguarda para pelo menos uma proteção primária. Entretanto, nem sempre isso será possível, uma vez que para essas faltas a corrente vista pelo relé de retaguarda é menor do que o limite inferior dos valores para ajuste da corrente de disparo da sua unidade temporizada.

A partir do que foi exposto no parágrafo acima, é possível notar que para cada par de relés existirão até quatro restrições a serem incluídas no modelo. As restrições relativas à faltas em F_0 , com o disjuntor de R_3 aberto ou fechado, estarão sempre presentes se desconsideradas a unidade instantânea dos relés, uma vez que a magnitude das correntes de falta é suficientemente elevada para sensibilizar tanto a proteção primária quanto a sua respectiva retaguarda. Já nas faltas relativas à F_{100} , existirão situações em que a proteção de retaguarda não terá sensibilidade para operar e, desse modo, essas restrições não deverão ser incluídas no modelo. Do contrário, cria-se uma infactibilidade e inviabiliza-se a aplicação dos métodos de otimização utilizados neste trabalho.

3.2.2.2 Restrição do Tempo de Operação

Embora se deseje que os relés operem rapidamente, incluiu-se restrições de tempo mínimo de operação para os relés de modo a facilitar a inclusão de novas restrições referentes ao uso de outros dispositivos de proteção com característica de operação de tempo definido ou instantâneo. Por exemplo, pode-se utilizar o relé de sobrecorrente temporizado como proteção de retaguarda em transformadores, em caso de falha do relé diferencial; e em linhas de transmissão, pode-se utilizar o relé de sobrecorrente temporizado como proteção de retaguarda de relés de distância.

A restrição do tempo de operação é dada em (3.6). A diferença entre a utilização da unidade instantânea ou somente a unidade temporizada reside na utilização de valores de I'_i diferentes. Observe que essas restrições utilizam a maior corrente vista pela unidade temporizada do relé i , a qual propicia o menor tempo de operação.

$$t_i(I'_i) \geq t_{\min} \quad (3.6)$$

Onde:

- I'_i é a máxima corrente de curto-circuito vista pelo relé i , com o disjuntor do final da linha aberto, se desconsiderada a sua unidade instantânea;
- I_i é a corrente de curto-circuito vista pelo relé i para uma falta a 85% do início da linha protegida, com o disjuntor do final da linha fechado, se considerada a sua unidade instantânea. Se o relé i estiver protegendo um transformador, I_i é a corrente de curto-circuito para uma falta no secundário do mesmo;
- $t_i(I'_i)$ é o tempo de operação da unidade temporizada do relé i , se este for sensibilizado pela corrente I'_i ;
- t_{\min} é uma constante que representa o tempo mínimo de operação da unidade temporizada.

3.2.2.3 Limites das Variáveis

O MT_{51} do relé i possui como limitantes os ajustes mínimo e máximo do dispositivo utilizado, que podem ser consultados no manual do fabricante. Essa restrição é dada em (3.7).

O MC_{51} do relé i possui, em adição aos limites impostos pelo fabricante, o limitante praticável dado por (2.2) para a proteção de fase ou o dado por (2.3) para a proteção de neutro. Dessa forma, os limites reais do MC_{51} do relé i são dados pela intersecção desses dois conjuntos, na forma de (3.8).

$$MT_{51,i,\min} \leq MT_{51,i} \leq MT_{51,i,\max} \quad (3.7)$$

$$\max(MC'_{51,i,\min}, MC_{51,i,\min}) \leq MC_{51,i} \leq \min(MC'_{51,i,\max}, MC_{51,i,\max}) \quad (3.8)$$

Onde:

- $MT_{51,i}$ é o Multiplicador de Tempo do relé i ;
- $MC_{51,i}$ é o Multiplicador de Corrente do relé i ;
- $MT_{51,i,\min}$ é o menor MT_{51} disponibilizado pelo relé i ;
- $MT_{51,i,\max}$ é o maior MT_{51} disponibilizado pelo relé i ;
- $MC'_{51,i,\min}$ é o menor MC_{51} praticável do relé i ;
- $MC_{51,i,\min}$ é o menor MC_{51} disponibilizado pelo relé i ;
- $MC'_{51,i,\max}$ é o maior MC_{51} praticável do relé i ;

- $MC_{51,i,\max}$ é o maior MC_{51} disponibilizado pelo relé i ;

3.2.3 Caráter Contínuo das Variáveis

Neste ponto, é importante ressaltar que se nenhuma restrição adicional for incluída no modelo não linear exposto nesse capítulo, o resolvidor não será capaz de interpretar o fato de que os ajustes dos relés devem ser determinados em valores discretos, ou seja, dentro daqueles disponibilizados pelo dispositivo microprocessado. Desse modo, o resolvidor irá determinar ajustes contínuos, muitas vezes fora dos valores disponibilizados pelo relé, o que exige o arredondamento dos ajustes finais para os valores mais próximos.

3.3 Linearização do Modelo

O fato do modelo apresentado nas seções anteriores deste capítulo ser não linear implica na necessidade de se utilizar técnicas de otimização de programação matemática de alta complexidade e de alta carga computacional para resolvê-lo.

Desse modo, procura-se, sempre que possível, um modo de linearizar o modelo para resolvê-lo por meio de técnicas de programação matemática de menor complexidade e de menor carga computacional.

Voltando à equação do tempo de operação do relé, dada por (2.6), nota-se que a variável que produz a não linearidade é o MC_{51} , que está no denominador e elevado em um expoente. Tanto na FO quanto em todas as restrições, os outros valores são conhecidos, à exceção de MT_{51} . Assim, se o MC_{51} do relé i for fixado, essa equação fica na forma de (3.9) e a constante que multiplica o MT_{51} pode ser calculada por meio de (3.10).

$$t_i = a_i \times MT_{51,i} \quad (3.9)$$

$$a_i = \left[\frac{A_i}{\left(\frac{I_i}{MC_{51,i}} \right)^{P_i} - 1} + B_i \right] \quad (3.10)$$

Onde:

- A_i , B_i e P_i são os coeficientes da característica tempo-corrente do relé i ;
- I_i é a corrente de entrada do relé i .

Para que essa linearização possa ser realizada, é necessário escolher os valores do MC_{51} do relé i antes que seja iniciado o algoritmo de otimização. Como é desejável que os relés tenham a maior sensibilidade possível, sem que haja o comprometimento da coordenação, escolhe-se para o relé i o ajuste mais próximo do limite inferior de (3.8).

Escolhido o MC_{51} do relé i , utiliza-se (3.9) para construir o modelo linearizado, à exceção da restrição dada por (3.8) que não deverá ser incluída, uma vez que o MC_{51} já foi fixado e não é mais uma das variáveis do problema. Nota-se que, agora, o número de variáveis foi reduzido.

Esse modelo linearizado pode ser resolvido por meio de técnicas de PL e os ajustes são determinados na forma contínua.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se a formulação do modelo matemático não linear empregado na coordenação de relés de sobrecorrente por meio de técnicas de otimização. Para esse modelo, as variáveis são o MT_{51} e o MC_{51} de cada relé.

Detalhou-se a construção da FO e das restrições, considerando a unidade instantânea ou somente a unidade temporizada de cada relé.

Também, apresentou-se o artifício utilizado na linearização do modelo, o que faz com que o número de variáveis do problema seja reduzido. Isso é alcançado por meio da fixação do MC_{51} de cada relé em etapa anterior ao processo de otimização.

O entendimento desses fundamentos é essencial para a compreensão dos modelos matemáticos que são apresentados no próximo capítulo, os quais são fundamentos na Programação Inteira Binária e possibilitam a determinação dos valores discretos dos ajustes de cada relé diretamente, sem a necessidade de arredondá-los para os valores mais próximos disponíveis em cada relé.

4 PROGRAMAÇÃO INTEIRA BINÁRIA APLICADA NA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE

4.1 Considerações Gerais

No capítulo anterior, delineou-se os contornos do modelo matemático utilizado na resolução do problema da coordenação de relés de sobrecorrente. Tanto no modelo não linear quanto no linearizado, os ajustes são determinados na forma contínua, embora sejam desejados os valores discretos disponíveis nos relés. Também, o modelo não linear é resolvido por técnicas de otimização de programação matemática que possuem maiores complexidade e carga computacional em relação ao linear.

Para contornar esses problemas, desenvolveu-se novos modelos fundamentados na Programação Inteira Binária (PIB), onde novas variáveis e restrições são incluídas nos modelos apresentados no capítulo anterior, com o objetivo de se determinar os ajustes discretos de cada relé sem a necessidade de se arredondar a solução final para os valores mais próximos disponíveis.

Esse capítulo trata das generalidades da PIB, onde são apresentadas as suas principais características e um dos algoritmos utilizados na resolução de problemas desse tipo. São apresentadas as modificações realizadas no modelo não linear do capítulo anterior para que, agora, variáveis binárias contemplem a discretização dos ajustes dos relés.

Também, é apresentado o fluxograma e as etapas da metodologia proposta para a coordenação de relés de sobrecorrente, agora considerando modelos lineares e com variáveis binárias com um número maior de restrições e de variáveis.

4.2 Programação Inteira Binária

A PIB é uma particularização da Programação Inteira (PI) para o caso em que todas as variáveis são binárias. Em muitos problemas práticos, as variáveis só fazem sentido se os seus valores forem inteiros, ou binários, o que inviabiliza a aplicação direta de métodos de resolução de problemas de PL, os quais determinam valores contínuos para as variáveis de decisão. Ainda, o arredondamento das soluções para os valores inteiros pode produzir infactibilidade e/ou uma nova solução que não é a ótima do problema inteiro (HILLIER; LIEBERMAN, 1988).

O modelo generalizado de um problema de PIB de minimização é dado por (4.1).

$$\min_x f(x)$$

sujeito a:

(4.1)

$$\begin{cases} A_i x \leq b_i \quad \forall i, 1 \leq i \leq ni \\ x \in \{0,1\} \end{cases}$$

Onde:

- x é a variável binária;
- $f(x)$ é a Função Objetivo;
- A_i é uma constante relativa à restrição i que multiplica a variável x ;
- b_i é uma constante relativa à restrição i ;
- ni é o número de restrições lineares;

Com o passar dos anos, grandes avanços foram alcançados no desenvolvimento e na implementação de algoritmos para a resolução de problemas de PI com um melhor desempenho em termos de tempo computacional e de qualidade da solução. Por volta da década de 1980, os algoritmos estavam limitados a resolver problemas pequenos, com poucas dúzias de variáveis (HILLIER; LIEBERMAN, 1988). Nos dias atuais, já existem algoritmos de alto desempenho para problemas de PI e PIB, que são capazes de resolver problemas reais com um grande número de restrições e variáveis, até mesmo da ordem dos milhões, em tempos reduzidos.

Um problema de PIB tem um número finito de soluções factíveis. A avaliação de todas as possíveis soluções desse problema, ou procedimento de enumeração explícita, pode acarretar em um tempo computacional excessivamente elevado, dependendo do tamanho do problema. Dessa forma, justifica-se o uso de procedimentos de enumeração implícita, como a técnica de *branch-and-bound* (HILLIER; LIEBERMAN, 1988; SMITH; TASKIN, 2008), onde somente algumas soluções serão avaliadas segundo uma base de regras.

4.3 Novos Modelos Propostos

4.3.1 Modelo 1 – Determinação do MT_{51}

Considerando o modelo linearizado apresentado seção 3.3, onde o MC_{51} de cada relé foi determinado por meio da seleção do valor disponível no relé mais próximo ao limite inferior de (3.8), nota-se que as variáveis restantes são o MT_{51} de cada relé. Se esse modelo

fosse resolvido por meio de um resolvidor de PL, a solução final apresentaria ajustes contínuos, que muitas vezes não estão disponíveis. Dessa forma, com o uso de variáveis binárias é possível fazer com que o MT_{51} seja determinado na forma discreta diretamente.

Como em relés microprocessados o MT_{51} é disponibilizado em valores distanciados igualmente entre si, pode-se considerar que o valor do MT_{51} do relé i é calculado por meio de (4.2), onde o $MT_{i,j}$ é calculado por meio de (4.3).

$$MT_{51,i} = \sum_{j=1}^{nMTi} (y_{i,j} MT_{i,j}) \quad (4.2)$$

$$MT_{i,j} = MT_{51,i,\min} + (j-1) \times MT_{51,i,\text{passo}} \quad (4.3)$$

Onde:

- $nMTi$ é o número de valores do MT_{51} disponíveis para ajuste no relé i ;
- $y_{i,j}$ é uma variável de seleção que pode assumir os valores 0 ou 1;
- $MT_{51,i,\min}$ é o menor valor do MT_{51} disponível para ajuste no relé i ;
- $MT_{51,i,\text{passo}}$ é o passo entre dois valores consecutivos do MT_{51} do relé i .

Nota-se que, para que o $MT_{51,i}$ seja igual ao valor de $MT_{i,j}$, e não uma composição de dois ou mais valores, é necessário que seja respeitada a expressão (4.4). Essa expressão indica que, para o relé i , somente um $y_{i,j}$ poderá ser igual à unidade, enquanto os outros serão iguais a zero. Portanto, o valor $MT_{i,j}$ associado ao $y_{i,j}$ não nulo determinará o MT_{51} do relé i .

$$\sum_{j=1}^{nMTi} y_{i,j} = 1 \quad (4.4)$$

Dessa forma, combinando as equações (3.9) e (4.2) obtêm-se a expressão (4.5), que modela o tempo de operação do relé i em função não mais da variável contínua $MT_{51,i}$, mas em função das variáveis binárias $y_{i,j}$, uma vez que os valores de $MT_{i,j}$ passam a ser constantes.

$$t_i = a_i \times \sum_{j=1}^{nMTi} (y_{i,j} MT_{i,j}) \quad (4.5)$$

Utilizando-se o tempo de operação dado por (4.5) na construção da FO e das restrições do modelo linearizado da seção 3.3, com o acréscimo da restrição na forma de (4.4) e da condição dada por (4.6) para o relé i , obtém-se um novo modelo.

$$y_{i,j} \in \{0,1\} \quad (4.6)$$

Devido à necessidade da inclusão das restrições de unicidade de $y_{i,j}$, esse novo modelo possui nr restrições a mais em relação ao modelo linearizado da seção 3.3, onde nr é o número de relés do sistema. Também, há um significativo aumento no número de variáveis. No modelo anterior, apenas uma variável era suficiente para representar o MT_{51} do relé i , sendo que agora são necessárias $nMTi$ variáveis a mais para este mesmo relé.

4.3.2 Modelo 2 – Determinação do MT_{51} e do MC_{51}

Nesse novo modelo, tanto o MC_{51} quanto o MT_{51} de cada relé são variáveis do problema, ao contrário do exposto no modelo 1 de PIB, onde o primeiro era fixado em etapa anterior ao processo de otimização. A diferença entre o modelo 2 de PIB e o não linear apresentado no capítulo anterior é que, agora, variáveis binárias passam a representar os valores de ambos os ajustes de cada relé, em adição ao fato de que a FO e as restrições são lineares.

Considerando-se a equação do tempo de operação do relé i , dada por (2.6), pode-se representar esse mesmo tempo com o auxílio de uma série de variáveis binárias na forma de (4.7), onde $c_{i,j,k}$ é calculado por meio da equação (4.8), $MC_{i,k}$ por meio da equação (4.9) e $MT_{i,j}$ por meio da equação (4.3).

$$t_i = \sum_{j=1}^{nMTi} \sum_{k=1}^{nMCi} (c_{i,j,k} x_{i,j,k}) \quad (4.7)$$

$$c_{i,j,k} = MT_{i,j} \times \left[\frac{A_i}{\left(\frac{I_i}{MC_{i,k}} \right)^{P_i} - 1} + B_i \right] \quad (4.8)$$

$$MC_{i,k} = MC''_{51,i,\min} + (k-1) \times MC_{51,i,\text{passo}} \quad (4.9)$$

Onde:

- $x_{i,j,k}$ é uma variável de seleção que pode assumir os valores 0 ou 1;
- nMT_i é o número de valores do MT_{51} disponíveis para ajuste no relé i ;
- nMC_i é o número de valores do MC_{51} disponível no relé i e que estão contidos dentro do intervalo delimitado por (3.8);
- $MT_{i,j}$ é calculado por meio de (4.3);
- $MC_{51,i,\text{passo}}$ é o passo entre dois valores consecutivos do MC_{51} do relé i ;
- $MC''_{51,i,\min}$ é o MC_{51} do relé i mais próximo do limite inferior de (3.8).

Analogamente ao modelo 1 de PIB, para se garantir que em cada relé há apenas uma solução, ou seja, que se determine para o relé i somente um valor para o MC_{51} e para o MT_{51} , é necessário que a expressão (4.10) seja respeitada.

$$\sum_{j=1}^{nMT_i} \sum_{k=1}^{nMC_i} x_{i,j,k} = 1 \quad (4.10)$$

Utilizando-se o tempo de operação dado por (4.7) na construção da FO e das restrições do modelo não linear da seção 3.2, com o acréscimo da restrição na forma de (4.10) e da condição dada por (4.11) para o relé i , obtém-se um novo modelo que é linear, mas que possibilita a determinação tanto do MC_{51} quanto do MT_{51} de cada dispositivo.

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad (4.11)$$

Devido às restrições de unicidade da solução, esse modelo possui nr restrições a mais do que o modelo não linear exposto no capítulo 3, onde nr é o número de relés do sistema. Também o número de variáveis cresce consideravelmente, dependendo dos valores que o MC_{51} e o MT_{51} de cada relé puderem assumir. Para exemplificar isso, toma-se o exemplo onde há de se coordenar dois relés, cada um com três MT_{51} e quatro MC_{51} disponíveis:

- a) No modelo não linear, existirão somente duas variáveis para cada relé: uma para o MT_{51} e outra para o MC_{51} . Dessa forma, o número de variáveis será igual a 4;
- b) No novo modelo, existirão $3 \times 4 = 12$ variáveis para cada relé, contemplando todas as combinações possíveis entre ambos os ajustes, totalizando 24 variáveis.

Para exemplificar a aplicação do modelo 2 de PIB, considere um relé de sobrecorrente que possui os valores 1,2 e 1,5 disponíveis para o MC_{51} e os valores 0,5 e 0,6 disponíveis para o MT_{51} . Dessa forma, o tempo de operação do relé (t), que tem coeficientes da característica da curva A_1 , B_1 e P_1 , para uma corrente de entrada I_1 , é dado por (4.12).

$$t = c_{1,1,1}x_{1,1,1} + c_{1,1,2}x_{1,1,2} + c_{1,2,1}x_{1,2,1} + c_{1,2,2}x_{1,2,2} \quad (4.12)$$

Para obter o valor de $c_{1,1,1}$ é necessário calcular, primeiramente, os valores de $MT_{1,1}$ por meio de (4.13) e de $MC_{1,1}$ por meio de (4.14). Assim, $c_{1,1,1}$ fica na forma de (4.15).

$$MT_{1,1} = MT_{51,1,\min} + (j-1) \times MT_{51,1,\text{passo}} = 0,5 + (1-1) \times 0,1 = 0,5 \quad (4.13)$$

$$MC_{1,1} = MC_{51,1,\min} + (k-1) \times MC_{51,1,\text{passo}} = 1,2 + (1-1) \times 0,3 = 1,2 \quad (4.14)$$

$$c_{1,1,1} = MT_{1,1} \times \left[\frac{A_1}{\left(\frac{I_1}{MC_{1,1}}\right)^{P_1} - 1} + B_1 \right] = 0,5 \times \left[\frac{A_1}{\left(\frac{I_1}{1,2}\right)^{P_1} - 1} + B_1 \right] \quad (4.15)$$

Para obter o valor de $c_{1,1,2}$ é necessário $MC_{1,2}$ por meio de (4.16) (o valor de $MT_{1,1}$ já é conhecido). Assim, $c_{1,1,2}$ fica na forma de (4.17).

$$MC_{1,2} = MC_{51,1,\min} + (k-1) \times MC_{51,1,\text{passo}} = 1,2 + (2-1) \times 0,3 = 1,5 \quad (4.16)$$

$$c_{1,1,2} = MT_{1,1} \times \left[\frac{A_1}{\left(\frac{I_1}{MC_{1,2}}\right)^{P_1} - 1} + B_1 \right] = 0,5 \times \left[\frac{A_1}{\left(\frac{I_1}{1,5}\right)^{P_1} - 1} + B_1 \right] \quad (4.17)$$

Procedendo dessa forma, calcula-se todos os valores $c_{i,j,k}$.

A restrição de unicidade da variável de seleção fica na forma de (4.18).

$$x_{1,1,1} + x_{1,1,2} + x_{1,2,1} + x_{1,2,2} = 1 \quad (4.18)$$

4.4 Fluxograma da Metodologia Proposta

A Figura 4.1 ilustra o fluxograma da metodologia proposta para a coordenação de relés de sobrecorrente. Cada etapa é comentada a seguir.

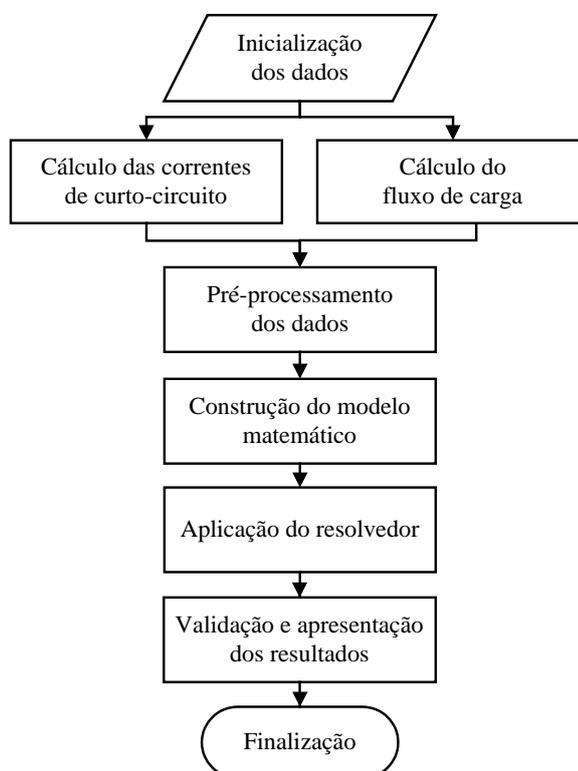


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta

4.4.1 Inicialização dos Dados

São fornecidos a um algoritmo os seguintes dados de inicialização:

- O menor ajuste do MT_{51} e do MC_{51} disponível em cada relé;
- O maior ajuste do MT_{51} e do MC_{51} disponível em cada relé;
- O passo do MT_{51} e do MC_{51} de cada relé;
- Os coeficientes da característica tempo-corrente de cada relé;
- Os pares de relés a serem coordenados;
- O tempo de coordenação entre cada par de relés a ser coordenado;
- O tempo mínimo de operação da unidade temporizada dos relés.

4.4.2 Cálculo das Correntes de Curto-Circuito

Calcula-se a corrente de curto-circuito em diversos pontos do sistema elétrico. Tais correntes são aquelas que tornam possível a construção de todas as restrições e a FO do modelo matemático utilizado.

Quando o estudo for para os relés de fase, calcula-se as correntes de falta trifásicas e bifásicas que não envolvem a terra, enquanto que para o estudo dos relés de neutro se calcula as correntes de falta monofásicas que envolvem a terra.

4.4.3 Cálculo do Fluxo de Carga

Para determinar a corrente de carga máxima vista por cada relé em diversas situações de operação do sistema elétrico, calcula-se o fluxo de carga do sistema para cada uma dessas situações. Desse modo, é possível estabelecer o limite inferior do ajuste do MC_{51} de cada relé.

4.4.4 Pré-Processamento dos Dados

Com base nas informações obtidas até o momento, determina-se:

- A *RTC* de cada relé utilizando os critérios de corrente de carga e de máximo curto-circuito no ponto de instalação do TC;
- Os limites inferior e superior para ajuste do MC_{51} de cada relé;

4.4.5 Construção do Modelo Matemático

Constrói-se o modelo matemático de interesse utilizando as correntes de falta calculadas anteriormente na elaboração das restrições e da FO, respeitando os limites dos ajustes determinados na etapa de pré-processamento dos dados.

Se o modelo for de PNL, considera-se o exposto na seção 3.2. Se o modelo for de PL, considera-se o exposto na seção 3.3. No entanto, se o modelo for de PIB, utiliza-se o modelo 1 de PIB da subseção 4.3.1 ou o modelo 2 de PIB da subseção 4.3.2, dependendo de quais ajustes se deseja determinar para cada relé.

4.4.6 Aplicação do Resolvedor

Aplica-se o resolvedor pertinente na resolução do modelo matemático construído anteriormente, obtendo como saída os ajustes de cada relé. Cada modelo, de PNL, PL ou PIB, é solucionado por um resolvedor específico.

4.4.7 Validação e Apresentação dos Resultados

Caso a solução do problema convirja, é tomado o resultado final do resolvedor. No caso dos problemas de PNL e PL, os ajustes são determinados diretamente, não sendo necessária a aplicação de qualquer rotina para decodificar a solução. Já no caso do problema de PIB, como as variáveis da solução são binárias, é necessário converter a solução para os valores ajustáveis de cada relé.

A solução passa, então, por uma rotina de verificação, a fim de identificar possíveis erros na construção do modelo. Testa-se se os ajustes determinados para cada relé atendem os limites estabelecidos e se nenhuma restrição foi violada. Após essa etapa, os ajustes de cada relé e seus respectivos tempos de operação são apresentados para o usuário.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a PIB, suas principais características e técnicas utilizadas para a determinação de variáveis binárias diretamente, sem a necessidade do arredondamento da solução final, o que ocorre nos problemas de PNL e de PL.

Mostrou-se como se dá a construção dos modelos matemáticos de PIB propostos neste trabalho para a coordenação de relés de sobrecorrente. O modelo 1 de PIB determina somente o MT_{51} de cada relé, enquanto o modelo 2 de PIB torna possível a determinação tanto do MT_{51} quanto do MC_{51} de cada relé.

Ainda, detalhou-se as etapas da metodologia proposta para a construção e a resolução do modelo matemático.

O entendimento desses conceitos é importante para uma correta interpretação dos resultados das simulações realizadas, que são expostas no próximo capítulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes às simulações realizadas em dois sistemas teste. Os modelos matemáticos utilizados foram apresentados nos capítulos anteriores. O principal objetivo é validar os novos modelos de PIB propostos no capítulo 4 e mostrar sua superioridade em relação àqueles mostrados no capítulo 3 em termos da qualidade da solução obtida.

São expostos os sistemas testes utilizados, suas características, os relés de fase e de neutro, os *softwares* utilizados, entre outros aspectos. Após isso, são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas, fazendo uma comparação entre os modelos com variáveis binárias e os modelos com variáveis contínuas.

5.2 Softwares Utilizados

Para o cálculo das correntes de curto-circuito e do fluxo de carga utilizou-se o DIGSILENT PowerFactory®. Para o pré-processamento dos dados e desenvolvimento dos modelos matemáticos utilizou-se o MATLAB®.

O modelo de PNL foi resolvido por meio de um resolvedor do MATLAB para problemas não lineares, restritos e com múltiplas variáveis, que utiliza um método de Programação Quadrática Sequencial. Já o modelo linearizado de PL foi resolvido por meio de um resolvedor de problemas lineares do MATLAB fundamentado no Método dos Pontos Interiores.

Os modelos de PIB foram resolvidos por meio de um resolvedor para problemas de Programação Inteira Mista do CPLEX® versão 12.1.0. O computador utilizado para executá-lo tem um processador Intel® Quad-Core Xeon X3360 2,83 GHz. Em linguagem C++, utilizou-se as funcionalidades da classe IloCplex, que abre um ambiente onde a construção do modelo matemático fica mais intuitiva e que permite, entre outras coisas, a configuração e a execução do resolvedor, além do tratamento dos resultados em um único arquivo executável. Do contrário, seria necessário construir o modelo, carregá-lo no ambiente do CPLEX, executar o resolvedor e tomar a solução, tudo isso manualmente.

5.3 Relés de Sobrecorrente Utilizados

Em todos os casos estudados, utilizou-se relés de sobrecorrente direcionais microprocessados com unidades de proteção temporizada e instantânea tanto de fase quanto de neutro. Ainda, utilizou-se somente a característica tempo-corrente tipo A da norma IEC 60255-3, cujos coeficientes são dados na Tabela 2.1.

Os ajustes disponíveis da unidade temporizada de fase e de neutro são os seguintes:

- MC_{51} entre 0,1 e 4,0 em passos de 0,1;
- MT_{51} entre 0,05 e 3,20 em passos de 0,05.

Os ajustes disponíveis da unidade instantânea de fase e de neutro são os seguintes:

- MC_{50} entre 0,1 e 25,0 em passos de 0,1.

5.4 Padronizações das Simulações

Em todas as simulações utilizou-se um Tempo de Coordenação de 0,2 segundos entre relés e um tempo mínimo de operação dos relés de 0,2 segundos.

A coordenação dos relés de sobrecorrente é realizada individualmente para fase e para neutro. Na proteção de fase utilizou-se as correntes de falta trifásica e bifásica que não envolvem a terra. Já na proteção de neutro utilizou-se a corrente de falta monofásica com a terra, com uma impedância de falta nula.

Nos cálculos dos curtos-circuitos considerou-se uma tensão pré-falta de 1,0 p.u. Ainda, as correntes de carga máxima são iguais ao dobro das correntes de carga nominais dos circuitos.

Todos os resolvedores utilizados foram executados em suas configurações padrão.

5.5 Sistema Teste 1

O diagrama unifilar do Sistema Teste 1 (ST1) é ilustrado na Figura 5.1. Este sistema foi retirado de Bedekar e Bhide (2011) e possui 24 relés de sobrecorrente instalados nas extremidades de cada linha, indicados pelos números na mesma figura. Os dados desse sistema podem ser encontrados no Anexo 1.

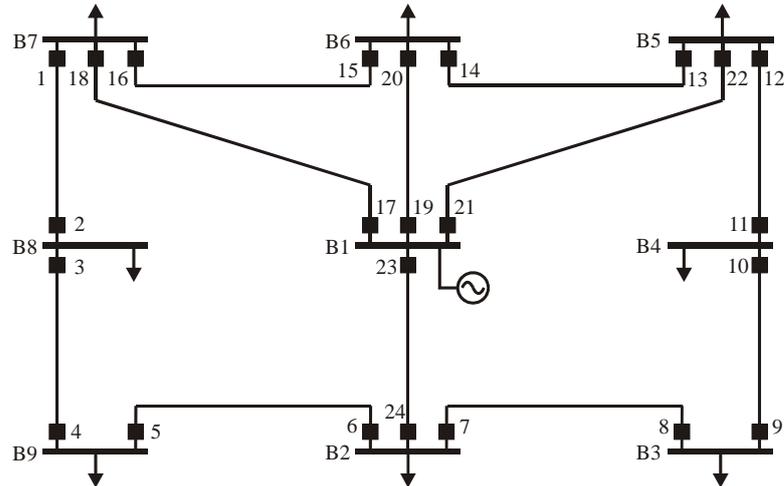


Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema teste 1

5.5.1 Caso 1: Proteção de Fase e de Neutro sem Unidades Instantâneas

Após a etapa do pré-processamento dos dados, obteve-se os valores mínimo e máximo do MC_{51F} e do MC_{51N} mostrados na Tabela 5.1. É possível notar que para alguns os relés o limite inferior é igual ao limite superior. Isso se deve pelo fato de que a corrente vista por esses relés para faltas nas zonas de proteção adjacentes, onde eles operam como retaguarda, é da ordem de grandeza da corrente de carga, o que limita as possibilidades de ajuste para a proteção de fase e de neutro.

Tabela 5.1 – Limites inferior e superior do MC_{51F} e do MC_{51N} para o caso 1

| Relé | Limite inferior do MC_{51F} | Limite superior do MC_{51F} | Limite inferior do MC_{51N} | Limite superior do MC_{51N} |
|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1,6 | 3,5 | 0,5 | 2,4 |
| 2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 3 | 1,2 | 2,0 | 0,3 | 1,4 |
| 4 | 0,5 | 1,8 | 0,3 | 1,2 |
| 5 | 0,8 | 0,8 | 0,2 | 0,2 |
| 6 | 0,9 | 3,2 | 0,5 | 2,2 |
| 7 | 0,7 | 3,2 | 0,5 | 2,2 |
| 8 | 0,8 | 0,8 | 0,2 | 0,2 |
| 9 | 0,4 | 1,8 | 0,3 | 1,2 |
| 10 | 1,2 | 2,0 | 0,3 | 1,4 |
| 11 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 12 | 1,6 | 3,5 | 0,5 | 2,4 |
| 13 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,5 |

| Relé | Limite inferior do MC_{51F} | Limite superior do MC_{51F} | Limite inferior do MC_{51N} | Limite superior do MC_{51N} |
|------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 14 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,5 |
| 15 | 1,4 | 1,4 | 0,5 | 0,5 |
| 16 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,5 |
| 17 | 2,6 | 3,0 | 1,1 | 2,1 |
| 18 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 |
| 19 | 2,6 | 2,8 | 1,1 | 1,9 |
| 20 | 0,7 | 0,7 | 0,4 | 0,4 |
| 21 | 2,6 | 3,0 | 1,1 | 2,1 |
| 22 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 |
| 23 | 2,6 | 4,0 | 1,1 | 2,8 |
| 24 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |

A Tabela 5.2 mostra os valores do MT_{51F} e do MC_{51F} determinados para o modelo de PL e para o modelo 1 de PIB, lembrando que os valores do MC_{51F} são iguais para os dois modelos. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação para faltas trifásicas no início ($t_{0\%}$) e bifásicas no final ($t_{100\%}$) da linha protegida.

Tabela 5.2 – Solução do modelo de PL e do modelo 1 de PIB, de fase, para o caso 1

| Relé | Modelo de PL | | | | Modelo 1 de PIB | | | |
|------|--------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 1,6 | 0,1907 | 0,5922 | 0,9673 | 1,6 | 0,30 | 0,9314 | 1,5214 |
| 2 | 0,3 | 0,2256 | 0,5843 | 0,8189 | 0,3 | 0,35 | 0,9066 | 1,2705 |
| 3 | 1,2 | 0,1687 | 0,6469 | 0,9933 | 1,2 | 0,25 | 0,9585 | 1,4719 |
| 4 | 0,5 | 0,2538 | 0,6699 | 0,8808 | 0,5 | 0,40 | 1,0558 | 1,3882 |
| 5 | 0,8 | 0,1573 | 0,6275 | 1,0366 | 0,8 | 0,25 | 0,9976 | 1,6479 |
| 6 | 0,9 | 0,2605 | 0,6740 | 0,9661 | 0,9 | 0,40 | 1,0350 | 1,4837 |
| 7 | 0,7 | 0,2768 | 0,6522 | 0,9018 | 0,7 | 0,40 | 0,9425 | 1,3031 |
| 8 | 0,8 | 0,1609 | 0,6422 | 1,0607 | 0,8 | 0,25 | 0,9976 | 1,6479 |
| 9 | 0,4 | 0,2566 | 0,6220 | 0,7984 | 0,4 | 0,40 | 0,9697 | 1,2446 |
| 10 | 1,2 | 0,1716 | 0,6580 | 1,0103 | 1,2 | 0,25 | 0,9585 | 1,4719 |
| 11 | 0,3 | 0,2117 | 0,5483 | 0,7684 | 0,3 | 0,35 | 0,9066 | 1,2705 |
| 12 | 1,6 | 0,1932 | 0,5998 | 0,9797 | 1,6 | 0,30 | 0,9314 | 1,5214 |
| 13 | 0,8 | 0,1852 | 0,4754 | 0,7878 | 0,8 | 0,30 | 0,7700 | 1,2759 |
| 14 | 0,8 | 0,2273 | 0,5516 | 0,8824 | 0,8 | 0,35 | 0,8493 | 1,3586 |
| 15 | 1,4 | 0,1612 | 0,4914 | 0,9199 | 1,4 | 0,25 | 0,7621 | 1,4265 |
| 16 | 0,8 | 0,2028 | 0,5206 | 0,8627 | 0,8 | 0,30 | 0,7700 | 1,2759 |
| 17 | 2,6 | 0,1473 | 0,3864 | 0,9207 | 2,6 | 0,25 | 0,6558 | 1,5626 |
| 18 | 0,6 | 0,0840 | 0,2242 | - | 0,6 | 0,10 | 0,2669 | - |
| 19 | 2,6 | 0,1393 | 0,3654 | 0,9215 | 2,6 | 0,20 | 0,5247 | 1,3231 |
| 20 | 0,7 | 0,0844 | 0,2223 | - | 0,7 | 0,10 | 0,2633 | - |
| 21 | 2,6 | 0,1487 | 0,3901 | 0,9294 | 2,6 | 0,25 | 0,6558 | 1,5626 |
| 22 | 0,6 | 0,0840 | 0,2242 | - | 0,6 | 0,10 | 0,2669 | - |

| Relé | Modelo de PL | | | | Modelo 1 de PIB | | | |
|------|--------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 23 | 2,6 | 0,1746 | 0,4581 | 1,0119 | 2,6 | 0,25 | 0,6558 | 1,4486 |
| 24 | 0,4 | 0,0857 | 0,2265 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2643 | - |
| FO | 30,4721 | | | | 46,7732 | | | |

A Tabela 5.3 mostra os valores do MT_{51N} e do MC_{51N} determinados para o modelo de PL e para o modelo 1 de PIB, lembrando que os valores do MC_{51N} são iguais para os dois modelos. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação dos relés para faltas monofásicas no início e no final da linha protegida.

Tabela 5.3 – Solução do modelo de PL e do modelo 1 de PIB, de neutro, para o caso 1

| Relé | Modelo de PL | | | | Modelo 1 de PIB | | | |
|------|--------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-----------------|
| | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 0,5 | 0,3156 | 0,7512 | 1,0019 | 0,5 | 0,40 | 0,9520 | 1,2698 |
| 2 | 0,2 | 0,2358 | 0,6369 | 0,8388 | 0,2 | 0,30 | 0,8104 | 1,0672 |
| 3 | 0,3 | 0,3056 | 0,7803 | 0,9536 | 0,3 | 0,40 | 1,0215 | 1,2483 |
| 4 | 0,3 | 0,2697 | 0,7118 | 0,8713 | 0,3 | 0,35 | 0,9238 | 1,1308 |
| 5 | 0,2 | 0,2753 | 0,7223 | 0,9123 | 0,2 | 0,35 | 0,9181 | 1,1596 |
| 6 | 0,5 | 0,2829 | 0,7107 | 0,9354 | 0,5 | 0,35 | 0,8793 | 1,1573 |
| 7 | 0,5 | 0,2731 | 0,6862 | 0,9032 | 0,5 | 0,35 | 0,8793 | 1,1573 |
| 8 | 0,2 | 0,2829 | 0,7421 | 0,9373 | 0,2 | 0,35 | 0,9181 | 1,1596 |
| 9 | 0,3 | 0,2576 | 0,6800 | 0,8324 | 0,3 | 0,35 | 0,9238 | 1,1308 |
| 10 | 0,3 | 0,3120 | 0,7968 | 0,9737 | 0,3 | 0,40 | 1,0215 | 1,2483 |
| 11 | 0,2 | 0,2341 | 0,6324 | 0,8328 | 0,2 | 0,30 | 0,8104 | 1,0672 |
| 12 | 0,5 | 0,3209 | 0,7636 | 1,0186 | 0,5 | 0,40 | 0,9520 | 1,2698 |
| 13 | 0,5 | 0,2253 | 0,5875 | 0,8997 | 0,5 | 0,30 | 0,7823 | 1,1981 |
| 14 | 0,5 | 0,2694 | 0,6635 | 0,9873 | 0,5 | 0,35 | 0,8621 | 1,2828 |
| 15 | 0,5 | 0,2659 | 0,6550 | 0,9746 | 0,5 | 0,35 | 0,8621 | 1,2828 |
| 16 | 0,5 | 0,2275 | 0,5933 | 0,9086 | 0,5 | 0,30 | 0,7823 | 1,1981 |
| 17 | 1,1 | 0,2256 | 0,5198 | 0,9707 | 1,1 | 0,30 | 0,6913 | 1,2911 |
| 18 | 0,4 | 0,0808 | 0,2252 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2787 | - |
| 19 | 1,1 | 0,2023 | 0,4661 | 0,9053 | 1,1 | 0,25 | 0,5761 | 1,1188 |
| 20 | 0,4 | 0,0859 | 0,2219 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2583 | - |
| 21 | 1,1 | 0,2285 | 0,5266 | 0,9834 | 1,1 | 0,30 | 0,6913 | 1,2911 |
| 22 | 0,4 | 0,0808 | 0,2252 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2787 | - |
| 23 | 1,1 | 0,2278 | 0,5250 | 0,9296 | 1,1 | 0,30 | 0,6913 | 1,2241 |
| 24 | 0,3 | 0,0790 | 0,2290 | - | 0,3 | 0,10 | 0,2900 | - |
| FO | 32,6228 | | | | 42,0075 | | | |

Os traços presentes nas colunas referentes a $t_{100\%}$ indicam que não foi possível dar sensibilidade ao relé primário para faltas no final da linha protegida. Nesses casos, o tempo de operação dos relés para essas faltas não é incluído na FO, uma vez que esses relés não serão sensibilizados.

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 é possível notar que o valor da FO (e, conseqüentemente, os tempos de operação dos relés) do problema linear é inferior ao do problema inteiro, resultado que já era esperado devido ao fato do primeiro ser a relaxação do segundo. Isso ocorre porque para todos os relés o valor do MT_{51} do problema inteiro é igual ou superior ao do problema linear, o que influi diretamente no tempo de operação do relé microprocessado.

Nota-se também, que as variáveis são contínuas para o problema de PL e os valores do MC_{51} e do MT_{51} não correspondem a valores ajustáveis nos relés. Uma possibilidade para contornar isso seria o arredondamento desses ajustes para os valores mais próximos disponíveis. Entretanto, adotando essa medida, as restrições do tempo de coordenação podem ser violadas, inviabilizando-a na prática (RAZAVI et al., 2008).

Nenhuma restrição incluída nos modelos foi violada, lembrando que aquelas restrições onde o relé de retaguarda não é sensibilizado não são incluídas nos modelos. O mesmo ocorrerá para todas as simulações que seguirem nesse trabalho.

Todos os tempos de operação dos relés para as faltas simuladas são superiores a 0,2 segundos (restrição do tempo mínimo de operação) e nenhum tempo ultrapassou 2 segundos.

A Tabela 5.4 mostra os valores do MT_{51F} e do MC_{51F} determinados para o modelo de PNL e para o modelo 2 de PIB. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação dos relés para faltas trifásicas no início e bifásicas no final da linha protegida.

Tabela 5.4 – Solução do modelo de PNL e do modelo 2 de PIB, de fase, para o caso 1

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 3,5000 | 0,0766 | 0,3714 | 0,9206 | 3,4 | 0,10 | 0,4753 | 1,1446 |
| 2 | 0,3000 | 0,1958 | 0,5072 | 0,7108 | 0,3 | 0,30 | 0,7771 | 1,0890 |
| 3 | 2,0000 | 0,0862 | 0,4648 | 0,9028 | 1,4 | 0,15 | 0,6302 | 1,0180 |
| 4 | 1,8000 | 0,1039 | 0,5507 | 1,0368 | 1,2 | 0,20 | 0,8054 | 1,2565 |
| 5 | 0,8000 | 0,1077 | 0,4299 | 0,7101 | 0,8 | 0,15 | 0,5986 | 0,9888 |
| 6 | 3,2000 | 0,0874 | 0,4418 | 1,0417 | 2,6 | 0,15 | 0,6568 | 1,3160 |
| 7 | 3,2000 | 0,0779 | 0,3938 | 0,9285 | 2,1 | 0,15 | 0,5770 | 1,0341 |
| 8 | 0,8000 | 0,1163 | 0,4639 | 0,7663 | 0,8 | 0,20 | 0,7981 | 1,3183 |
| 9 | 1,8000 | 0,0880 | 0,4667 | 0,8786 | 1,3 | 0,15 | 0,6343 | 1,0170 |
| 10 | 2,0000 | 0,0907 | 0,4889 | 0,9497 | 1,8 | 0,15 | 0,7462 | 1,3539 |
| 11 | 0,3000 | 0,1827 | 0,4734 | 0,6634 | 0,3 | 0,25 | 0,6476 | 0,9075 |

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 12 | 3,2294 | 0,0868 | 0,3981 | 0,9153 | 2,6 | 0,15 | 0,6001 | 1,1880 |
| 13 | 0,8000 | 0,1485 | 0,3812 | 0,6317 | 0,8 | 0,20 | 0,5133 | 0,8506 |
| 14 | 0,8000 | 0,1688 | 0,4097 | 0,6554 | 0,8 | 0,25 | 0,6066 | 0,9704 |
| 15 | 1,4000 | 0,1154 | 0,3518 | 0,6584 | 1,4 | 0,15 | 0,4573 | 0,8559 |
| 16 | 0,8000 | 0,1651 | 0,4237 | 0,7021 | 0,8 | 0,25 | 0,6417 | 1,0632 |
| 17 | 2,6000 | 0,1225 | 0,3214 | 0,7659 | 3,0 | 0,15 | 0,4170 | 1,0782 |
| 18 | 0,6000 | 0,0840 | 0,2242 | - | 0,6 | 0,10 | 0,2669 | - |
| 19 | 2,6000 | 0,1134 | 0,2974 | 0,7500 | 2,6 | 0,15 | 0,3935 | 0,9924 |
| 20 | 0,7000 | 0,0844 | 0,2223 | - | 0,7 | 0,10 | 0,2633 | - |
| 21 | 2,6000 | 0,1144 | 0,3000 | 0,7148 | 2,6 | 0,15 | 0,3935 | 0,9376 |
| 22 | 0,6000 | 0,0840 | 0,2242 | - | 0,6 | 0,10 | 0,2669 | - |
| 23 | 2,9312 | 0,1153 | 0,3175 | 0,7437 | 3,1 | 0,15 | 0,4228 | 1,0212 |
| 24 | 0,4000 | 0,0857 | 0,2265 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2643 | - |
| FO | 25,1972 | | | | 34,2552 | | | |

A Tabela 5.5 mostra os valores do MT_{51N} e do MC_{51N} determinados para o modelo de PNL e para o modelo 2 de PIB. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação dos relés para faltas monofásicas no início e no final da linha protegida.

Tabela 5.5 – Solução do modelo de PNL e do modelo 2 de PIB, de neutro, para o caso 1

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-----------------|
| | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 2,2098 | 0,0760 | 0,3825 | 0,7866 | 2,3 | 0,10 | 0,5186 | 1,1011 |
| 2 | 0,2000 | 0,1863 | 0,5032 | 0,6626 | 0,2 | 0,30 | 0,8104 | 1,0672 |
| 3 | 1,4000 | 0,0830 | 0,5095 | 0,8833 | 1,1 | 0,15 | 0,7563 | 1,1627 |
| 4 | 1,2000 | 0,0929 | 0,5365 | 0,8788 | 1,1 | 0,15 | 0,8067 | 1,2672 |
| 5 | 0,2000 | 0,1898 | 0,4980 | 0,6290 | 0,2 | 0,30 | 0,7870 | 0,9939 |
| 6 | 2,0818 | 0,0773 | 0,4157 | 0,8310 | 2,2 | 0,10 | 0,5622 | 1,1758 |
| 7 | 1,8576 | 0,0804 | 0,3966 | 0,7339 | 2,1 | 0,10 | 0,5414 | 1,0896 |
| 8 | 0,2000 | 0,2044 | 0,5361 | 0,6771 | 0,2 | 0,30 | 0,7870 | 0,9939 |
| 9 | 1,2000 | 0,0808 | 0,4665 | 0,7642 | 1,0 | 0,15 | 0,7503 | 1,1345 |
| 10 | 1,4000 | 0,0875 | 0,5366 | 0,9303 | 1,1 | 0,15 | 0,7563 | 1,1627 |
| 11 | 0,2000 | 0,1840 | 0,4971 | 0,6546 | 0,2 | 0,30 | 0,8104 | 1,0672 |
| 12 | 2,2097 | 0,0788 | 0,3966 | 0,8157 | 2,3 | 0,10 | 0,5186 | 1,1011 |
| 13 | 0,5000 | 0,1596 | 0,4161 | 0,6372 | 0,5 | 0,25 | 0,6519 | 0,9984 |
| 14 | 0,5000 | 0,1680 | 0,4137 | 0,6156 | 0,5 | 0,25 | 0,6158 | 0,9163 |
| 15 | 0,5000 | 0,1633 | 0,4023 | 0,5986 | 0,5 | 0,25 | 0,6158 | 0,9163 |
| 16 | 0,5000 | 0,1625 | 0,4238 | 0,6490 | 0,5 | 0,25 | 0,6519 | 0,9984 |
| 17 | 2,1000 | 0,0965 | 0,2867 | 0,7012 | 1,8 | 0,15 | 0,4170 | 0,9370 |
| 18 | 0,4000 | 0,0808 | 0,2252 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2787 | - |
| 19 | 1,9000 | 0,0969 | 0,2757 | 0,6762 | 1,6 | 0,15 | 0,3975 | 0,8904 |

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-----------------|
| | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 20 | 0,4000 | 0,0859 | 0,2219 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2583 | - |
| 21 | 2,1000 | 0,0953 | 0,2832 | 0,6927 | 1,8 | 0,15 | 0,4170 | 0,9370 |
| 22 | 0,4000 | 0,0808 | 0,2252 | - | 0,4 | 0,10 | 0,2787 | - |
| 23 | 2,8000 | 0,0704 | 0,2397 | 0,6499 | 2,5 | 0,10 | 0,3220 | 0,8016 |
| 24 | 0,3000 | 0,0790 | 0,2290 | - | 0,3 | 0,10 | 0,2900 | - |
| FO | 23,7849 | | | | 34,3124 | | | |

O resolvidor de PNL do MATLAB exige que o usuário informe uma solução inicial para o problema. Dessa forma, a solução obtida pela aplicação do resolvidor de PL para cada modelo (de fase e de neutro) é informada como sendo a solução inicial. Testou-se, também, como soluções iniciais todas as variáveis no seu limite inferior e todas as variáveis no seu limite superior, soluções essas que são ineficazes. Em ambas as situações a solução convergiu para o mesmo ponto. Desse modo, em todas as simulações feitas para os problemas de PNL a solução inicial será a solução do problema de PL.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 é possível notar que o valor da FO de ambos os modelos é inferior ao dos modelos das Tabelas 5.2 e 5.3, evidenciando que quando o MC_{51} é uma das variáveis do problema é possível reduzir os tempos de operação dos relés e, ainda assim, coordená-los. O que ocorre é uma aproximação do MC_{51} de cada relé do seu limite superior, dessensibilizando-o e possibilitando a escolha de um MT_{51} inferior em relação àquele do modelo de PL e do modelo 1 de PIB, tanto para a proteção de fase quanto para a de neutro.

O resolvidor do CPLEX possui uma etapa de pré-resolução do problema que é capaz de reduzir as suas dimensões, eliminando, por exemplo, restrições redundantes. Após essa etapa, o modelo 2 para a proteção de fase ficou com 144 restrições e 10796 variáveis, enquanto o modelo 2 para a proteção de neutro ficou com 144 restrições e 10223 variáveis. Embora o número de restrições e variáveis de ambos os modelos seja grande, o tempo computacional para a construção e a resolução desses foi de 3,71 segundos para a proteção de fase e 3,34 segundos para a proteção de neutro.

5.5.2 Caso 2: Proteção de fase e de neutro com unidades instantâneas

Todos os resultados das simulações realizadas para o caso 2 são apresentados no Apêndice A. Os valores mínimo e máximo do MC_{51F} e do MC_{51N} são os mesmos do caso 1,

pois as unidades temporizadas dos relés devem ter o mesmo alcance independentemente da presença, ou não, da unidade instantânea.

Os valores do MC_{50F} e do MC_{50N} são mostrados na Tabela A.1.

A Tabela A.2 mostra os valores do MT_{51F} e do MC_{51F} determinados para o modelo de PL e para o modelo 1 de PIB. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação dos relés para faltas trifásicas a 85% ($t_{85\%}$) e bifásicas a 100% da linha protegida. Não é necessária a apresentação dos tempos de operação dos relés no início da linha protegida, uma vez que a unidade instantânea opera em um tempo muito reduzido.

A Tabela A.3 mostra os valores do MT_{51N} e do MC_{51N} determinados para o modelo de PL e para o modelo 1 de PIB. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação dos relés para faltas monofásicas no início e no final da linha protegida.

Os traços presentes nas colunas referentes a $t_{100\%}$ se devem pelo mesmo motivo dos resultados para o caso 1, onde os relés não são sensibilizados.

A Tabela A.4 mostra os valores do MT_{51F} e do MC_{51F} determinados para o modelo de PNL e para o modelo 2 de PIB. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação dos relés para faltas trifásicas a 85% e bifásicas a 100% da linha protegida.

A Tabela A.5 mostra os valores do MT_{51N} e do MC_{51N} determinados para o modelo de PNL e para o modelo 2 de PIB. Também, são mostrados os valores da FO e os tempos de operação dos relés para faltas monofásicas a 85% e a 100% da linha protegida.

De maneira geral, as mesmas observações feitas para o caso 1 são válidas para o caso 2. A principal diferença se dá no menor valor da FO do caso 2 (e, conseqüentemente, dos tempos de operação das unidades temporizadas dos relés) para os modelos de fase e de neutro, efeito causado pela presença da unidade instantânea. Em outras palavras, as unidades instantâneas proporcionam um aumento na velocidade do sistema de proteção para faltas acima de 85% da linha protegida, onde o relé passa a atuar temporizadamente.

Também, nas Tabelas A.4 e A.5 pode-se observar que os problemas inteiros possuem soluções com FO mais próximas do problema não linear associado do que comparados ao caso 1. Isso se deve, novamente, pela presença das unidades instantâneas. Como nos problemas não lineares muitos dos valores do MT_{51} já são iguais ou próximos ao limite inferior do ajuste proporcionado pelo relé, esses valores sofrem pequenas alterações nos problemas inteiros, fazendo com que a FO não se altere em grande escala.

A solução do modelo 2 de PIB é a ótima para o problema inteiro. Após a etapa de pré-resolução do CPLEX, o modelo 2 para a proteção de fase ficou com 84 restrições e 10945 variáveis, enquanto o modelo 2 para a proteção de neutro ficou com 76 restrições e 10531

variáveis. Embora o número de restrições e variáveis de ambos os modelos seja grande, o tempo computacional para a construção e a resolução desses modelos foi de 1,16 segundos para a proteção de fase e 0,80 segundos para a proteção de neutro.

5.6 Sistema Teste 2

O diagrama unifilar do Sistema Teste 2 (ST2) é ilustrado na Figura 5.4. Este sistema é o IEEE de 30 barras, que possui 78 relés de sobrecorrente instalados nas extremidades de cada linha, indicados pelos números na mesma figura. Os dados desse sistema são apresentados no Anexo 2.

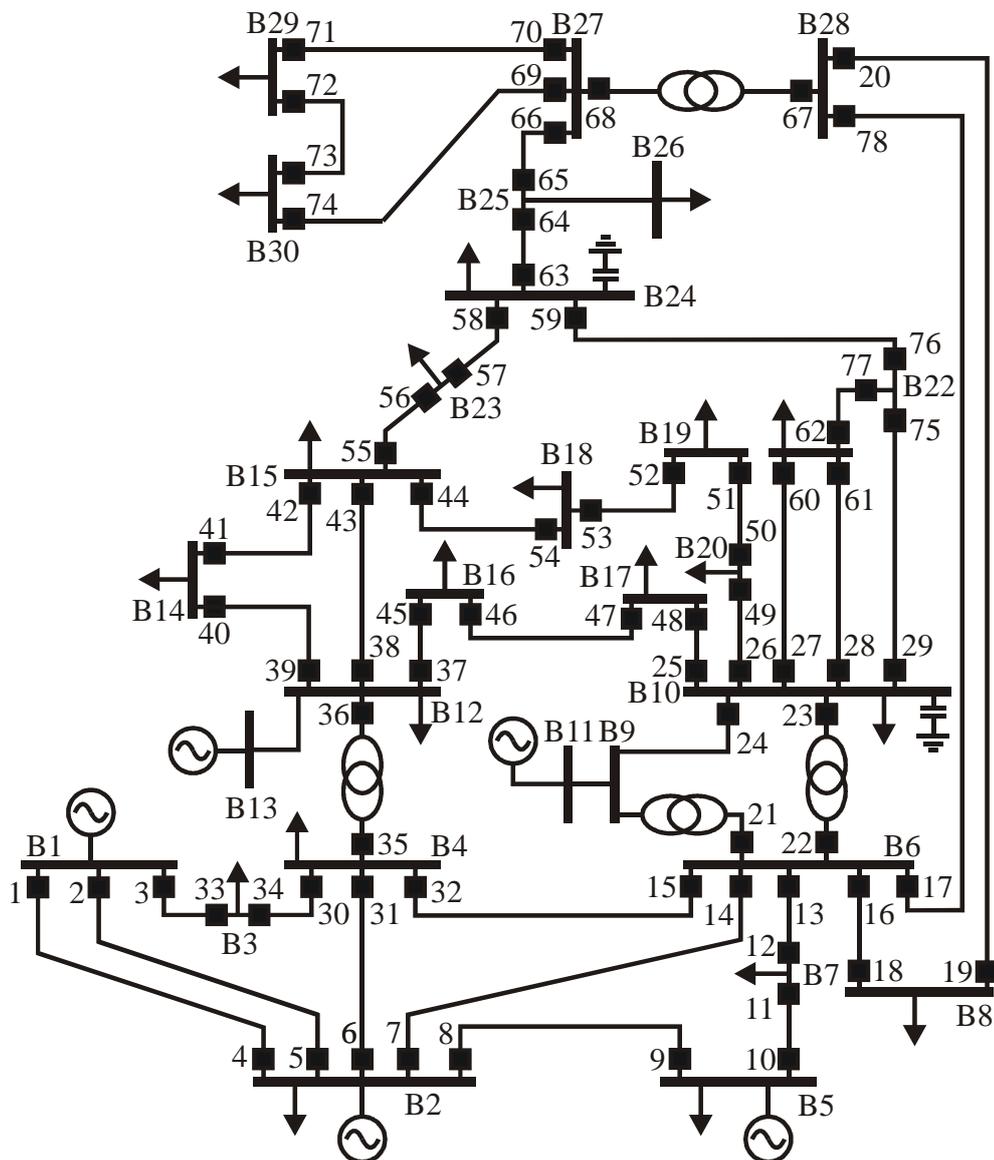


Figura 5.4 – Diagrama unifilar do sistema teste 2

A Tabela 5.6 mostra a *RTC* dos TCs calculadas na etapa de pré-processamento.

Tabela 5.6 – *RTC* dos TCs do sistema teste 2

| <i>RTC</i> (A) | Relés |
|----------------|---|
| 75 – 1 | 18, 71 |
| 100 – 1 | 74, 78 |
| 150 – 1 | 65, 73 |
| 200 – 1 | 20, 53, 67, 68, 72 |
| 300 – 1 | 10, 11, 12, 13, 21, 22, 34, 35, 40, 41, 46, 48, 49, 50, 51, 54, 56, 57, 63, 64, 69, 70 |
| 400 – 1 | 1, 2, 3, 15, 16, 17, 19, 32, 33, 45, 52, 59, 66, 77 |
| 600 – 1 | 6, 7, 8, 9, 14, 25, 26, 30, 31, 43, 44, 55, 58, 62, 76 |
| 800 – 1 | 4, 5, 24, 27, 28, 29, 37, 39, 47, 60, 61, 75 |
| 1200 – 1 | 23, 36, 38, 42 |

5.6.1 Caso 3: Proteção de Fase e de Neutro sem Unidades Instantâneas

Todos os resultados das simulações realizadas para o caso 3 são apresentados no Apêndice B. Após a etapa do pré-processamento dos dados, obteve-se os valores mínimo e máximo do MC_{51F} e do MC_{51N} mostrados, respectivamente, nas Tabelas B.1 e B.2.

Nas Tabelas B.1 e B.2 é possível notar que para alguns os relés o limite inferior é igual ao limite superior pelo mesmo motivo apresentado no caso 1 do ST1.

Nas Tabelas B.3, B.4, B.5 e B.6 é possível notar que os valores da FO e, conseqüentemente, os tempos de operação dos relés, dos problemas com variáveis contínuas são inferiores aos dos problemas inteiros associados, pelo mesmo motivo apresentado no ST1.

Nota-se, ainda, que os ajustes do MC_{51} e do MT_{51} são contínuos para os problemas de PL e de PNL, com valores que não estão disponíveis nos relés, inviabilizando essas soluções.

Nas Tabelas B.4 e B.6 é possível notar que o valor da FO da última é inferior à da primeira, evidenciando que quando o MC_{51} é uma das variáveis do problema é possível reduzir os tempos de operação dos relés e, ainda assim, coordená-los.

Todos os tempos de operação dos relés para as faltas simuladas são superiores a 0,2 segundos e inferiores a 2 segundos, o que mostra que o sistema de proteção está coordenado e possui velocidade, à exceção de $t_{100\%}$ do relé 40. Esse tempo é elevado devido à característica inversa da curva de atuação do relé, uma vez que a corrente de falta tem valor próximo ao da corrente de disparo desse dispositivo.

Após a etapa de pré-resolução do CPLEX, o modelo 2 para a proteção de fase ficou com 618 restrições e 36629 variáveis. O tempo computacional para a construção e a resolução

desse foi de 18,22 segundos. Esse tempo é bastante satisfatório, dado o médio porte do sistema.

A mesma análise dos resultados feita para a proteção de fase pode ser estendida para a proteção de neutro do ST2, com a diferença de que agora não há tempos da ordem de 10 segundos, ou mais. Entretanto, nota-se um aumento do tempo de operação das proteções de neutro se comparadas às de fase, o que fica evidenciado pelos maiores valores da FO.

Após a etapa de pré-resolução do CPLEX, o modelo 2 de PIB para a proteção de neutro ficou com 689 restrições e 31491 variáveis. O tempo computacional para a construção e a resolução desse foi de 18,99 segundos.

5.6.2 Caso 4: Proteção de Fase e de Neutro com Unidades Instantâneas

Todos os resultados das simulações realizadas para o caso 4 são apresentados no Apêndice C.

O limite mínimo e máximo do MC_{51F} e do MC_{51N} dos relés são os mesmos do caso 3.

Nesse caso, as restrições do tempo mínimo de operação dos relés foram desconsideradas, assim como as referentes à mínima corrente de curto-circuito com o disjuntor do final da linha ou transformador aberto. Do contrário, os modelos são infactíveis.

Também, para evitar a infactibilidade, as unidades instantâneas de fase e de neutro do relé 24 foram ajustadas para não atuarem até a barra B11 (curto-circuito trifásico na proteção de fase e curto-circuito monofásico na proteção de neutro). Assim, os valores do MC_{50F} e do MC_{50N} são mostrados na Tabela C.1.

Nas Tabelas C.2, C.3, C.4, C.5, C.6, C.7 e C.8 os valores nulos (zeros) na coluna referente a $t_{85\%}$ indicam que os relés que protegem os transformadores operam instantaneamente, pois a unidade instantânea desses cobre até a barra adjacente.

A solução do problema de PNL da proteção de fase não convergiu após a execução do resolvidor pelo tempo de 1000 segundos, portanto os resultados dessa simulação não foram reportados.

De maneira geral, as mesmas observações feitas para o caso 2 do ST1 são válidas para o caso 4 do ST2, tanto para a proteção de fase quanto para a de neutro, à exceção dos menores tempos obtidos nesse último caso devido à ausência da restrição do tempo mínimo de operação dos relés, permitindo que o relé opere em um tempo inferior a 0,2 segundos para faltas a 85% do trecho protegido.

Com a presença da unidade instantânea, a FO dos modelos de fase e de neutro é reduzida se comparada àquela com o uso apenas da unidade temporizada. Isso evidencia um aumento na velocidade do sistema de proteção como um todo, tanto para linhas quanto para transformadores.

Após a etapa de pré-resolução do CPLEX, o modelo 2 de PIB para a proteção de fase ficou com 265 restrições e 36594 variáveis, enquanto o modelo 2 de PIB para a proteção de neutro ficou com 277 restrições e 31526 variáveis. Embora o número de restrições e variáveis de ambos os modelos seja grande, o tempo computacional para a construção e a resolução desses modelos foi de 4,31 segundos para a proteção de fase e 4,43 segundos para a proteção de neutro.

5.7 Considerações Finais

Embora os tempos computacionais para a construção e resolução dos modelos 1 de PIB não tenham sido citados ao longo desse capítulo, todos foram inferiores a 3 segundos, tanto para o ST1 quanto para o ST2.

Os ajustes dos relés apresentados nas simulações evidenciam que os modelos de PIB propostos são aplicáveis quando se deseja determinar valores discretos e ajustáveis nos relés. O uso de técnicas mais simples para a resolução desses problemas, como as de PL, retornam ajustes contínuos que precisam ser arredondados para os disponíveis nos relés, o que pode causar violações em algumas restrições do tempo de coordenação.

Os baixos tempos de processamento dos modelos de PIB quando se utiliza a unidade instantânea dos relés mostram que esses são mais simples de serem resolvidos, requerendo um menor número de iterações do resolvedor.

Como na prática as unidades instantâneas são largamente utilizadas e dados os tempos reduzidos de processamento dos modelos considerando o ST2, que possui um grande número de relés, visualiza-se a aplicação do modelo 2 de PIB em sistemas de maior porte (com um maior número de relés e, conseqüentemente, de variáveis) e fortemente malhados (com um maior número de restrições).

Ressalta-se que, embora as simulações realizadas considerem somente a curva A da norma IEC 60255-3, outras características tempo-corrente podem ser utilizadas para as curvas inversas dos relés, incluindo a de tempo definido. Assim, relés com diferentes características podem ser utilizadas em um mesmo sistema, sendo necessária a alteração dos coeficientes que as definem no modelo matemático.

Também, alguns relés podem ter seus ajustes fixados, o que pode ocorrer nas proteções mais próximas às unidades geradoras, por exemplo, estabelecendo um limite de tempo máximo de operação para esses dispositivos. Nesse caso, reduz-se as variáveis e altera-se as restrições do problema, uma vez que o tempo de operação desses relés será função somente da corrente de entrada e não mais dos seus ajustes.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 Conclusões

Este trabalho abordou a coordenação de relés direcionais de sobrecorrente de fase e de neutro microprocessados em sistemas elétricos de potência, com ou sem o uso das unidades instantâneas, problema este que foi resolvido utilizando-se técnicas de otimização fundamentadas na programação matemática. O objetivo principal é determinar os ajustes dos relés que permitam a coordenação destes e, ainda, ofereçam segurança, velocidade e confiabilidade ao sistema de proteção.

Apresentou-se uma metodologia para a construção dos modelos matemáticos de PL e de PNL, onde os ajustes são determinados na forma contínua e, muitas vezes, não estão disponíveis nos relés. O arredondamento desses ajustes para os valores mais próximos disponíveis pode produzir falhas na coordenação, inviabilizando essa medida.

Apresentou-se, também, as modelagens matemáticas na forma de problemas de PIB, onde dois modelos novos foram introduzidos. Esses levam vantagem sobre os de PL e de PNL no que diz respeito à determinação direta dos ajustes dentro daqueles disponibilizados pelos relés. O modelo 1 de PIB é capaz de determinar somente o ajuste do MT_{51} de cada relé, enquanto o modelo 2 de PIB é capaz de determinar tanto o MT_{51} , quanto o MC_{51} de cada relé, o que aumenta a velocidade do sistema de proteção como um todo.

Com o resolvidor do CPLEX utilizado, obteve-se tempos de resolução de até 19,4 segundos utilizando o modelo 2 de PIB na coordenação dos relés do sistema IEEE de 30 barras, que é um sistema de médio porte e que possui um grande número de dispositivos de proteção. Esse tempo foi considerado bastante satisfatório para a aplicação, uma vez que a coordenação se dá em nível de planejamento do sistema elétrico, onde semanas ou até mesmo meses são levados em consideração.

Dessa forma, a metodologia proposta nesse trabalho pode auxiliar o projetista na tomada de decisões a partir de informações e cálculos básicos do sistema elétrico, como as correntes de curto-circuito e o fluxo de carga. Essa metodologia permite, ainda, que o projetista interaja na construção do modelo matemático, dando à solução um caráter mais personalizado e alinhado com seu desejo.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

- Desenvolver novos modelos matemáticos ou heurísticas que reduzam o tempo de processamento;
- Implementar novas restrições para contemplar o uso de diferentes dispositivos de proteção, como os relés diferenciais, de distância, religadores e elos fusíveis;
- Integrar nos modelos matemáticos a determinação da característica tempo-corrente ótima para cada relé do sistema elétrico;
- Transformar a metodologia apresentada nesse trabalho em um software comercial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAZIZ, A. Y.; TALAAT, H. E. A.; NOSSEIR, A. I.; HAJJAR, A. A. **An Adaptive Protection Scheme for Optimal Coordination of Overcurrent Relays.** Electric Power Systems Research, vol. 61, pp. 1-9, 2002.

ALSTOM GRID. **Network Protection & Automation Guide.** Edição de Maio, 2011.

BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R. **Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA-NLP approach.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 1, pp. 109-119, 2011.

BIRLA, D.; MAHESHWARI, R. P.; GUPTA, H. O. **An Approach to Tackle the Threat of Sympathy Trips in Directional Overcurrent Relay Coordination.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 2, pp. 851-858, 2007.

BIRLA, D.; MAHESHWARI, R. P.; GUPTA, H. O. **A New Nonlinear Directional Overcurrent Relay Coordination Technique, and Banes and Boons of Near-End Faults Based Approach.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1176-1182, 2006.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying – Principles and Applications.** 3a edição, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2006.

CHABANLOO, R. M.; ABYANEH, H. A.; KAMANGAR, S. S. H.; RAZAVI, F. **Optimal Combined Overcurrent and Distance Relays Coordination Incorporating Intelligent Overcurrent Relays Characteristics Selection.** IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 26, no. 3, pp. 1381-1391, 2011.

CHATTOPADHYAY, B.; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S. **An On-Line Relay Coordination Algorithm for Adaptive Protection Using Linear Programming Technique.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 165-171, 1996.

DAMBORG, M. J.; RAMASWAMI, R.; VENKATA, S. S.; POSTFOROOSH, J. M. **Computer Aided Transmission Protection System Design, Part-I – Algorithms.** IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 1, pp. 51-59, 1984.

ELMORE, W. A. **Protective Relaying – Theory and Applications.** 2a edição, CRC Press, 2003.

EZZEDINE, M.; KACZMAREK, R. **A novel method for optimal coordination of directional overcurrent relays considering their available discrete settings and several operation characteristics.** Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 1475-1481, 2011.

EZZEDINE, M.; KACZMAREK, R.; IFTIKHAR, M. U. **Coordination of directional overcurrent relays using a novel method to select their settings.** IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 5, no. 7, pp. 743-750, 2011.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional.** Ed. Campus Ltda. e Ed. da Universidade de São Paulo, Brasil, 1988.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power System Relaying.** 3a edição, Research Studies Press Limited e John Wiley & Sons Ltd., Inglaterra, 2008.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Vol 1, 2a edição, UFSC, Santa Catarina, 2005.

MANSOUR, M. M.; MEKHAMER, S. F.; EL-KHARBAWE, N. E. **A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays.** IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 22, no. 3, pp. 1400-1410, 2007.

MOHAMMADI, R.; ABYANEH, H. A.; RUDSARI, H. M.; FATHI, S. H.; RASTEGAR, H. **Overcurrent Relays Coordination Considering the Priority of Constraints.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 3, pp. 1927-1938, 2011.

NOGHABI, A. S.; SADEH, J.; MASHHADI, H. R. **Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA.** IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 24, no. 4, pp. 1857-1863, 2009.

NOGHABI, A. S.; MASHHADI, H. R.; SADEH, J. **Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Different Network Topologies Using Interval Linear Programming.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1348-1354, 2010.

RAMASWAMI, R.; VENKATA, S. S.; DAMBORG, M. J.; POSTFOROOSH, J. M. **Computer Aided Transmission Protection System Design, Part-II – Implementation and Results.** IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-103, no. 1, pp. 60-65, 1984.

RAZAVI, F.; ABYANEH, H. A.; AL-DABBAGH, M.; MOHAMMADI, R.; TORKAMAN, H. **A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination.** Electric Power Systems Research. vol. 78, pp. 713-720, 2008.

SACHDEV, M. S. et al. **Mathematical Models Representing Time-Current Characteristics of Overcurrent Relays for Computer Applications.** Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 1-8, 1978.

SANTOS, E. M. **Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

SMITH, J. C.; TAŞKIN, Z. C. A Tutorial Guide to Mixed-Integer Programming Models and Solution Techniques. In: G. J. Lim and E. K. Lee (Org.), **Optimization in Medicine and Biology.** Janeiro, 2008. Taylor and Francis, Auerbach Publications, 2008.

SO, C. W.; LI, K. K.; LAI, K. T.; FUNG, K. Y. **Application of Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination.** International Conference of Developments in Power Systems Protection. pp. 66-69, 1997.

THANGARAJ, R.; PANT, M.; DEEP, K. **Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 23, no. 5, pp. 820-829, 2010.

URDANETA, A. J.; NADIRA R.; JIMÉNEZ, L. G. P. **Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems.** IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 3, no. 3, pp. 903-910, 1988.

URDANETA, A. J.; PÉREZ, L. G.; RESTREPO, H. **Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Dinamic Changes in the Network Topology.** IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 12, no. 4, pp. 1458-1464, 1997.

URDANETA, A. J.; RESTREPO, H.; MÁRQUEZ, S.; SÁNCHEZ, J. **Coordination of Directional Overcurrent Relay Timing Using Linear Programming.** IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 11, no. 1, pp 122-129, 1996.

ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. **A Novel Problem Formulation for Directional Overcurrent Relay Coordination.** 2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. pp. 48-52, 2004.

ZEINELDIN, H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. **Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relay Coordination**. 2005 Power Engineering Society General Meeting. vol. 2, pp. 1101-1106, 2005.

ZEINELDIN, H. H.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. **Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization**. Electric Power Systems Research. vol. 76, pp. 988-995, 2006.

APÊNDICES

Apêndice A. Resultados das Simulações do Caso 2

Tabela A.1 – Valores do MC_{50F} e do MC_{50N} para o caso 2

| Relé | MC_{50F} | MC_{50N} | Relé | MC_{50F} | MC_{50N} |
|------|------------|------------|------|------------|------------|
| 1 | 7,9 | 4,7 | 13 | 5,5 | 3,3 |
| 2 | 2,7 | 1,6 | 14 | 6,3 | 3,8 |
| 3 | 4,8 | 2,9 | 15 | 6,3 | 3,8 |
| 4 | 4,5 | 2,7 | 16 | 5,5 | 3,3 |
| 5 | 3,0 | 1,8 | 17 | 10,5 | 6,3 |
| 6 | 7,2 | 4,3 | 18 | 1,9 | 1,2 |
| 7 | 7,2 | 4,3 | 19 | 10,1 | 6,1 |
| 8 | 3,0 | 1,8 | 20 | 2,2 | 1,3 |
| 9 | 4,5 | 2,7 | 21 | 10,5 | 6,3 |
| 10 | 4,8 | 2,9 | 22 | 1,9 | 1,2 |
| 11 | 2,7 | 1,6 | 23 | 11,3 | 6,8 |
| 12 | 7,9 | 4,7 | 24 | 1,5 | 0,9 |

Tabela A.2 – Solução do modelo de PL e do modelo 1 de PIB, de fase, para o caso 2

| Relé | Modelo de PL | | | | Modelo 1 de PIB | | | |
|------|--------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 1,6 | 0,0809 | 0,3509 | 0,4103 | 1,6 | 0,15 | 0,6506 | 0,7607 |
| 2 | 0,3 | 0,0788 | 0,2491 | 0,2859 | 0,3 | 0,15 | 0,4744 | 0,5445 |
| 3 | 1,2 | 0,0623 | 0,3102 | 0,3666 | 1,2 | 0,10 | 0,4983 | 0,5887 |
| 4 | 0,5 | 0,1079 | 0,3377 | 0,3746 | 0,5 | 0,20 | 0,6257 | 0,6941 |
| 5 | 0,8 | 0,0534 | 0,2843 | 0,3518 | 0,8 | 0,10 | 0,5325 | 0,6592 |
| 6 | 0,9 | 0,1250 | 0,4130 | 0,4635 | 0,9 | 0,20 | 0,6610 | 0,7418 |
| 7 | 0,7 | 0,1434 | 0,4217 | 0,4673 | 0,7 | 0,20 | 0,5881 | 0,6516 |
| 8 | 0,8 | 0,0528 | 0,2810 | 0,3478 | 0,8 | 0,10 | 0,5325 | 0,6592 |
| 9 | 0,4 | 0,1172 | 0,3321 | 0,3647 | 0,4 | 0,15 | 0,4249 | 0,4667 |
| 10 | 1,2 | 0,0618 | 0,3082 | 0,3641 | 1,2 | 0,10 | 0,4983 | 0,5887 |
| 11 | 0,3 | 0,0723 | 0,2288 | 0,2626 | 0,3 | 0,10 | 0,3163 | 0,3630 |
| 12 | 1,6 | 0,0806 | 0,3495 | 0,4086 | 1,6 | 0,15 | 0,6506 | 0,7607 |
| 13 | 0,8 | 0,0636 | 0,2280 | 0,2705 | 0,8 | 0,10 | 0,3584 | 0,4253 |
| 14 | 0,8 | 0,1012 | 0,3385 | 0,3929 | 0,8 | 0,20 | 0,6687 | 0,7763 |
| 15 | 1,4 | 0,0566 | 0,2616 | 0,3228 | 1,4 | 0,10 | 0,4624 | 0,5706 |
| 16 | 0,8 | 0,0742 | 0,2659 | 0,3156 | 0,8 | 0,15 | 0,5375 | 0,6379 |
| 17 | 2,6 | 0,0514 | 0,2546 | 0,3212 | 2,6 | 0,10 | 0,4955 | 0,6251 |
| 18 | 0,6 | 0,0500 | 0,3021 | - | 0,6 | 0,05 | 0,3021 | - |
| 19 | 2,6 | 0,0500 | 0,2562 | 0,3308 | 2,6 | 0,10 | 0,5124 | 0,6616 |
| 20 | 0,7 | 0,0500 | 0,3089 | - | 0,7 | 0,05 | 0,3089 | - |
| 21 | 2,6 | 0,0513 | 0,2539 | 0,3204 | 2,6 | 0,10 | 0,4955 | 0,6251 |
| 22 | 0,6 | 0,0500 | 0,3021 | - | 0,6 | 0,05 | 0,3021 | - |

| Relé | Modelo de PL | | | | Modelo 1 de PIB | | | |
|------|--------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 23 | 2,6 | 0,0707 | 0,3337 | 0,4097 | 2,6 | 0,10 | 0,4719 | 0,5794 |
| 24 | 0,4 | 0,0500 | 0,2725 | - | 0,4 | 0,05 | 0,2725 | - |
| FO | 14,3961 | | | | 24,0214 | | | |

Tabela A.3 – Solução do modelo de PL e do modelo 1 de PIB, de neutro, para o caso 2

| Relé | Modelo de PL | | | | Modelo 1 de PIB | | | |
|------|--------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|
| | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 0,5 | 0,1726 | 0,5272 | 0,5479 | 0,5 | 0,30 | 0,9164 | 0,9524 |
| 2 | 0,2 | 0,0769 | 0,2560 | 0,2737 | 0,2 | 0,15 | 0,4992 | 0,5336 |
| 3 | 0,3 | 0,1580 | 0,4782 | 0,4931 | 0,3 | 0,30 | 0,9079 | 0,9362 |
| 4 | 0,3 | 0,1096 | 0,3429 | 0,3542 | 0,3 | 0,20 | 0,6257 | 0,6461 |
| 5 | 0,2 | 0,1316 | 0,4150 | 0,4361 | 0,2 | 0,25 | 0,7882 | 0,8283 |
| 6 | 0,5 | 0,1324 | 0,4215 | 0,4377 | 0,5 | 0,25 | 0,7961 | 0,8266 |
| 7 | 0,5 | 0,1324 | 0,4215 | 0,4377 | 0,5 | 0,25 | 0,7961 | 0,8266 |
| 8 | 0,2 | 0,1316 | 0,4150 | 0,4361 | 0,2 | 0,25 | 0,7882 | 0,8283 |
| 9 | 0,3 | 0,1096 | 0,3429 | 0,3542 | 0,3 | 0,20 | 0,6257 | 0,6461 |
| 10 | 0,3 | 0,1580 | 0,4782 | 0,4931 | 0,3 | 0,30 | 0,9079 | 0,9362 |
| 11 | 0,2 | 0,0769 | 0,2560 | 0,2737 | 0,2 | 0,15 | 0,4992 | 0,5336 |
| 12 | 0,5 | 0,1726 | 0,5272 | 0,5479 | 0,5 | 0,30 | 0,9164 | 0,9524 |
| 13 | 0,5 | 0,0820 | 0,3005 | 0,3276 | 0,5 | 0,15 | 0,5494 | 0,5990 |
| 14 | 0,5 | 0,1237 | 0,4220 | 0,4532 | 0,5 | 0,20 | 0,6826 | 0,7330 |
| 15 | 0,5 | 0,1237 | 0,4220 | 0,4532 | 0,5 | 0,20 | 0,6826 | 0,7330 |
| 16 | 0,5 | 0,0820 | 0,3005 | 0,3276 | 0,5 | 0,15 | 0,5494 | 0,5990 |
| 17 | 1,1 | 0,0990 | 0,3909 | 0,4262 | 1,1 | 0,20 | 0,7894 | 0,8607 |
| 18 | 0,4 | 0,0500 | 0,3330 | - | 0,4 | 0,05 | 0,3330 | - |
| 19 | 1,1 | 0,0730 | 0,2959 | 0,3266 | 1,1 | 0,15 | 0,6083 | 0,6713 |
| 20 | 0,4 | 0,0500 | 0,2958 | - | 0,4 | 0,05 | 0,2958 | - |
| 21 | 1,1 | 0,0990 | 0,3909 | 0,4262 | 1,1 | 0,20 | 0,7894 | 0,8607 |
| 22 | 0,4 | 0,0500 | 0,3330 | - | 0,4 | 0,05 | 0,3330 | - |
| 23 | 1,1 | 0,1023 | 0,3882 | 0,4174 | 1,1 | 0,20 | 0,7590 | 0,8161 |
| 24 | 0,3 | 0,0500 | 0,3311 | - | 0,3 | 0,05 | 0,3311 | - |
| FO | 17,3287 | | | | 31,0890 | | | |

Tabela A.4 – Solução do modelo de PNL e do modelo 2 de PIB, de fase, para o caso 2

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 2,3223 | 0,0500 | 0,2844 | 0,3504 | 2,4 | 0,05 | 0,2924 | 0,3626 |
| 2 | 0,3000 | 0,0755 | 0,2387 | 0,2739 | 0,3 | 0,10 | 0,3163 | 0,3630 |
| 3 | 1,3899 | 0,0500 | 0,2791 | 0,3369 | 1,4 | 0,05 | 0,2808 | 0,3393 |
| 4 | 1,1854 | 0,0500 | 0,2606 | 0,3106 | 1,4 | 0,05 | 0,2985 | 0,3658 |

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|
| | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 5 | 0,8000 | 0,0500 | 0,2663 | 0,3296 | 0,8 | 0,05 | 0,2663 | 0,3296 |
| 6 | 2,0988 | 0,0500 | 0,2816 | 0,3445 | 2,3 | 0,05 | 0,3046 | 0,3794 |
| 7 | 2,0765 | 0,0500 | 0,2791 | 0,3409 | 2,3 | 0,05 | 0,3046 | 0,3794 |
| 8 | 0,8000 | 0,0500 | 0,2663 | 0,3296 | 0,8 | 0,05 | 0,2663 | 0,3296 |
| 9 | 1,1465 | 0,0500 | 0,2541 | 0,3015 | 1,4 | 0,05 | 0,2985 | 0,3658 |
| 10 | 1,3899 | 0,0500 | 0,2791 | 0,3369 | 1,4 | 0,05 | 0,2808 | 0,3393 |
| 11 | 0,3000 | 0,0698 | 0,2208 | 0,2534 | 0,3 | 0,10 | 0,3163 | 0,3630 |
| 12 | 2,3223 | 0,0500 | 0,2844 | 0,3504 | 2,4 | 0,05 | 0,2924 | 0,3626 |
| 13 | 0,8000 | 0,0594 | 0,2130 | 0,2527 | 0,8 | 0,10 | 0,3584 | 0,4253 |
| 14 | 0,8000 | 0,0894 | 0,2990 | 0,3471 | 0,8 | 0,10 | 0,3344 | 0,3882 |
| 15 | 1,4000 | 0,0500 | 0,2312 | 0,2853 | 1,4 | 0,10 | 0,4624 | 0,5706 |
| 16 | 0,8000 | 0,0688 | 0,2464 | 0,2925 | 0,8 | 0,10 | 0,3584 | 0,4253 |
| 17 | 2,6000 | 0,0500 | 0,2477 | 0,3125 | 2,6 | 0,05 | 0,2477 | 0,3125 |
| 18 | 0,6000 | 0,0500 | 0,3021 | - | 0,6 | 0,05 | 0,3021 | - |
| 19 | 2,6000 | 0,0500 | 0,2562 | 0,3308 | 2,6 | 0,05 | 0,2562 | 0,3308 |
| 20 | 0,7000 | 0,0500 | 0,3089 | - | 0,7 | 0,05 | 0,3089 | - |
| 21 | 2,6000 | 0,0500 | 0,2477 | 0,3125 | 2,6 | 0,05 | 0,2477 | 0,3125 |
| 22 | 0,6000 | 0,0500 | 0,3021 | - | 0,6 | 0,05 | 0,3021 | - |
| 23 | 2,7839 | 0,0500 | 0,2477 | 0,3075 | 2,9 | 0,05 | 0,2553 | 0,3192 |
| 24 | 0,4000 | 0,0500 | 0,2725 | - | 0,4 | 0,05 | 0,2725 | - |
| FO | 12,6685 | | | | 14,5873 | | | |

Tabela A.5 – Solução do modelo de PNL e do modelo 2 de PIB, de neutro, para o caso 2

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|
| | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 1 | 1,4314 | 0,0500 | 0,2909 | 0,3130 | 1,6 | 0,05 | 0,3213 | 0,3484 |
| 2 | 0,2000 | 0,0671 | 0,2233 | 0,2387 | 0,2 | 0,10 | 0,3328 | 0,3557 |
| 3 | 0,9001 | 0,0500 | 0,2976 | 0,3160 | 1,1 | 0,05 | 0,3604 | 0,3876 |
| 4 | 0,6914 | 0,0500 | 0,2550 | 0,2686 | 0,9 | 0,05 | 0,3175 | 0,3388 |
| 5 | 0,2000 | 0,1016 | 0,3202 | 0,3365 | 0,2 | 0,15 | 0,4729 | 0,4970 |
| 6 | 1,2482 | 0,0500 | 0,2796 | 0,2986 | 1,4 | 0,05 | 0,3085 | 0,3318 |
| 7 | 1,2482 | 0,0500 | 0,2796 | 0,2986 | 1,4 | 0,05 | 0,3085 | 0,3318 |
| 8 | 0,2000 | 0,1016 | 0,3202 | 0,3365 | 0,2 | 0,15 | 0,4729 | 0,4970 |
| 9 | 0,6914 | 0,0500 | 0,2550 | 0,2686 | 0,9 | 0,05 | 0,3175 | 0,3388 |
| 10 | 0,9001 | 0,0500 | 0,2976 | 0,3160 | 1,1 | 0,05 | 0,3604 | 0,3876 |
| 11 | 0,2000 | 0,0671 | 0,2233 | 0,2387 | 0,2 | 0,10 | 0,3328 | 0,3557 |
| 12 | 1,4314 | 0,0500 | 0,2909 | 0,3130 | 1,6 | 0,05 | 0,3213 | 0,3484 |
| 13 | 0,5000 | 0,0645 | 0,2364 | 0,2578 | 0,5 | 0,10 | 0,3663 | 0,3994 |
| 14 | 0,5000 | 0,0848 | 0,2895 | 0,3109 | 0,5 | 0,10 | 0,3413 | 0,3665 |
| 15 | 0,5000 | 0,0848 | 0,2895 | 0,3109 | 0,5 | 0,10 | 0,3413 | 0,3665 |
| 16 | 0,5000 | 0,0645 | 0,2364 | 0,2578 | 0,5 | 0,10 | 0,3663 | 0,3994 |
| 17 | 1,3995 | 0,0500 | 0,2296 | 0,2539 | 1,5 | 0,05 | 0,2408 | 0,2677 |
| 18 | 0,4000 | 0,0500 | 0,3330 | - | 0,4 | 0,05 | 0,3330 | - |

| Relé | Modelo de PNL | | | | Modelo 2 de PIB | | | |
|------|---------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|-----------------|
| | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
| 19 | 1,2213 | 0,0500 | 0,2163 | 0,2403 | 1,4 | 0,05 | 0,2369 | 0,2659 |
| 20 | 0,4000 | 0,0500 | 0,2958 | - | 0,4 | 0,05 | 0,2958 | - |
| 21 | 1,3995 | 0,0500 | 0,2296 | 0,2539 | 1,5 | 0,05 | 0,2408 | 0,2677 |
| 22 | 0,4000 | 0,0500 | 0,3330 | - | 0,4 | 0,05 | 0,3330 | - |
| 23 | 1,6649 | 0,0500 | 0,2471 | 0,2716 | 1,8 | 0,05 | 0,2619 | 0,2896 |
| 24 | 0,3000 | 0,0500 | 0,3311 | - | 0,3 | 0,05 | 0,3311 | - |
| FO | 12,2999 | | | | 15,0567 | | | |

Apêndice B. Resultados das Simulações do Caso 3

Tabela B.1 – Limites inferior e superior do MC_{51F} para o caso 3

| Relé | Limite inferior do MC_{51F} | Limite superior do MC_{51F} | Relé | Limite inferior do MC_{51F} | Limite superior do MC_{51F} |
|------|-------------------------------|-------------------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1,0 | 1,0 | 40 | 1,0 | 1,0 |
| 2 | 1,0 | 1,0 | 41 | 0,8 | 0,8 |
| 3 | 1,0 | 2,5 | 42 | 0,7 | 0,7 |
| 4 | 1,0 | 1,0 | 43 | 0,8 | 0,8 |
| 5 | 1,0 | 1,0 | 44 | 0,8 | 3,3 |
| 6 | 0,8 | 0,8 | 45 | 0,9 | 0,9 |
| 7 | 0,8 | 0,8 | 46 | 0,9 | 4,0 |
| 8 | 0,7 | 0,7 | 47 | 0,9 | 1,6 |
| 9 | 0,9 | 0,9 | 48 | 0,9 | 1,2 |
| 10 | 1,0 | 3,5 | 49 | 0,8 | 0,8 |
| 11 | 0,8 | 0,8 | 50 | 0,9 | 4,0 |
| 12 | 0,7 | 0,7 | 51 | 0,9 | 2,9 |
| 13 | 0,9 | 3,2 | 52 | 0,9 | 2,8 |
| 14 | 0,8 | 0,8 | 53 | 1,0 | 4,0 |
| 15 | 1,0 | 1,0 | 54 | 0,9 | 1,3 |
| 16 | 1,0 | 1,3 | 55 | 0,8 | 2,6 |
| 17 | 0,8 | 0,9 | 56 | 0,9 | 1,2 |
| 18 | 0,9 | 0,9 | 57 | 0,7 | 2,3 |
| 19 | 0,9 | 0,9 | 58 | 0,9 | 1,9 |
| 20 | 0,9 | 0,9 | 59 | 0,9 | 2,2 |
| 21 | 0,9 | 0,9 | 60 | 0,9 | 0,9 |
| 22 | 1,0 | 1,0 | 61 | 0,9 | 0,9 |
| 23 | 0,9 | 0,9 | 62 | 1,0 | 1,0 |
| 24 | 0,9 | 0,9 | 63 | 1,0 | 4,0 |
| 25 | 0,9 | 4,0 | 64 | 0,8 | 1,9 |
| 26 | 1,0 | 4,0 | 65 | 0,9 | 3,1 |
| 27 | 0,8 | 0,8 | 66 | 0,9 | 2,6 |
| 28 | 0,8 | 0,8 | 67 | 0,9 | 1,1 |
| 29 | 0,8 | 1,4 | 68 | 0,9 | 1,3 |
| 30 | 0,8 | 1,2 | 69 | 1,0 | 1,8 |

| Relé | Limite inferior do MC_{51F} | Limite superior do MC_{51F} | Relé | Limite inferior do MC_{51F} | Limite superior do MC_{51F} |
|------|----------------------------------|----------------------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|
| 31 | 0,8 | 0,8 | 70 | 0,9 | 2,5 |
| 32 | 0,9 | 0,9 | 71 | 1,0 | 1,0 |
| 33 | 0,8 | 0,8 | 72 | 0,8 | 0,8 |
| 34 | 0,9 | 0,9 | 73 | 1,0 | 1,0 |
| 35 | 0,9 | 0,9 | 74 | 1,0 | 1,0 |
| 36 | 0,9 | 0,9 | 75 | 0,9 | 0,9 |
| 37 | 0,9 | 2,5 | 76 | 0,7 | 2,0 |
| 38 | 0,7 | 0,9 | 77 | 1,0 | 1,7 |
| 39 | 0,9 | 1,3 | 78 | 1,0 | 1,0 |

Tabela B.2 – Limites inferior e superior do MC_{51N} para o caso 3

| Relé | Limite inferior do MC_{51N} | Limite superior do MC_{51N} | Relé | Limite inferior do MC_{51N} | Limite superior do MC_{51N} |
|------|----------------------------------|----------------------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 0,6 | 0,6 | 40 | 0,4 | 0,4 |
| 2 | 0,6 | 0,6 | 41 | 0,5 | 0,5 |
| 3 | 0,6 | 1,8 | 42 | 0,3 | 0,3 |
| 4 | 0,4 | 0,4 | 43 | 0,3 | 0,3 |
| 5 | 0,4 | 0,4 | 44 | 0,5 | 2,4 |
| 6 | 0,5 | 0,5 | 45 | 0,4 | 0,4 |
| 7 | 0,5 | 0,5 | 46 | 0,6 | 3,8 |
| 8 | 0,5 | 0,5 | 47 | 0,4 | 1,2 |
| 9 | 0,3 | 0,3 | 48 | 0,4 | 0,9 |
| 10 | 0,6 | 2,4 | 49 | 0,3 | 0,6 |
| 11 | 0,3 | 0,3 | 50 | 0,6 | 4,0 |
| 12 | 0,3 | 0,4 | 51 | 0,4 | 2,2 |
| 13 | 0,6 | 2,3 | 52 | 0,4 | 2,1 |
| 14 | 0,3 | 0,3 | 53 | 0,7 | 4,0 |
| 15 | 0,4 | 0,4 | 54 | 0,4 | 1,0 |
| 16 | 0,5 | 0,9 | 55 | 0,5 | 1,8 |
| 17 | 0,5 | 0,6 | 56 | 0,3 | 0,9 |
| 18 | 0,6 | 0,6 | 57 | 0,5 | 1,6 |
| 19 | 0,3 | 0,3 | 58 | 0,3 | 1,4 |
| 20 | 0,6 | 0,6 | 59 | 0,4 | 1,5 |
| 21 | 0,6 | 0,6 | 60 | 0,4 | 0,4 |
| 22 | 0,7 | 0,7 | 61 | 0,4 | 0,4 |
| 23 | 0,4 | 0,4 | 62 | 0,5 | 0,5 |
| 24 | 0,4 | 0,4 | 63 | 0,7 | 3,5 |
| 25 | 0,7 | 3,3 | 64 | 0,4 | 1,3 |
| 26 | 0,8 | 3,4 | 65 | 0,6 | 0,6 |
| 27 | 0,6 | 0,6 | 66 | 0,4 | 2,0 |
| 28 | 0,6 | 0,6 | 67 | 0,6 | 0,8 |
| 29 | 0,6 | 1,0 | 68 | 0,6 | 0,9 |
| 30 | 0,3 | 0,9 | 69 | 0,7 | 1,4 |
| 31 | 0,3 | 0,3 | 70 | 0,7 | 1,9 |
| 32 | 0,4 | 0,4 | 71 | 0,5 | 0,5 |

| Relé | Limite inferior do MC_{51N} | Limite superior do MC_{51N} | Relé | Limite inferior do MC_{51N} | Limite superior do MC_{51N} |
|------|----------------------------------|----------------------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|
| 33 | 0,3 | 0,3 | 72 | 0,4 | 0,4 |
| 34 | 0,2 | 0,2 | 73 | 0,4 | 0,4 |
| 35 | 0,6 | 0,7 | 74 | 0,5 | 0,5 |
| 36 | 0,3 | 0,5 | 75 | 0,4 | 0,4 |
| 37 | 0,6 | 1,9 | 76 | 0,5 | 1,5 |
| 38 | 0,5 | 0,7 | 77 | 0,6 | 1,2 |
| 39 | 0,7 | 1,0 | 78 | 0,5 | 0,5 |

Tabela B.3 – Solução do modelo de PL, de fase, para o caso 3

| Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|---------------|-----------------|------|------------|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 1,0 | 0,0951 | 0,2275 | 0,6125 | 40 | 1,0 | 0,1585 | 0,4795 | 10,3221 |
| 2 | 1,0 | 0,0951 | 0,2275 | 0,6125 | 41 | 0,8 | 0,2546 | 0,6324 | 1,1059 |
| 3 | 1,0 | 0,1871 | 0,4348 | 1,0086 | 42 | 0,7 | 0,1353 | 0,4058 | 0,8606 |
| 4 | 1,0 | 0,0693 | 0,2072 | 0,9332 | 43 | 0,8 | 0,1822 | 0,5696 | 1,2644 |
| 5 | 1,0 | 0,0693 | 0,2072 | 0,9332 | 44 | 0,8 | 0,3349 | 0,8068 | 1,2380 |
| 6 | 0,8 | 0,1316 | 0,3122 | 0,9933 | 45 | 0,9 | 0,2072 | 0,6300 | 1,0203 |
| 7 | 0,8 | 0,1301 | 0,3094 | 0,9878 | 46 | 0,9 | 0,3838 | 0,9230 | 1,2319 |
| 8 | 0,7 | 0,1460 | 0,3368 | 0,8975 | 47 | 0,9 | 0,1948 | 0,6072 | 0,9512 |
| 9 | 0,9 | 0,0672 | 0,2032 | 0,6721 | 48 | 0,9 | 0,3114 | 0,9347 | 1,1621 |
| 10 | 1,0 | 0,2272 | 0,5324 | 0,8775 | 49 | 0,8 | 0,2209 | 0,6806 | 1,0847 |
| 11 | 0,8 | 0,1044 | 0,3118 | 0,4786 | 50 | 0,9 | 0,3731 | 0,9194 | 1,0522 |
| 12 | 0,7 | 0,2004 | 0,6011 | 0,8072 | 51 | 0,9 | 0,2763 | 0,8371 | 0,9674 |
| 13 | 0,9 | 0,1641 | 0,3895 | 0,5548 | 52 | 0,9 | 0,2623 | 0,7876 | 0,9905 |
| 14 | 0,8 | 0,0690 | 0,2071 | 1,1148 | 53 | 1,0 | 0,3910 | 0,9241 | 1,1061 |
| 15 | 1,0 | 0,1791 | 0,5432 | 0,7389 | 54 | 0,9 | 0,2292 | 0,6966 | 1,0186 |
| 16 | 1,0 | 0,1368 | 0,3430 | 0,4677 | 55 | 0,8 | 0,2290 | 0,5515 | 0,8235 |
| 17 | 0,8 | 0,2185 | 0,5077 | 0,7394 | 56 | 0,9 | 0,2639 | 0,8213 | 1,1725 |
| 18 | 0,9 | 0,0869 | 0,2775 | - | 57 | 0,7 | 0,2327 | 0,5495 | 0,7581 |
| 19 | 0,9 | 0,0745 | 0,2261 | 1,0258 | 58 | 0,9 | 0,2322 | 0,7135 | 1,1758 |
| 20 | 0,9 | 0,1150 | 0,2772 | 0,7797 | 59 | 0,9 | 0,1451 | 0,4454 | 0,6538 |
| 21 | 0,9 | 0,1231 | 0,2798 | 1,1697 | 60 | 0,9 | 0,0724 | 0,2224 | - |
| 22 | 1,0 | 0,0881 | 0,2018 | 1,4975 | 61 | 0,9 | 0,0724 | 0,2224 | - |
| 23 | 0,9 | 0,0669 | 0,2048 | - | 62 | 1,0 | 0,2666 | 0,8164 | 0,9737 |
| 24 | 0,9 | 0,0673 | 0,2081 | - | 63 | 1,0 | 0,2184 | 0,5060 | 0,7677 |
| 25 | 0,9 | 0,2951 | 0,6821 | 0,8622 | 64 | 0,8 | 0,2307 | 0,7087 | 0,9975 |
| 26 | 1,0 | 0,3259 | 0,7601 | 1,2307 | 65 | 0,9 | 0,2149 | 0,5047 | 0,6051 |
| 27 | 0,8 | 0,2388 | 0,5578 | 1,2370 | 66 | 0,9 | 0,2439 | 0,7598 | 0,9995 |
| 28 | 0,8 | 0,2388 | 0,5578 | 1,2370 | 67 | 0,9 | 0,2122 | 0,4860 | 1,0765 |
| 29 | 0,8 | 0,2031 | 0,4764 | 1,0084 | 68 | 0,9 | 0,1112 | 0,3333 | 0,5286 |
| 30 | 0,8 | 0,1197 | 0,3619 | 0,4748 | 69 | 1,0 | 0,1342 | 0,3267 | 0,6720 |
| 31 | 0,8 | 0,0681 | 0,2077 | 1,2638 | 70 | 0,9 | 0,1581 | 0,3704 | 0,6142 |
| 32 | 0,9 | 0,1889 | 0,5707 | 0,7690 | 71 | 1,0 | 0,0798 | 0,2416 | - |
| 33 | 0,8 | 0,0760 | 0,2279 | 0,5490 | 72 | 0,8 | 0,1230 | 0,3449 | 0,5157 |
| 34 | 0,9 | 0,1774 | 0,6706 | 0,8552 | 73 | 1,0 | 0,1181 | 0,3648 | 0,5722 |
| 35 | 0,9 | 0,1989 | 0,4586 | 1,0536 | 74 | 1,0 | 0,0756 | 0,2292 | - |

| Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|
| 36 | 0,9 | 0,1357 | 0,4226 | 1,0203 | 75 | 0,9 | 0,0715 | 0,2236 | - |
| 37 | 0,9 | 0,3095 | 0,7345 | 1,2493 | 76 | 0,7 | 0,2925 | 0,6896 | 0,9938 |
| 38 | 0,7 | 0,2706 | 0,6756 | 1,0986 | 77 | 1,0 | 0,1452 | 0,3966 | 0,4670 |
| 39 | 0,9 | 0,2088 | 0,4785 | 0,9607 | 78 | 1,0 | 0,0815 | 0,2525 | - |
| FO | | | | | 109,8503 | | | | |

Tabela B.4 – Solução do modelo 1 de PIB, de fase, para o caso 3

| Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|---------------|-----------------|------|------------|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 1,0 | 0,15 | 0,3589 | 0,9663 | 40 | 1,0 | 0,20 | 0,6051 | 13,0264 |
| 2 | 1,0 | 0,15 | 0,3589 | 0,9663 | 41 | 0,8 | 0,35 | 0,8694 | 1,5206 |
| 3 | 1,0 | 0,25 | 0,5811 | 1,3480 | 42 | 0,7 | 0,20 | 0,6000 | 1,2725 |
| 4 | 1,0 | 0,10 | 0,2989 | 1,3462 | 43 | 0,8 | 0,25 | 0,7816 | 1,7349 |
| 5 | 1,0 | 0,10 | 0,2989 | 1,3462 | 44 | 0,8 | 0,45 | 1,0841 | 1,6635 |
| 6 | 0,8 | 0,20 | 0,4745 | 1,5098 | 45 | 0,9 | 0,30 | 0,9123 | 1,4775 |
| 7 | 0,8 | 0,20 | 0,4755 | 1,5181 | 46 | 0,9 | 0,55 | 1,3226 | 1,7652 |
| 8 | 0,7 | 0,25 | 0,5767 | 1,5367 | 47 | 0,9 | 0,30 | 0,9352 | 1,4649 |
| 9 | 0,9 | 0,10 | 0,3023 | 1,0002 | 48 | 0,9 | 0,45 | 1,3509 | 1,6796 |
| 10 | 1,0 | 0,35 | 0,8203 | 1,3520 | 49 | 0,8 | 0,35 | 1,0781 | 1,7183 |
| 11 | 0,8 | 0,15 | 0,4480 | 0,6877 | 50 | 0,9 | 0,55 | 1,3555 | 1,5513 |
| 12 | 0,7 | 0,30 | 0,9000 | 1,2085 | 51 | 0,9 | 0,40 | 1,2117 | 1,4003 |
| 13 | 0,9 | 0,25 | 0,5935 | 0,8453 | 52 | 0,9 | 0,40 | 1,2011 | 1,5106 |
| 14 | 0,8 | 0,10 | 0,3001 | 1,6152 | 53 | 1,0 | 0,55 | 1,2997 | 1,5557 |
| 15 | 1,0 | 0,25 | 0,7582 | 1,0313 | 54 | 0,9 | 0,35 | 1,0638 | 1,5555 |
| 16 | 1,0 | 0,20 | 0,5016 | 0,6839 | 55 | 0,8 | 0,30 | 0,7227 | 1,0791 |
| 17 | 0,8 | 0,30 | 0,6969 | 1,0150 | 56 | 0,9 | 0,35 | 1,0891 | 1,5547 |
| 18 | 0,9 | 0,10 | 0,3193 | - | 57 | 0,7 | 0,30 | 0,7084 | 0,9775 |
| 19 | 0,9 | 0,10 | 0,3034 | 1,3769 | 58 | 0,9 | 0,30 | 0,9217 | 1,5189 |
| 20 | 0,9 | 0,15 | 0,3616 | 1,0173 | 59 | 0,9 | 0,20 | 0,6137 | 0,9009 |
| 21 | 0,9 | 0,20 | 0,4546 | 1,9004 | 60 | 0,9 | 0,10 | 0,3071 | - |
| 22 | 1,0 | 0,15 | 0,3437 | 2,5511 | 61 | 0,9 | 0,10 | 0,3071 | - |
| 23 | 0,9 | 0,10 | 0,3062 | - | 62 | 1,0 | 0,35 | 1,0719 | 1,2785 |
| 24 | 0,9 | 0,10 | 0,3093 | - | 63 | 1,0 | 0,30 | 0,6951 | 1,0547 |
| 25 | 0,9 | 0,45 | 1,0400 | 1,3147 | 64 | 0,8 | 0,30 | 0,9214 | 1,2970 |
| 26 | 1,0 | 0,50 | 1,1661 | 1,8880 | 65 | 0,9 | 0,30 | 0,7046 | 0,8449 |
| 27 | 0,8 | 0,30 | 0,7008 | 1,5541 | 66 | 0,9 | 0,35 | 1,0903 | 1,4342 |
| 28 | 0,8 | 0,30 | 0,7008 | 1,5541 | 67 | 0,9 | 0,30 | 0,6872 | 1,5221 |
| 29 | 0,8 | 0,30 | 0,7036 | 1,4893 | 68 | 0,9 | 0,15 | 0,4497 | 0,7133 |
| 30 | 0,8 | 0,15 | 0,4536 | 0,5951 | 69 | 1,0 | 0,20 | 0,4869 | 1,0015 |
| 31 | 0,8 | 0,10 | 0,3049 | 1,8554 | 70 | 0,9 | 0,20 | 0,4687 | 0,7771 |
| 32 | 0,9 | 0,25 | 0,7552 | 1,0175 | 71 | 1,0 | 0,10 | 0,3027 | - |
| 33 | 0,8 | 0,10 | 0,2997 | 0,7220 | 72 | 0,8 | 0,15 | 0,4205 | 0,6288 |
| 34 | 0,9 | 0,25 | 0,9449 | 1,2050 | 73 | 1,0 | 0,15 | 0,4635 | 0,7270 |
| 35 | 0,9 | 0,30 | 0,6917 | 1,5891 | 74 | 1,0 | 0,10 | 0,3033 | - |
| 36 | 0,9 | 0,20 | 0,6231 | 1,5042 | 75 | 0,9 | 0,10 | 0,3125 | - |
| 37 | 0,9 | 0,45 | 1,0679 | 1,8165 | 76 | 0,7 | 0,40 | 0,9431 | 1,3592 |

| Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|------------|---------------|-----------------|
| 38 | 0,7 | 0,35 | 0,8738 | 1,4209 | 77 | 1,0 | 0,20 | 0,5462 | 0,6431 |
| 39 | 0,9 | 0,30 | 0,6875 | 1,3802 | 78 | 1,0 | 0,10 | 0,3100 | - |
| FO | | | | | 154,6123 | | | | |

Tabela B.5 – Solução do modelo de PNL, de fase, para o caso 3

| Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|---------------|-----------------|---------|------------|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 1,0000 | 0,0894 | 0,2138 | 0,5757 | 40 | 1,0000 | 0,1076 | 0,3256 | 7,0091 |
| 2 | 1,0000 | 0,0894 | 0,2138 | 0,5757 | 41 | 0,8000 | 0,1730 | 0,4296 | 0,7514 |
| 3 | 1,0000 | 0,1654 | 0,3845 | 0,8919 | 42 | 0,7000 | 0,1056 | 0,3168 | 0,6719 |
| 4 | 1,0000 | 0,0693 | 0,2071 | 0,9329 | 43 | 0,8000 | 0,1106 | 0,3459 | 0,7678 |
| 5 | 1,0000 | 0,0693 | 0,2071 | 0,9329 | 44 | 3,1638 | 0,0882 | 0,4199 | 1,2708 |
| 6 | 0,8000 | 0,1114 | 0,2644 | 0,8412 | 45 | 0,9000 | 0,1407 | 0,4278 | 0,6928 |
| 7 | 0,8000 | 0,1120 | 0,2663 | 0,8503 | 46 | 3,9755 | 0,1135 | 0,5832 | 1,2155 |
| 8 | 0,7000 | 0,1012 | 0,2335 | 0,6222 | 47 | 1,6000 | 0,0969 | 0,4118 | 0,8031 |
| 9 | 0,9000 | 0,0672 | 0,2032 | 0,6721 | 48 | 1,2000 | 0,1902 | 0,6553 | 0,8437 |
| 10 | 3,5000 | 0,0741 | 0,3096 | 0,9787 | 49 | 0,8000 | 0,1574 | 0,4848 | 0,7727 |
| 11 | 0,8000 | 0,1044 | 0,3118 | 0,4786 | 50 | 2,9991 | 0,1356 | 0,5992 | 0,7693 |
| 12 | 0,7000 | 0,1720 | 0,5160 | 0,6928 | 51 | 2,9000 | 0,1037 | 0,6593 | 0,9110 |
| 13 | 2,3567 | 0,0922 | 0,3330 | 0,5993 | 52 | 2,8000 | 0,0791 | 0,4786 | 0,8024 |
| 14 | 0,8000 | 0,0690 | 0,2071 | 1,1148 | 53 | 4,0000 | 0,1488 | 0,6881 | 1,0018 |
| 15 | 1,0000 | 0,1444 | 0,4379 | 0,5957 | 54 | 1,3000 | 0,1083 | 0,3950 | 0,6335 |
| 16 | 1,2198 | 0,1244 | 0,3374 | 0,4733 | 55 | 2,6000 | 0,0767 | 0,3208 | 0,7295 |
| 17 | 0,9000 | 0,1480 | 0,3587 | 0,5323 | 56 | 1,2000 | 0,1353 | 0,4856 | 0,7398 |
| 18 | 0,9000 | 0,0869 | 0,2775 | - | 57 | 2,3000 | 0,0912 | 0,3712 | 0,6919 |
| 19 | 0,9000 | 0,0745 | 0,2261 | 1,0258 | 58 | 1,9000 | 0,0845 | 0,3935 | 0,9532 |
| 20 | 0,9000 | 0,1150 | 0,2772 | 0,7797 | 59 | 2,2000 | 0,0680 | 0,3514 | 0,7432 |
| 21 | 0,9000 | 0,0880 | 0,2000 | 0,8360 | 60 | 0,9000 | 0,0724 | 0,2224 | - |
| 22 | 1,0000 | 0,0881 | 0,2018 | 1,4975 | 61 | 0,9000 | 0,0724 | 0,2224 | - |
| 23 | 0,9000 | 0,0669 | 0,2048 | - | 62 | 1,0000 | 0,1708 | 0,5229 | 0,6238 |
| 24 | 0,9000 | 0,0673 | 0,2081 | - | 63 | 2,5332 | 0,1086 | 0,3720 | 0,7358 |
| 25 | 4,0000 | 0,0914 | 0,4353 | 0,7477 | 64 | 1,9000 | 0,0754 | 0,3820 | 0,7196 |
| 26 | 1,9427 | 0,1539 | 0,4681 | 0,9213 | 65 | 3,1000 | 0,1031 | 0,4282 | 0,6000 |
| 27 | 0,8000 | 0,1718 | 0,4014 | 0,8901 | 66 | 2,6000 | 0,0670 | 0,4078 | 0,7533 |
| 28 | 0,8000 | 0,1718 | 0,4014 | 0,8901 | 67 | 1,1000 | 0,1156 | 0,2846 | 0,6894 |
| 29 | 0,8000 | 0,1601 | 0,3755 | 0,7948 | 68 | 1,3000 | 0,0881 | 0,3159 | 0,5629 |
| 30 | 1,2000 | 0,0929 | 0,3437 | 0,4830 | 69 | 1,0000 | 0,1342 | 0,3267 | 0,6720 |
| 31 | 0,8000 | 0,0681 | 0,2077 | 1,2638 | 70 | 1,5827 | 0,1143 | 0,3345 | 0,6559 |
| 32 | 0,9000 | 0,1492 | 0,4506 | 0,6071 | 71 | 1,0000 | 0,0798 | 0,2416 | - |
| 33 | 0,8000 | 0,0737 | 0,2207 | 0,5318 | 72 | 0,8000 | 0,1230 | 0,3449 | 0,5157 |
| 34 | 0,9000 | 0,1502 | 0,5679 | 0,7242 | 73 | 1,0000 | 0,1181 | 0,3648 | 0,5722 |
| 35 | 0,9000 | 0,1247 | 0,2874 | 0,6604 | 74 | 1,0000 | 0,0756 | 0,2292 | - |
| 36 | 0,9000 | 0,1149 | 0,3579 | 0,8641 | 75 | 0,9000 | 0,0715 | 0,2236 | - |
| 37 | 2,5000 | 0,0991 | 0,3694 | 1,0090 | 76 | 2,0000 | 0,0995 | 0,3730 | 0,7122 |
| 38 | 0,9000 | 0,1429 | 0,3939 | 0,6827 | 77 | 1,7000 | 0,1135 | 0,3957 | 0,4887 |
| 39 | 0,9000 | 0,1587 | 0,3636 | 0,7300 | 78 | 1,0000 | 0,0815 | 0,2525 | - |
| FO | | | | | 87,0090 | | | | |

Tabela B.7 – Solução do modelo de PL, de neutro, para o caso 3

| Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{0\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|---------------|-----------------|------|------------|------------|---------------|-----------------|
| 1 | 0,6 | 0,1388 | 0,3310 | 0,7793 | 40 | 0,4 | 0,3934 | 0,9852 | 3,8092 |
| 2 | 0,6 | 0,1388 | 0,3310 | 0,7793 | 41 | 0,5 | 0,5639 | 1,3905 | 2,1831 |
| 3 | 0,6 | 0,3245 | 0,7528 | 1,5528 | 42 | 0,3 | 0,2971 | 0,7506 | 1,2617 |
| 4 | 0,4 | 0,1608 | 0,4044 | 1,0312 | 43 | 0,3 | 0,3047 | 0,7593 | 1,2512 |
| 5 | 0,4 | 0,1608 | 0,4044 | 1,0312 | 44 | 0,5 | 0,4130 | 0,9800 | 1,4107 |
| 6 | 0,5 | 0,2320 | 0,5565 | 1,5361 | 45 | 0,4 | 0,4591 | 1,1914 | 1,6460 |
| 7 | 0,5 | 0,2145 | 0,5154 | 1,4300 | 46 | 0,6 | 0,5096 | 1,2439 | 1,5584 |
| 8 | 0,5 | 0,1973 | 0,4822 | 1,2386 | 47 | 0,4 | 0,4016 | 1,0391 | 1,4256 |
| 9 | 0,3 | 0,1598 | 0,3805 | 0,7671 | 48 | 0,4 | 0,5152 | 1,3285 | 1,4935 |
| 10 | 0,6 | 0,3981 | 0,9318 | 1,4139 | 49 | 0,3 | 0,3980 | 0,9884 | 1,3043 |
| 11 | 0,3 | 0,1917 | 0,4684 | 0,6148 | 50 | 0,6 | 0,7291 | 1,8121 | 1,9655 |
| 12 | 0,3 | 0,4620 | 1,1998 | 1,4316 | 51 | 0,4 | 0,4335 | 1,1345 | 1,2062 |
| 13 | 0,6 | 0,2067 | 0,5001 | 0,6769 | 52 | 0,4 | 0,6822 | 1,7551 | 2,0082 |
| 14 | 0,3 | 0,1418 | 0,3444 | 0,9047 | 53 | 0,7 | 0,4836 | 1,1885 | 1,3473 |
| 15 | 0,4 | 0,3744 | 0,9404 | 1,1404 | 54 | 0,4 | 0,6840 | 1,7866 | 2,2714 |
| 16 | 0,5 | 0,3281 | 0,7572 | 0,9495 | 55 | 0,5 | 0,8333 | 1,9764 | 2,7772 |
| 17 | 0,5 | 0,5306 | 1,2300 | 1,6856 | 56 | 0,3 | 0,4199 | 1,0060 | 1,2244 |
| 18 | 0,6 | 0,0840 | 0,2788 | - | 57 | 0,5 | 1,0281 | 2,5451 | 3,3204 |
| 19 | 0,3 | 0,3109 | 0,7360 | 1,6994 | 58 | 0,3 | 0,3862 | 0,9056 | 1,2324 |
| 20 | 0,6 | 0,1093 | 0,2709 | 0,6941 | 59 | 0,4 | 1,1654 | 3,0525 | 3,9124 |
| 21 | 0,6 | 0,2412 | 0,5623 | 1,4681 | 60 | 0,4 | 0,0850 | 0,2176 | - |
| 22 | 0,7 | 0,1513 | 0,3608 | 1,4767 | 61 | 0,4 | 0,0850 | 0,2176 | - |
| 23 | 0,4 | 0,0995 | 0,2495 | 1,8258 | 62 | 0,5 | 0,3735 | 0,9907 | 1,0833 |
| 24 | 0,4 | 0,0821 | 0,2098 | - | 63 | 0,7 | 0,4214 | 1,0077 | 1,4422 |
| 25 | 0,7 | 0,4320 | 1,0082 | 1,2499 | 64 | 0,4 | 0,9681 | 2,5215 | 3,2778 |
| 26 | 0,8 | 0,5246 | 1,2531 | 2,0509 | 65 | 0,6 | 0,5179 | 1,2353 | 1,3711 |
| 27 | 0,6 | 0,2694 | 0,6316 | 1,3203 | 66 | 0,4 | 0,9343 | 2,2225 | 2,7416 |
| 28 | 0,6 | 0,2694 | 0,6316 | 1,3203 | 67 | 0,6 | 0,6277 | 1,4788 | 2,4619 |
| 29 | 0,6 | 0,2337 | 0,5498 | 1,1032 | 68 | 0,6 | 0,3903 | 0,9197 | 1,7570 |
| 30 | 0,3 | 0,1852 | 0,4514 | 0,5300 | 69 | 0,7 | 0,1307 | 0,3038 | 0,6041 |
| 31 | 0,3 | 0,1313 | 0,3221 | 0,8770 | 70 | 0,7 | 0,1470 | 0,3416 | 0,5644 |
| 32 | 0,4 | 0,4538 | 1,1745 | 1,4300 | 71 | 0,5 | 0,0871 | 0,2301 | - |
| 33 | 0,3 | 0,1321 | 0,3217 | 0,5664 | 72 | 0,4 | 0,1380 | 0,3409 | 0,4522 |
| 34 | 0,2 | 0,5319 | 1,2800 | 1,3998 | 73 | 0,4 | 0,1457 | 0,3615 | 0,4733 |
| 35 | 0,6 | 0,3838 | 0,9105 | 1,5903 | 74 | 0,5 | 0,0831 | 0,2214 | - |
| 36 | 0,3 | 0,3980 | 0,9478 | 1,4744 | 75 | 0,4 | 0,0839 | 0,2185 | 4,3655 |
| 37 | 0,6 | 0,3884 | 0,9001 | 1,4769 | 76 | 0,5 | 0,3667 | 0,8723 | 1,2191 |
| 38 | 0,5 | 0,5563 | 1,3903 | 2,1844 | 77 | 0,6 | 0,1518 | 0,3952 | 0,4331 |
| 39 | 0,7 | 0,3501 | 0,8300 | 1,6732 | 78 | 0,5 | 0,0880 | 0,2475 | 2,8573 |
| FO | 178,0519 | | | | | | | | |

Tabela B.8 – Solução do modelo 1 de PIB, de neutro, para o caso 3

| Relé | MC _{51N} | MT _{51N} | t _{0%} (s) | t _{100%} (s) | Relé | MC _{51N} | MT _{51N} | t _{0%} (s) | t _{100%} (s) |
|------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 0,6 | 0,20 | 0,4771 | 1,1233 | 40 | 0,4 | 0,50 | 1,2520 | 4,8408 |
| 2 | 0,6 | 0,20 | 0,4771 | 1,1233 | 41 | 0,5 | 0,70 | 1,7263 | 2,7102 |
| 3 | 0,6 | 0,45 | 1,0439 | 2,1531 | 42 | 0,3 | 0,40 | 1,0106 | 1,6989 |
| 4 | 0,4 | 0,25 | 0,6287 | 1,6034 | 43 | 0,3 | 0,45 | 1,1216 | 1,8481 |
| 5 | 0,4 | 0,25 | 0,6287 | 1,6034 | 44 | 0,5 | 0,60 | 1,4239 | 2,0497 |
| 6 | 0,5 | 0,30 | 0,7196 | 1,9864 | 45 | 0,4 | 0,60 | 1,5572 | 2,1514 |
| 7 | 0,5 | 0,30 | 0,7209 | 2,0001 | 46 | 0,6 | 0,70 | 1,7085 | 2,1405 |
| 8 | 0,5 | 0,25 | 0,6108 | 1,5691 | 47 | 0,4 | 0,55 | 1,4232 | 1,9527 |
| 9 | 0,3 | 0,25 | 0,5952 | 1,1998 | 48 | 0,4 | 0,70 | 1,8048 | 2,0290 |
| 10 | 0,6 | 0,50 | 1,1703 | 1,7758 | 49 | 0,3 | 0,60 | 1,4900 | 1,9661 |
| 11 | 0,3 | 0,30 | 0,7330 | 0,9622 | 50 | 0,6 | 0,90 | 2,2367 | 2,4262 |
| 12 | 0,3 | 0,60 | 1,5581 | 1,8592 | 51 | 0,4 | 0,65 | 1,7010 | 1,8085 |
| 13 | 0,6 | 0,30 | 0,7258 | 0,9824 | 52 | 0,4 | 0,85 | 2,1869 | 2,5023 |
| 14 | 0,3 | 0,20 | 0,4856 | 1,2757 | 53 | 0,7 | 0,70 | 1,7202 | 1,9501 |
| 15 | 0,4 | 0,50 | 1,2560 | 1,5231 | 54 | 0,4 | 0,85 | 2,2201 | 2,8226 |
| 16 | 0,5 | 0,45 | 1,0385 | 1,3022 | 55 | 0,5 | 1,00 | 2,3716 | 3,3326 |
| 17 | 0,5 | 0,70 | 1,6225 | 2,2237 | 56 | 0,3 | 0,60 | 1,4374 | 1,7494 |
| 18 | 0,6 | 0,10 | 0,3320 | - | 57 | 0,5 | 1,25 | 3,0943 | 4,0369 |
| 19 | 0,3 | 0,40 | 0,9468 | 2,1863 | 58 | 0,3 | 0,55 | 1,2898 | 1,7553 |
| 20 | 0,6 | 0,15 | 0,3719 | 0,9526 | 59 | 0,4 | 1,40 | 3,6668 | 4,6999 |
| 21 | 0,6 | 0,30 | 0,6995 | 1,8264 | 60 | 0,4 | 0,10 | 0,2559 | - |
| 22 | 0,7 | 0,20 | 0,4770 | 1,9523 | 61 | 0,4 | 0,10 | 0,2559 | - |
| 23 | 0,4 | 0,15 | 0,3760 | 2,7516 | 62 | 0,5 | 0,60 | 1,5916 | 1,7404 |
| 24 | 0,4 | 0,10 | 0,2554 | - | 63 | 0,7 | 0,70 | 1,6738 | 2,3956 |
| 25 | 0,7 | 0,60 | 1,4003 | 1,7360 | 64 | 0,4 | 1,20 | 3,1253 | 4,0628 |
| 26 | 0,8 | 0,65 | 1,5526 | 2,5410 | 65 | 0,6 | 0,85 | 2,0273 | 2,2500 |
| 27 | 0,6 | 0,45 | 1,0550 | 2,2052 | 66 | 0,4 | 1,15 | 2,7356 | 3,3746 |
| 28 | 0,6 | 0,45 | 1,0550 | 2,2052 | 67 | 0,6 | 0,80 | 1,8848 | 3,1379 |
| 29 | 0,6 | 0,40 | 0,9409 | 1,8880 | 68 | 0,6 | 0,65 | 1,5314 | 2,9257 |
| 30 | 0,3 | 0,25 | 0,6092 | 0,7152 | 69 | 0,7 | 0,20 | 0,4647 | 0,9242 |
| 31 | 0,3 | 0,20 | 0,4905 | 1,3354 | 70 | 0,7 | 0,20 | 0,4647 | 0,7678 |
| 32 | 0,4 | 0,60 | 1,5531 | 1,8908 | 71 | 0,5 | 0,10 | 0,2644 | - |
| 33 | 0,3 | 0,20 | 0,4872 | 0,8578 | 72 | 0,4 | 0,20 | 0,4941 | 0,6554 |
| 34 | 0,2 | 0,70 | 1,6846 | 1,8422 | 73 | 0,4 | 0,20 | 0,4961 | 0,6495 |
| 35 | 0,6 | 0,50 | 1,1861 | 2,0719 | 74 | 0,5 | 0,10 | 0,2663 | - |
| 36 | 0,3 | 0,55 | 1,3098 | 2,0377 | 75 | 0,4 | 0,10 | 0,2605 | 5,2047 |
| 37 | 0,6 | 0,55 | 1,2746 | 2,0912 | 76 | 0,5 | 0,60 | 1,4271 | 1,9945 |
| 38 | 0,5 | 0,70 | 1,7496 | 2,7489 | 77 | 0,6 | 0,20 | 0,5208 | 0,5708 |
| 39 | 0,7 | 0,45 | 1,0669 | 2,1508 | 78 | 0,5 | 0,15 | 0,4220 | 4,8707 |
| FO | 242,2191 | | | | | | | | |

Tabela B.9 – Solução do modelo de PNL, de neutro, para o caso 3

| Relé | MC _{51N} | MT _{51N} | t _{0%} (s) | t _{100%} (s) | Relé | MC _{51N} | MT _{51N} | t _{0%} (s) | t _{100%} (s) |
|------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 0,6000 | 0,0964 | 0,2299 | 0,5414 | 40 | 0,4000 | 0,1736 | 0,4347 | 1,6808 |
| 2 | 0,6000 | 0,0964 | 0,2299 | 0,5414 | 41 | 0,5000 | 0,2248 | 0,5543 | 0,8702 |
| 3 | 1,6068 | 0,0758 | 0,2675 | 1,1557 | 42 | 0,3000 | 0,1610 | 0,4067 | 0,6837 |
| 4 | 0,4000 | 0,0836 | 0,2102 | 0,5360 | 43 | 0,3000 | 0,1885 | 0,4699 | 0,7743 |
| 5 | 0,4000 | 0,0836 | 0,2102 | 0,5360 | 44 | 1,6744 | 0,1053 | 0,4375 | 0,9146 |
| 6 | 0,5025 | 0,1350 | 0,3243 | 0,8980 | 45 | 0,4000 | 0,2128 | 0,5524 | 0,7631 |
| 7 | 0,5000 | 0,1206 | 0,2897 | 0,8037 | 46 | 3,7297 | 0,0616 | 0,4438 | 1,0437 |
| 8 | 0,5000 | 0,0882 | 0,2156 | 0,5537 | 47 | 0,8501 | 0,1378 | 0,5033 | 0,8079 |
| 9 | 0,3000 | 0,1110 | 0,2643 | 0,5328 | 48 | 0,9000 | 0,1571 | 0,5890 | 0,6996 |
| 10 | 2,4000 | 0,0678 | 0,3078 | 0,8631 | 49 | 0,5411 | 0,1545 | 0,4917 | 0,7093 |
| 11 | 0,3000 | 0,1535 | 0,3750 | 0,4923 | 50 | 2,5932 | 0,1308 | 0,7083 | 0,8484 |
| 12 | 0,4000 | 0,2045 | 0,5982 | 0,7308 | 51 | 1,6668 | 0,1113 | 0,6535 | 0,7508 |
| 13 | 1,9739 | 0,0781 | 0,3317 | 0,6005 | 52 | 2,1000 | 0,0888 | 0,6208 | 0,9286 |
| 14 | 0,3000 | 0,0985 | 0,2392 | 0,6285 | 53 | 3,0789 | 0,1253 | 0,6716 | 0,8950 |
| 15 | 0,4000 | 0,1970 | 0,4949 | 0,6001 | 54 | 1,0000 | 0,1532 | 0,6221 | 0,9229 |
| 16 | 0,8303 | 0,1462 | 0,4096 | 0,5414 | 55 | 1,8000 | 0,1504 | 0,6531 | 1,3453 |
| 17 | 0,6000 | 0,2144 | 0,5308 | 0,7452 | 56 | 0,9000 | 0,1241 | 0,4904 | 0,6884 |
| 18 | 0,6000 | 0,0840 | 0,2788 | - | 57 | 1,6000 | 0,2469 | 1,0715 | 1,7856 |
| 19 | 0,3000 | 0,1373 | 0,3250 | 0,7505 | 58 | 1,4000 | 0,0694 | 0,3527 | 0,7966 |
| 20 | 0,6000 | 0,1093 | 0,2709 | 0,6941 | 59 | 1,5000 | 0,2759 | 1,4873 | 2,6589 |
| 21 | 0,6000 | 0,1078 | 0,2515 | 0,6566 | 60 | 0,4000 | 0,0850 | 0,2176 | - |
| 22 | 0,7000 | 0,0848 | 0,2024 | 0,8282 | 61 | 0,4000 | 0,0850 | 0,2176 | - |
| 23 | 0,4000 | 0,0822 | 0,2060 | 1,5077 | 62 | 0,5000 | 0,1791 | 0,4751 | 0,5195 |
| 24 | 0,4000 | 0,0821 | 0,2098 | - | 63 | 3,5000 | 0,0683 | 0,3825 | 1,2056 |
| 25 | 3,3000 | 0,0879 | 0,4457 | 0,7518 | 64 | 1,2642 | 0,2184 | 1,0268 | 1,7317 |
| 26 | 1,7278 | 0,1329 | 0,4386 | 0,9313 | 65 | 0,6000 | 0,3959 | 0,9442 | 1,0480 |
| 27 | 0,6000 | 0,1551 | 0,3636 | 0,7599 | 66 | 1,9747 | 0,1394 | 0,7631 | 1,3204 |
| 28 | 0,6000 | 0,1551 | 0,3636 | 0,7599 | 67 | 0,8000 | 0,2061 | 0,5409 | 0,9698 |
| 29 | 0,6000 | 0,1519 | 0,3573 | 0,7170 | 68 | 0,9000 | 0,2108 | 0,5802 | 1,2958 |
| 30 | 0,8143 | 0,0965 | 0,3696 | 0,4791 | 69 | 1,0038 | 0,1021 | 0,2716 | 0,6243 |
| 31 | 0,3000 | 0,0901 | 0,2210 | 0,6016 | 70 | 1,8448 | 0,0722 | 0,2533 | 0,6099 |
| 32 | 0,4000 | 0,2311 | 0,5982 | 0,7283 | 71 | 0,5000 | 0,0871 | 0,2301 | - |
| 33 | 0,3000 | 0,1072 | 0,2612 | 0,4599 | 72 | 0,4000 | 0,1380 | 0,3409 | 0,4522 |
| 34 | 0,2000 | 0,3033 | 0,7299 | 0,7982 | 73 | 0,4000 | 0,1457 | 0,3615 | 0,4733 |
| 35 | 0,7000 | 0,1526 | 0,3833 | 0,6983 | 74 | 0,5000 | 0,0831 | 0,2214 | - |
| 36 | 0,5000 | 0,1751 | 0,5106 | 0,9002 | 75 | 0,4000 | 0,0813 | 0,2117 | 4,2310 |
| 37 | 1,5266 | 0,0845 | 0,2899 | 0,6705 | 76 | 1,5000 | 0,0810 | 0,3163 | 0,5825 |
| 38 | 0,7000 | 0,1750 | 0,5006 | 0,8533 | 77 | 1,0381 | 0,1189 | 0,3936 | 0,4424 |
| 39 | 0,9397 | 0,1353 | 0,3586 | 0,8149 | 78 | 0,5000 | 0,0880 | 0,2475 | 2,8572 |
| FO | 99,2684 | | | | | | | | |

Tabela B.10 – Solução do modelo 2 de PIB, de neutro, para o caso 3

| Relé | MC _{51N} | MT _{51N} | t _{0%} (s) | t _{100%} (s) | Relé | MC _{51N} | MT _{51N} | t _{0%} (s) | t _{100%} (s) |
|------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 0,6 | 0,15 | 0,3578 | 0,8424 | 40 | 0,4 | 0,25 | 0,6260 | 2,4204 |
| 2 | 0,6 | 0,15 | 0,3578 | 0,8424 | 41 | 0,5 | 0,30 | 0,7398 | 1,1615 |
| 3 | 1,2 | 0,15 | 0,4590 | 1,3917 | 42 | 0,3 | 0,25 | 0,6316 | 1,0618 |
| 4 | 0,4 | 0,15 | 0,3772 | 0,9620 | 43 | 0,3 | 0,25 | 0,6231 | 1,0267 |
| 5 | 0,4 | 0,15 | 0,3772 | 0,9620 | 44 | 2,0 | 0,10 | 0,4661 | 1,1186 |
| 6 | 0,5 | 0,20 | 0,4798 | 1,3243 | 45 | 0,4 | 0,30 | 0,7786 | 1,0757 |
| 7 | 0,5 | 0,15 | 0,3604 | 1,0000 | 46 | 3,1 | 0,10 | 0,6036 | 1,1673 |
| 8 | 0,5 | 0,15 | 0,3665 | 0,9414 | 47 | 1,1 | 0,15 | 0,6365 | 1,1281 |
| 9 | 0,3 | 0,15 | 0,3571 | 0,7199 | 48 | 0,9 | 0,20 | 0,7499 | 0,8907 |
| 10 | 2,2 | 0,10 | 0,4290 | 1,0974 | 49 | 0,6 | 0,20 | 0,6693 | 0,9870 |
| 11 | 0,3 | 0,20 | 0,4887 | 0,6415 | 50 | 2,9 | 0,15 | 0,8911 | 1,0879 |
| 12 | 0,3 | 0,30 | 0,7790 | 0,9296 | 51 | 1,6 | 0,15 | 0,8506 | 0,9724 |
| 13 | 1,9 | 0,10 | 0,4147 | 0,7373 | 52 | 1,6 | 0,15 | 0,8209 | 1,1105 |
| 14 | 0,3 | 0,15 | 0,3642 | 0,9568 | 53 | 3,2 | 0,15 | 0,8292 | 1,1164 |
| 15 | 0,4 | 0,25 | 0,6280 | 0,7616 | 54 | 1,0 | 0,20 | 0,8123 | 1,2051 |
| 16 | 0,8 | 0,20 | 0,5518 | 0,7259 | 55 | 1,8 | 0,20 | 0,8684 | 1,7888 |
| 17 | 0,5 | 0,30 | 0,6954 | 0,9530 | 56 | 0,7 | 0,20 | 0,6888 | 0,9208 |
| 18 | 0,6 | 0,10 | 0,3320 | - | 57 | 1,4 | 0,35 | 1,3992 | 2,2187 |
| 19 | 0,3 | 0,20 | 0,4734 | 1,0931 | 58 | 1,3 | 0,10 | 0,4815 | 1,0221 |
| 20 | 0,6 | 0,15 | 0,3719 | 0,9526 | 59 | 1,5 | 0,35 | 1,8869 | 3,3732 |
| 21 | 0,6 | 0,15 | 0,3498 | 0,9132 | 60 | 0,4 | 0,10 | 0,2559 | - |
| 22 | 0,7 | 0,10 | 0,2385 | 0,9761 | 61 | 0,4 | 0,10 | 0,2559 | - |
| 23 | 0,4 | 0,10 | 0,2507 | 1,8344 | 62 | 0,5 | 0,25 | 0,6632 | 0,7252 |
| 24 | 0,4 | 0,10 | 0,2554 | - | 63 | 3,3 | 0,10 | 0,5339 | 1,5345 |
| 25 | 2,3 | 0,15 | 0,5989 | 0,8846 | 64 | 1,2 | 0,30 | 1,3612 | 2,2436 |
| 26 | 2,6 | 0,10 | 0,4124 | 1,1986 | 65 | 0,6 | 0,50 | 1,1925 | 1,3236 |
| 27 | 0,6 | 0,20 | 0,4689 | 0,9801 | 66 | 1,8 | 0,20 | 1,0191 | 1,6805 |
| 28 | 0,6 | 0,20 | 0,4689 | 0,9801 | 67 | 0,7 | 0,30 | 0,7478 | 1,2921 |
| 29 | 0,8 | 0,15 | 0,3930 | 0,8840 | 68 | 0,9 | 0,25 | 0,6881 | 1,5367 |
| 30 | 0,6 | 0,15 | 0,4896 | 0,6088 | 69 | 0,8 | 0,15 | 0,3657 | 0,7623 |
| 31 | 0,3 | 0,15 | 0,3679 | 1,0016 | 70 | 1,8 | 0,10 | 0,3464 | 0,8200 |
| 32 | 0,4 | 0,30 | 0,7765 | 0,9454 | 71 | 0,5 | 0,10 | 0,2644 | - |
| 33 | 0,3 | 0,15 | 0,3654 | 0,6433 | 72 | 0,4 | 0,20 | 0,4941 | 0,6554 |
| 34 | 0,2 | 0,40 | 0,9626 | 1,0527 | 73 | 0,4 | 0,20 | 0,4961 | 0,6495 |
| 35 | 0,7 | 0,20 | 0,5022 | 0,9149 | 74 | 0,5 | 0,10 | 0,2663 | - |
| 36 | 0,4 | 0,25 | 0,6640 | 1,0995 | 75 | 0,4 | 0,10 | 0,2605 | 5,2047 |
| 37 | 1,7 | 0,10 | 0,3631 | 0,9063 | 76 | 1,0 | 0,15 | 0,4742 | 0,7563 |
| 38 | 0,6 | 0,25 | 0,6709 | 1,0978 | 77 | 0,8 | 0,15 | 0,4400 | 0,4880 |
| 39 | 0,8 | 0,20 | 0,4980 | 1,0547 | 78 | 0,5 | 0,10 | 0,2813 | 3,2471 |
| FO | 130,1618 | | | | | | | | |

Apêndice C. Resultados das Simulações do Caso 4

Tabela C.1 – Valores do MC_{50F} e do MC_{50N} para o caso 4

| Relé | MC_{50F} | MC_{50N} | Relé | MC_{50F} | MC_{50N} |
|------|------------|------------|------|------------|------------|
| 1 | 4,7 | 2,9 | 40 | 3,3 | 2,2 |
| 2 | 4,7 | 2,9 | 41 | 5,8 | 3,8 |
| 3 | 4,9 | 3,0 | 42 | 2,8 | 1,8 |
| 4 | 2,6 | 1,6 | 43 | 3,4 | 2,2 |
| 5 | 2,6 | 1,6 | 44 | 6,5 | 4,1 |
| 6 | 2,9 | 1,8 | 45 | 5,0 | 3,2 |
| 7 | 2,9 | 1,8 | 46 | 9,6 | 6,1 |
| 8 | 3,0 | 1,8 | 47 | 4,7 | 3,1 |
| 9 | 2,6 | 1,6 | 48 | 7,0 | 4,5 |
| 10 | 7,6 | 4,6 | 49 | 4,5 | 2,9 |
| 11 | 4,6 | 2,8 | 50 | 12,1 | 7,8 |
| 12 | 4,8 | 3,0 | 51 | 7,6 | 4,8 |
| 13 | 8,6 | 5,3 | 52 | 6,8 | 4,3 |
| 14 | 2,2 | 1,4 | 53 | 13,6 | 8,5 |
| 15 | 6,6 | 4,1 | 54 | 5,5 | 3,5 |
| 16 | 9,2 | 5,7 | 55 | 6,9 | 4,3 |
| 17 | 7,7 | 4,8 | 56 | 5,5 | 3,5 |
| 18 | 1,9 | 1,2 | 57 | 7,3 | 4,6 |
| 19 | 2,4 | 1,5 | 58 | 4,5 | 2,9 |
| 20 | 4,2 | 2,6 | 59 | 5,3 | 3,4 |
| 21 | 2,2 | 1,9 | 60 | 1,9 | 1,3 |
| 22 | 1,8 | 1,5 | 61 | 1,9 | 1,3 |
| 23 | 0,9 | 0,6 | 62 | 7,9 | 5,5 |
| 24 | 2,5 | 1,5 | 63 | 9,0 | 5,7 |
| 25 | 11,5 | 8,0 | 64 | 5,0 | 3,4 |
| 26 | 7,9 | 5,2 | 65 | 12,3 | 8,2 |
| 27 | 4,6 | 3,2 | 66 | 5,9 | 4,4 |
| 28 | 4,6 | 3,2 | 67 | 4,1 | 3,5 |
| 29 | 4,7 | 3,3 | 68 | 4,5 | 2,8 |
| 30 | 5,5 | 3,5 | 69 | 5,3 | 3,6 |
| 31 | 2,1 | 1,3 | 70 | 6,8 | 4,8 |
| 32 | 6,1 | 3,8 | 71 | 2,4 | 1,8 |
| 33 | 3,1 | 1,9 | 72 | 5,3 | 3,6 |
| 34 | 4,6 | 2,8 | 73 | 5,4 | 3,7 |
| 35 | 3,9 | 3,2 | 74 | 2,4 | 1,8 |
| 36 | 2,7 | 2,0 | 75 | 2,0 | 1,4 |
| 37 | 6,4 | 4,1 | 76 | 6,7 | 4,4 |
| 38 | 4,9 | 3,3 | 77 | 10,1 | 6,9 |
| 39 | 5,4 | 3,4 | 78 | 2,8 | 1,8 |

Tabela C.2 – Solução do modelo de PL, de fase, para o caso 4

| Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|----------------|-----------------|------|------------|------------|----------------|-----------------|
| 1 | 1,0 | 0,0500 | 0,2243 | 0,3221 | 40 | 1,0 | 0,0500 | 0,2914 | 3,2566 |
| 2 | 1,0 | 0,0500 | 0,2243 | 0,3221 | 41 | 0,8 | 0,1347 | 0,4695 | 0,5853 |
| 3 | 1,0 | 0,1070 | 0,4685 | 0,5769 | 42 | 0,7 | 0,0500 | 0,2537 | 0,3181 |
| 4 | 1,0 | 0,0500 | 0,3728 | 0,6731 | 43 | 0,8 | 0,0500 | 0,2424 | 0,3470 |
| 5 | 1,0 | 0,0500 | 0,3728 | 0,6731 | 44 | 0,8 | 0,2127 | 0,6961 | 0,7863 |
| 6 | 0,8 | 0,0500 | 0,2706 | 0,3774 | 45 | 0,9 | 0,0548 | 0,2211 | 0,2701 |
| 7 | 0,8 | 0,0500 | 0,2718 | 0,3795 | 46 | 0,9 | 0,2362 | 0,6847 | 0,7582 |
| 8 | 0,7 | 0,0500 | 0,2403 | 0,3073 | 47 | 0,9 | 0,0616 | 0,2591 | 0,3008 |
| 9 | 0,9 | 0,0500 | 0,3345 | 0,5001 | 48 | 0,9 | 0,1768 | 0,5949 | 0,6599 |
| 10 | 1,0 | 0,1347 | 0,4557 | 0,5204 | 49 | 0,8 | 0,1151 | 0,4600 | 0,5650 |
| 11 | 0,8 | 0,0500 | 0,1969 | 0,2292 | 50 | 0,9 | 0,1998 | 0,5254 | 0,5636 |
| 12 | 0,7 | 0,1143 | 0,4095 | 0,4605 | 51 | 0,9 | 0,1536 | 0,4949 | 0,5379 |
| 13 | 0,9 | 0,0939 | 0,2852 | 0,3174 | 52 | 0,9 | 0,1157 | 0,3954 | 0,4371 |
| 14 | 0,8 | 0,0500 | 0,3556 | 0,8076 | 53 | 1,0 | 0,2469 | 0,6467 | 0,6984 |
| 15 | 1,0 | 0,0906 | 0,3319 | 0,3738 | 54 | 0,9 | 0,0856 | 0,3262 | 0,3805 |
| 16 | 1,0 | 0,0688 | 0,2121 | 0,2351 | 55 | 0,8 | 0,1589 | 0,5086 | 0,5715 |
| 17 | 0,8 | 0,0687 | 0,2082 | 0,2325 | 56 | 0,9 | 0,0959 | 0,3677 | 0,4261 |
| 18 | 0,9 | 0,0500 | 0,4763 | - | 57 | 0,7 | 0,1795 | 0,5251 | 0,5849 |
| 19 | 0,9 | 0,0500 | 0,3649 | 0,6885 | 58 | 0,9 | 0,0902 | 0,3891 | 0,4568 |
| 20 | 0,9 | 0,0500 | 0,2248 | 0,3391 | 59 | 0,9 | 0,1318 | 0,5116 | 0,5936 |
| 21 | 0,9 | 0,0500 | 0 | 0,4752 | 60 | 0,9 | 0,0500 | 0,4945 | - |
| 22 | 1,0 | 0,0500 | 0 | 0,8504 | 61 | 0,9 | 0,0500 | 0,4945 | - |
| 23 | 0,9 | 0,0500 | 0 | - | 62 | 1,0 | 0,1297 | 0,4325 | 0,4739 |
| 24 | 0,9 | 0,0500 | 0 | - | 63 | 1,0 | 0,1648 | 0,5157 | 0,5794 |
| 25 | 0,9 | 0,1287 | 0,3455 | 0,3760 | 64 | 0,8 | 0,1390 | 0,5264 | 0,6010 |
| 26 | 1,0 | 0,1894 | 0,6290 | 0,7152 | 65 | 0,9 | 0,1625 | 0,4240 | 0,4578 |
| 27 | 0,8 | 0,1189 | 0,4730 | 0,6160 | 66 | 0,9 | 0,1484 | 0,5440 | 0,6080 |
| 28 | 0,8 | 0,1189 | 0,4730 | 0,6160 | 67 | 0,9 | 0,1270 | 0 | 0,6441 |
| 29 | 0,8 | 0,1018 | 0,3968 | 0,5052 | 68 | 0,9 | 0,0932 | 0 | 0,4432 |
| 30 | 0,8 | 0,0620 | 0,2207 | 0,2459 | 69 | 1,0 | 0,0575 | 0,2393 | 0,2879 |
| 31 | 0,8 | 0,0500 | 0,3662 | 0,9277 | 70 | 0,9 | 0,0766 | 0,2600 | 0,2976 |
| 32 | 0,9 | 0,0872 | 0,3157 | 0,3550 | 71 | 1,0 | 0,0500 | 0,4096 | - |
| 33 | 0,8 | 0,0500 | 0,2563 | 0,3610 | 72 | 0,8 | 0,0520 | 0,1899 | 0,2178 |
| 34 | 0,9 | 0,0950 | 0,4052 | 0,4581 | 73 | 1,0 | 0,0500 | 0,2053 | 0,2423 |
| 35 | 0,9 | 0,0921 | 0 | 0,4881 | 74 | 1,0 | 0,0500 | 0,3982 | - |
| 36 | 0,9 | 0,0690 | 0 | 0,5186 | 75 | 0,9 | 0,0500 | 0,4633 | - |
| 37 | 0,9 | 0,1766 | 0,6196 | 0,7127 | 76 | 0,7 | 0,1460 | 0,4442 | 0,4962 |
| 38 | 0,7 | 0,1492 | 0,5264 | 0,6056 | 77 | 1,0 | 0,1192 | 0,3529 | 0,3832 |
| 39 | 0,9 | 0,0840 | 0,3244 | 0,3865 | 78 | 1,0 | 0,0500 | 0,3376 | - |
| FO | | | | 63,6276 | | | | | |

Tabela C.3 – Solução do modelo 1 de PIB, de fase, para o caso 4

| Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51F} | MT_{51F} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|----------------|-----------------|------|------------|------------|----------------|-----------------|
| 1 | 1,0 | 0,05 | 0,2243 | 0,3221 | 40 | 1,0 | 0,05 | 0,2914 | 3,2566 |
| 2 | 1,0 | 0,05 | 0,2243 | 0,3221 | 41 | 0,8 | 0,25 | 0,8712 | 1,0861 |
| 3 | 1,0 | 0,15 | 0,6569 | 0,8088 | 42 | 0,7 | 0,05 | 0,2537 | 0,3181 |
| 4 | 1,0 | 0,05 | 0,3728 | 0,6731 | 43 | 0,8 | 0,05 | 0,2424 | 0,3470 |
| 5 | 1,0 | 0,05 | 0,3728 | 0,6731 | 44 | 0,8 | 0,35 | 1,1454 | 1,2939 |
| 6 | 0,8 | 0,10 | 0,5412 | 0,7549 | 45 | 0,9 | 0,10 | 0,4032 | 0,4925 |
| 7 | 0,8 | 0,10 | 0,5435 | 0,7591 | 46 | 0,9 | 0,40 | 1,1593 | 1,2838 |
| 8 | 0,7 | 0,05 | 0,2403 | 0,3073 | 47 | 0,9 | 0,10 | 0,4206 | 0,4883 |
| 9 | 0,9 | 0,05 | 0,3345 | 0,5001 | 48 | 0,9 | 0,30 | 1,0094 | 1,1197 |
| 10 | 1,0 | 0,25 | 0,8457 | 0,9657 | 49 | 0,8 | 0,20 | 0,7994 | 0,9819 |
| 11 | 0,8 | 0,05 | 0,1969 | 0,2292 | 50 | 0,9 | 0,30 | 0,7889 | 0,8462 |
| 12 | 0,7 | 0,20 | 0,7164 | 0,8057 | 51 | 0,9 | 0,25 | 0,8052 | 0,8752 |
| 13 | 0,9 | 0,10 | 0,3038 | 0,3381 | 52 | 0,9 | 0,20 | 0,6834 | 0,7553 |
| 14 | 0,8 | 0,05 | 0,3556 | 0,8076 | 53 | 1,0 | 0,40 | 1,0476 | 1,1314 |
| 15 | 1,0 | 0,15 | 0,5495 | 0,6188 | 54 | 0,9 | 0,15 | 0,5716 | 0,6667 |
| 16 | 1,0 | 0,10 | 0,3085 | 0,3420 | 55 | 0,8 | 0,25 | 0,8002 | 0,8992 |
| 17 | 0,8 | 0,10 | 0,3029 | 0,3383 | 56 | 0,9 | 0,15 | 0,5750 | 0,6663 |
| 18 | 0,9 | 0,05 | 0,4763 | - | 57 | 0,7 | 0,25 | 0,7312 | 0,8145 |
| 19 | 0,9 | 0,05 | 0,3649 | 0,6885 | 58 | 0,9 | 0,15 | 0,6468 | 0,7594 |
| 20 | 0,9 | 0,05 | 0,2248 | 0,3391 | 59 | 0,9 | 0,15 | 0,5824 | 0,6757 |
| 21 | 0,9 | 0,10 | 0 | 0,9502 | 60 | 0,9 | 0,05 | 0,4945 | - |
| 22 | 1,0 | 0,05 | 0 | 0,8504 | 61 | 0,9 | 0,05 | 0,4945 | - |
| 23 | 0,9 | 0,05 | 0 | - | 62 | 1,0 | 0,20 | 0,6668 | 0,7306 |
| 24 | 0,9 | 0,05 | 0 | - | 63 | 1,0 | 0,25 | 0,7823 | 0,8789 |
| 25 | 0,9 | 0,20 | 0,5369 | 0,5843 | 64 | 0,8 | 0,20 | 0,7574 | 0,8647 |
| 26 | 1,0 | 0,30 | 0,9963 | 1,1328 | 65 | 0,9 | 0,25 | 0,6522 | 0,7041 |
| 27 | 0,8 | 0,20 | 0,7956 | 1,0360 | 66 | 0,9 | 0,20 | 0,7333 | 0,8196 |
| 28 | 0,8 | 0,20 | 0,7956 | 1,0360 | 67 | 0,9 | 0,20 | 0 | 1,0147 |
| 29 | 0,8 | 0,15 | 0,5849 | 0,7446 | 68 | 0,9 | 0,10 | 0 | 0,4755 |
| 30 | 0,8 | 0,10 | 0,3562 | 0,3968 | 69 | 1,0 | 0,10 | 0,4161 | 0,5007 |
| 31 | 0,8 | 0,05 | 0,3662 | 0,9277 | 70 | 0,9 | 0,15 | 0,5093 | 0,5828 |
| 32 | 0,9 | 0,15 | 0,5429 | 0,6105 | 71 | 1,0 | 0,05 | 0,4096 | - |
| 33 | 0,8 | 0,05 | 0,2563 | 0,3610 | 72 | 0,8 | 0,10 | 0,3655 | 0,4192 |
| 34 | 0,9 | 0,15 | 0,6396 | 0,7230 | 73 | 1,0 | 0,05 | 0,2053 | 0,2423 |
| 35 | 0,9 | 0,15 | 0 | 0,7946 | 74 | 1,0 | 0,05 | 0,3982 | - |
| 36 | 0,9 | 0,10 | 0 | 0,7521 | 75 | 0,9 | 0,05 | 0,4633 | - |
| 37 | 0,9 | 0,30 | 1,0527 | 1,2110 | 76 | 0,7 | 0,25 | 0,7606 | 0,8495 |
| 38 | 0,7 | 0,25 | 0,8823 | 1,0149 | 77 | 1,0 | 0,15 | 0,4441 | 0,4823 |
| 39 | 0,9 | 0,15 | 0,5793 | 0,6901 | 78 | 1,0 | 0,05 | 0,3376 | - |
| FO | 90,9918 | | | | | | | | |

Tabela C.6 – Solução do modelo 1 de PIB, de neutro, para o caso 4

| Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|----------------|-----------------|------|------------|------------|----------------|-----------------|
| 1 | 0,6 | 0,05 | 0,2229 | 0,2808 | 40 | 0,4 | 0,05 | 0,2044 | 0,4841 |
| 2 | 0,6 | 0,05 | 0,2229 | 0,2808 | 41 | 0,5 | 0,30 | 1,0279 | 1,1615 |
| 3 | 0,6 | 0,25 | 1,0861 | 1,1962 | 42 | 0,3 | 0,05 | 0,1966 | 0,2124 |
| 4 | 0,4 | 0,05 | 0,2566 | 0,3207 | 43 | 0,3 | 0,05 | 0,1742 | 0,2053 |
| 5 | 0,4 | 0,05 | 0,2566 | 0,3207 | 44 | 0,5 | 0,35 | 1,1414 | 1,1957 |
| 6 | 0,5 | 0,15 | 0,8264 | 0,9932 | 45 | 0,4 | 0,20 | 0,6596 | 0,7171 |
| 7 | 0,5 | 0,10 | 0,5535 | 0,6667 | 46 | 0,6 | 0,35 | 1,0339 | 1,0702 |
| 8 | 0,5 | 0,05 | 0,2726 | 0,3138 | 47 | 0,4 | 0,20 | 0,6799 | 0,7101 |
| 9 | 0,3 | 0,10 | 0,4224 | 0,4799 | 48 | 0,4 | 0,35 | 0,9917 | 1,0145 |
| 10 | 0,6 | 0,30 | 1,0109 | 1,0655 | 49 | 0,3 | 0,30 | 0,9062 | 0,9830 |
| 11 | 0,3 | 0,10 | 0,3064 | 0,3207 | 50 | 0,6 | 0,45 | 1,1991 | 1,2131 |
| 12 | 0,3 | 0,30 | 0,9039 | 0,9296 | 51 | 0,4 | 0,35 | 0,9650 | 0,9738 |
| 13 | 0,6 | 0,15 | 0,4724 | 0,4912 | 52 | 0,4 | 0,40 | 1,1547 | 1,1776 |
| 14 | 0,3 | 0,05 | 0,2342 | 0,3189 | 53 | 0,7 | 0,40 | 1,0942 | 1,1143 |
| 15 | 0,4 | 0,15 | 0,4437 | 0,4569 | 54 | 0,4 | 0,35 | 1,1052 | 1,1623 |
| 16 | 0,5 | 0,10 | 0,2808 | 0,2894 | 55 | 0,5 | 0,50 | 1,5954 | 1,6663 |
| 17 | 0,5 | 0,30 | 0,9141 | 0,9530 | 56 | 0,3 | 0,30 | 0,8404 | 0,8747 |
| 18 | 0,6 | 0,05 | 0,5369 | 0,0000 | 57 | 0,5 | 0,65 | 2,0146 | 2,0992 |
| 19 | 0,3 | 0,05 | 0,2206 | 0,2733 | 58 | 0,3 | 0,30 | 0,9178 | 0,9575 |
| 20 | 0,6 | 0,05 | 0,2374 | 0,3175 | 59 | 0,4 | 0,75 | 2,4019 | 2,5178 |
| 21 | 0,6 | 0,15 | 0 | - | 60 | 0,4 | 0,05 | 0,3026 | - |
| 22 | 0,7 | 0,10 | 0 | 0,9761 | 61 | 0,4 | 0,05 | 0,3026 | - |
| 23 | 0,4 | 0,05 | 0 | 0,9172 | 62 | 0,5 | 0,30 | 0,8581 | 0,8702 |
| 24 | 0,4 | 0,05 | 0 | - | 63 | 0,7 | 0,35 | 1,1475 | 1,1978 |
| 25 | 0,7 | 0,25 | 0,7030 | 0,7233 | 64 | 0,4 | 0,65 | 2,1079 | 2,2007 |
| 26 | 0,8 | 0,35 | 1,2873 | 1,3682 | 65 | 0,6 | 0,40 | 1,0453 | 1,0588 |
| 27 | 0,6 | 0,20 | 0,8328 | 0,9801 | 66 | 0,4 | 0,65 | 1,8537 | 1,9074 |
| 28 | 0,6 | 0,20 | 0,8328 | 0,9801 | 67 | 0,6 | 0,40 | 0 | 1,5689 |
| 29 | 0,6 | 0,15 | 0,6126 | 0,7080 | 68 | 0,6 | 0,25 | 0 | 1,1253 |
| 30 | 0,3 | 0,10 | 0,2798 | 0,2861 | 69 | 0,7 | 0,10 | 0,4229 | 0,4621 |
| 31 | 0,3 | 0,05 | 0,2380 | 0,3339 | 70 | 0,7 | 0,10 | 0,3605 | 0,3839 |
| 32 | 0,4 | 0,30 | 0,9166 | 0,9454 | 71 | 0,5 | 0,05 | 0,2730 | - |
| 33 | 0,3 | 0,05 | 0,1864 | 0,2144 | 72 | 0,4 | 0,10 | 0,3137 | 0,3277 |
| 34 | 0,2 | 0,40 | 1,0371 | 1,0527 | 73 | 0,4 | 0,10 | 0,3095 | 0,3248 |
| 35 | 0,6 | 0,20 | 0 | 0,8287 | 74 | 0,5 | 0,05 | 0,2722 | - |
| 36 | 0,3 | 0,25 | 0 | 0,9262 | 75 | 0,4 | 0,05 | 0,2930 | 2,6024 |
| 37 | 0,6 | 0,25 | 0,8939 | 0,9506 | 76 | 0,5 | 0,30 | 0,9539 | 0,9973 |
| 38 | 0,5 | 0,30 | 1,1066 | 1,1781 | 77 | 0,6 | 0,10 | 0,2812 | 0,2854 |
| 39 | 0,7 | 0,15 | 0,6561 | 0,7169 | 78 | 0,5 | 0,05 | 0,2798 | 1,6236 |
| FO | | | | 114,6606 | | | | | |

Tabela C.7 – Solução do modelo de PNL, de neutro, para o caso 4

| Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|----------------|-----------------|------|------------|------------|----------------|-----------------|
| 1 | 0,6000 | 0,0500 | 0,2229 | 0,2808 | 40 | 0,4000 | 0,0500 | 0,2044 | 0,4841 |
| 2 | 0,6000 | 0,0500 | 0,2229 | 0,2808 | 41 | 0,5000 | 0,0859 | 0,2945 | 0,3327 |
| 3 | 1,2312 | 0,0500 | 0,4002 | 0,4805 | 42 | 0,3000 | 0,0500 | 0,1966 | 0,2124 |
| 4 | 0,4000 | 0,0500 | 0,2566 | 0,3207 | 43 | 0,3000 | 0,0500 | 0,1742 | 0,2053 |
| 5 | 0,4000 | 0,0500 | 0,2566 | 0,3207 | 44 | 1,5933 | 0,0500 | 0,3678 | 0,4086 |
| 6 | 0,5000 | 0,0500 | 0,2755 | 0,3311 | 45 | 0,4000 | 0,0558 | 0,1840 | 0,2000 |
| 7 | 0,5000 | 0,0500 | 0,2768 | 0,3333 | 46 | 2,6169 | 0,0500 | 0,4120 | 0,4537 |
| 8 | 0,5000 | 0,0500 | 0,2726 | 0,3138 | 47 | 0,6478 | 0,0500 | 0,2244 | 0,2376 |
| 9 | 0,3000 | 0,0601 | 0,2537 | 0,2882 | 48 | 0,9000 | 0,1052 | 0,4530 | 0,4687 |
| 10 | 1,6690 | 0,0500 | 0,3422 | 0,3811 | 49 | 0,6000 | 0,0826 | 0,3622 | 0,4078 |
| 11 | 0,3000 | 0,0624 | 0,1911 | 0,2000 | 50 | 2,6623 | 0,0500 | 0,3236 | 0,3326 |
| 12 | 0,4000 | 0,1235 | 0,4274 | 0,4414 | 51 | 1,5567 | 0,0500 | 0,3097 | 0,3159 |
| 13 | 1,1546 | 0,0500 | 0,2268 | 0,2398 | 52 | 1,1139 | 0,0500 | 0,2570 | 0,2660 |
| 14 | 0,3000 | 0,0500 | 0,2342 | 0,3189 | 53 | 3,6098 | 0,0500 | 0,4058 | 0,4279 |
| 15 | 0,4000 | 0,1091 | 0,3227 | 0,3323 | 54 | 0,8411 | 0,0500 | 0,2420 | 0,2614 |
| 16 | 0,9000 | 0,0516 | 0,1922 | 0,2000 | 55 | 1,5690 | 0,0500 | 0,3453 | 0,3795 |
| 17 | 0,6000 | 0,0752 | 0,2497 | 0,2613 | 56 | 0,8666 | 0,0500 | 0,2506 | 0,2691 |
| 18 | 0,6000 | 0,0500 | 0,5369 | - | 57 | 1,6000 | 0,1112 | 0,7367 | 0,8044 |
| 19 | 0,3000 | 0,0500 | 0,2206 | 0,2733 | 58 | 0,7950 | 0,0500 | 0,2737 | 0,2951 |
| 20 | 0,6000 | 0,0500 | 0,2374 | 0,3175 | 59 | 1,5000 | 0,1745 | 1,4817 | 1,6816 |
| 21 | 0,6000 | 0,0679 | 0 | 0,4136 | 60 | 0,4000 | 0,0500 | 0,3026 | - |
| 22 | 0,7000 | 0,0500 | 0 | 0,4881 | 61 | 0,4000 | 0,0500 | 0,3026 | - |
| 23 | 0,4000 | 0,0500 | 0 | 0,9172 | 62 | 0,5000 | 0,1083 | 0,3099 | 0,3143 |
| 24 | 0,4000 | 0,0500 | 0 | - | 63 | 2,7345 | 0,0500 | 0,4772 | 0,5416 |
| 25 | 1,7706 | 0,0500 | 0,2296 | 0,2405 | 64 | 1,3000 | 0,1027 | 0,7622 | 0,8415 |
| 26 | 1,9981 | 0,0500 | 0,3639 | 0,4112 | 65 | 0,6000 | 0,2575 | 0,6729 | 0,6816 |
| 27 | 0,6000 | 0,0904 | 0,3765 | 0,4431 | 66 | 1,9088 | 0,0500 | 0,4165 | 0,4525 |
| 28 | 0,6000 | 0,0904 | 0,3765 | 0,4431 | 67 | 0,8000 | 0,0892 | 0 | 0,4196 |
| 29 | 0,8379 | 0,0500 | 0,2555 | 0,3069 | 68 | 0,9000 | 0,1257 | 0 | 0,7729 |
| 30 | 0,5855 | 0,0500 | 0,1940 | 0,2000 | 69 | 0,7516 | 0,0500 | 0,2213 | 0,2428 |
| 31 | 0,3000 | 0,0500 | 0,2380 | 0,3339 | 70 | 0,9756 | 0,0500 | 0,2190 | 0,2364 |
| 32 | 0,4000 | 0,1098 | 0,3355 | 0,3460 | 71 | 0,5000 | 0,0500 | 0,2730 | - |
| 33 | 0,3000 | 0,0500 | 0,1864 | 0,2144 | 72 | 0,4000 | 0,0610 | 0,1915 | 0,2000 |
| 34 | 0,2000 | 0,1784 | 0,4625 | 0,4694 | 73 | 0,4000 | 0,0616 | 0,1906 | 0,2000 |
| 35 | 0,7000 | 0,0556 | 0 | 0,2542 | 74 | 0,5000 | 0,0500 | 0,2722 | - |
| 36 | 0,5000 | 0,0650 | 0 | 0,3343 | 75 | 0,4000 | 0,0500 | 0,2930 | 2,6024 |
| 37 | 1,2904 | 0,0500 | 0,2997 | 0,3323 | 76 | 1,0933 | 0,0500 | 0,2516 | 0,2699 |
| 38 | 0,7000 | 0,0572 | 0,2585 | 0,2791 | 77 | 1,1777 | 0,0500 | 0,1959 | 0,2000 |
| 39 | 0,7000 | 0,0500 | 0,2187 | 0,2390 | 78 | 0,5000 | 0,0500 | 0,2798 | 1,6236 |
| FO | 53,1705 | | | | | | | | |

Tabela C.8 – Solução do modelo 2 de PIB, de neutro, para o caso 4

| Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) | Relé | MC_{51N} | MT_{51N} | $t_{85\%}$ (s) | $t_{100\%}$ (s) |
|------|------------|------------|----------------|-----------------|------|------------|------------|----------------|-----------------|
| 1 | 0,6 | 0,05 | 0,2229 | 0,2808 | 40 | 0,4 | 0,05 | 0,2044 | 0,4841 |
| 2 | 0,6 | 0,05 | 0,2229 | 0,2808 | 41 | 0,5 | 0,10 | 0,3426 | 0,3872 |
| 3 | 1,5 | 0,05 | 0,5193 | 0,6623 | 42 | 0,3 | 0,05 | 0,1966 | 0,2124 |
| 4 | 0,4 | 0,05 | 0,2566 | 0,3207 | 43 | 0,3 | 0,05 | 0,1742 | 0,2053 |
| 5 | 0,4 | 0,05 | 0,2566 | 0,3207 | 44 | 1,7 | 0,05 | 0,3952 | 0,4427 |
| 6 | 0,5 | 0,10 | 0,5509 | 0,6621 | 45 | 0,4 | 0,10 | 0,3298 | 0,3586 |
| 7 | 0,5 | 0,10 | 0,5535 | 0,6667 | 46 | 3,1 | 0,05 | 0,5165 | 0,5836 |
| 8 | 0,5 | 0,05 | 0,2726 | 0,3138 | 47 | 0,9 | 0,05 | 0,2865 | 0,3082 |
| 9 | 0,3 | 0,10 | 0,4224 | 0,4799 | 48 | 0,7 | 0,20 | 0,7421 | 0,7643 |
| 10 | 1,9 | 0,05 | 0,3930 | 0,4450 | 49 | 0,5 | 0,15 | 0,5881 | 0,6537 |
| 11 | 0,3 | 0,10 | 0,3064 | 0,3207 | 50 | 2,8 | 0,05 | 0,3397 | 0,3497 |
| 12 | 0,3 | 0,20 | 0,6026 | 0,6197 | 51 | 1,9 | 0,05 | 0,3776 | 0,3869 |
| 13 | 1,4 | 0,05 | 0,2602 | 0,2774 | 52 | 1,2 | 0,05 | 0,2723 | 0,2824 |
| 14 | 0,3 | 0,05 | 0,2342 | 0,3189 | 53 | 4,0 | 0,05 | 0,4616 | 0,4904 |
| 15 | 0,4 | 0,15 | 0,4437 | 0,4569 | 54 | 0,9 | 0,05 | 0,2542 | 0,2757 |
| 16 | 0,5 | 0,10 | 0,2808 | 0,2894 | 55 | 1,7 | 0,05 | 0,3756 | 0,4163 |
| 17 | 0,5 | 0,15 | 0,4571 | 0,4765 | 56 | 0,9 | 0,05 | 0,2577 | 0,2773 |
| 18 | 0,6 | 0,05 | 0,5369 | - | 57 | 1,5 | 0,15 | 0,9351 | 1,0157 |
| 19 | 0,3 | 0,05 | 0,2206 | 0,2733 | 58 | 0,9 | 0,05 | 0,3039 | 0,3305 |
| 20 | 0,6 | 0,05 | 0,2374 | 0,3175 | 59 | 1,5 | 0,20 | 1,6984 | 1,9275 |
| 21 | 0,6 | 0,10 | 0 | 0,6088 | 60 | 0,4 | 0,05 | 0,3026 | - |
| 22 | 0,7 | 0,05 | 0 | 0,4881 | 61 | 0,4 | 0,05 | 0,3026 | - |
| 23 | 0,4 | 0,05 | 0 | 0,9172 | 62 | 0,5 | 0,15 | 0,4290 | 0,4351 |
| 24 | 0,4 | 0,05 | 0 | - | 63 | 2,9 | 0,05 | 0,5194 | 0,5965 |
| 25 | 2,0 | 0,05 | 0,2502 | 0,2631 | 64 | 1,2 | 0,15 | 1,0244 | 1,1218 |
| 26 | 2,1 | 0,05 | 0,3842 | 0,4372 | 65 | 0,6 | 0,30 | 0,7840 | 0,7941 |
| 27 | 0,6 | 0,15 | 0,6246 | 0,7351 | 66 | 1,6 | 0,10 | 0,6862 | 0,7345 |
| 28 | 0,6 | 0,15 | 0,6246 | 0,7351 | 67 | 0,7 | 0,15 | 0 | 0,6461 |
| 29 | 0,9 | 0,05 | 0,2700 | 0,3279 | 68 | 0,9 | 0,15 | 0 | 0,9220 |
| 30 | 0,6 | 0,05 | 0,1968 | 0,2029 | 69 | 1,0 | 0,05 | 0,2718 | 0,3047 |
| 31 | 0,3 | 0,05 | 0,2380 | 0,3339 | 70 | 1,3 | 0,05 | 0,2687 | 0,2952 |
| 32 | 0,4 | 0,20 | 0,6111 | 0,6303 | 71 | 0,5 | 0,05 | 0,2730 | - |
| 33 | 0,3 | 0,05 | 0,1864 | 0,2144 | 72 | 0,4 | 0,10 | 0,3137 | 0,3277 |
| 34 | 0,2 | 0,30 | 0,7778 | 0,7895 | 73 | 0,4 | 0,10 | 0,3095 | 0,3248 |
| 35 | 0,6 | 0,10 | 0 | 0,4144 | 74 | 0,5 | 0,05 | 0,2722 | - |
| 36 | 0,5 | 0,10 | 0 | 0,5140 | 75 | 0,4 | 0,05 | 0,2930 | 2,6024 |
| 37 | 1,5 | 0,05 | 0,3451 | 0,3890 | 76 | 1,2 | 0,05 | 0,2702 | 0,2913 |
| 38 | 0,5 | 0,10 | 0,3689 | 0,3927 | 77 | 1,2 | 0,05 | 0,1981 | 0,2022 |
| 39 | 0,8 | 0,05 | 0,2393 | 0,2637 | 78 | 0,5 | 0,05 | 0,2798 | 1,6236 |
| FO | 66,0328 | | | | | | | | |

ANEXOS

Anexo 1. Dados do Sistema Teste 1

- Tensão base: 33 kV.
- Potência base: 100 MVA.
- Impedância equivalente de sequencia positiva e negativa da fonte: $j0,1$ p.u.
- Impedância equivalente de sequencia zero da fonte: $j0,3$ p.u.
- Impedância equivalente de sequencia positiva e negativa das linhas: $j0,2$ p.u.
- Impedância equivalente de sequencia zero das linhas: $j0,6$ p.u.
- Correntes das cargas: B2 – 350 A; B3 – 100 A; B4 – 100 A; B5 – 350 A; B6 – 350 A; B7 – 350 A; B8 – 100 A; B9 – 100 A.
- *RTC* dos TCs: 500-1 A.

Anexo 2. Dados do Sistema Teste 2

- Potência base: 100 MVA.

Tabela 1 – Dados das máquinas do ST2

| Máquina | Barra | Tipo de conexão | Impedância (p.u.) | | |
|---------|-------|-----------------|-------------------|-----------|-----------|
| | | | Seq. Pos. | Seq. Neg. | Seq. Zero |
| 1 | B1 | Yg | $j0,10$ | $j0,10$ | $j0,30$ |
| 2 | B2 | Yg | $j0,12$ | $j0,12$ | $j0,36$ |
| 3 | B5 | Yg | $j0,11$ | $j0,11$ | $j0,33$ |
| 4 | B11 | Yg | $j0,16$ | $j0,16$ | $j0,48$ |
| 5 | B13 | Yg | $j0,14$ | $j0,14$ | $j0,42$ |

Tabela 2 – Dados dos bancos de capacitores do ST2

| Banco | Barra | Tipo de conexão | Susceptância (p.u.) | | |
|-------|-------|-----------------|---------------------|-----------|-----------|
| | | | Seq. Pos. | Seq. Neg. | Seq. Zero |
| 1 | B10 | Yg | $j0,190$ | $j0,190$ | $j0,190$ |
| 2 | B24 | Yg | $j0,043$ | $j0,043$ | $j0,043$ |

Tabela 3 – Tensões base e cargas nas barras do ST2

| Barra | Tensão (kV) | P (p.u.) | Q (p.u.) |
|-------|-------------|----------|----------|
| B1 | 132 | 0 | 0 |
| B2 | 132 | 21,7 | 12,7 |
| B3 | 132 | 2,4 | 1,2 |
| B4 | 132 | 7,6 | 1,6 |
| B5 | 132 | 94,2 | 19 |
| B6 | 132 | 0 | 0 |
| B7 | 132 | 22,8 | 10,9 |
| B8 | 132 | 30 | 30 |
| B9 | 33 | 0 | 0 |
| B10 | 33 | 5,8 | 2 |
| B11 | 33 | 0 | 0 |
| B12 | 33 | 11,2 | 7,5 |
| B13 | 33 | 0 | 0 |
| B14 | 33 | 6,2 | 1,6 |
| B15 | 33 | 8,2 | 2,5 |
| B16 | 33 | 3,5 | 1,8 |
| B17 | 33 | 9 | 5,8 |
| B18 | 33 | 3,2 | 0,9 |
| B19 | 33 | 9,5 | 3,4 |
| B20 | 33 | 2,2 | 0,7 |
| B21 | 33 | 17,5 | 11,2 |
| B22 | 33 | 0 | 0 |
| B23 | 33 | 3,2 | 1,6 |
| B24 | 33 | 8,7 | 6,7 |
| B25 | 33 | 0 | 0 |
| B26 | 33 | 3,5 | 2,3 |
| B27 | 33 | 0 | 0 |
| B28 | 132 | 0 | 0 |
| B29 | 33 | 2,4 | 0,9 |
| B30 | 33 | 10,6 | 1,9 |

Tabela 4 – Dados dos transformadores do ST2

| Transformador | Barra origem | Barra destino | Tipo de conexão | Impedância (p.u.) | | |
|---------------|--------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------|-----------|
| | | | | Seq. Pos. | Seq. Neg. | Seq. Zero |
| 1 | B6 | B9 | Yg - Yg | j0,2080 | j0,2080 | j0,2080 |
| 2 | B6 | B10 | Yg - Yg | j0,5560 | j0,5560 | j0,5560 |
| 3 | B4 | B12 | Yg - Yg | j0,2560 | j0,2560 | j0,2560 |
| 4 | B28 | B27 | Yg - Yg | j0,3960 | j0,3960 | j0,3960 |

Tabela 5 – Dados das linhas do ST2

| Linha | Barra origem | Barra destino | Sequência Positiva (p.u.) ^{1,2} | | |
|-----------------|--------------|---------------|--|--------|--------|
| | | | R | X | B |
| 1 | B1 | B2 | 0,0192 | 0,0575 | 0,0528 |
| 2 ³ | B1 | B2 | 0,0192 | 0,0575 | 0,0528 |
| 3 | B1 | B3 | 0,0452 | 0,1652 | 0,0408 |
| 4 | B2 | B4 | 0,0570 | 0,1737 | 0,0368 |
| 5 | B3 | B4 | 0,0132 | 0,0379 | 0,0084 |
| 6 | B2 | B5 | 0,0472 | 0,1983 | 0,0418 |
| 7 | B2 | B6 | 0,0581 | 0,1763 | 0,0374 |
| 8 | B4 | B6 | 0,0119 | 0,0414 | 0,0090 |
| 9 | B5 | B7 | 0,0460 | 0,1160 | 0,0204 |
| 10 | B6 | B7 | 0,0267 | 0,0820 | 0,0170 |
| 11 | B6 | B8 | 0,0120 | 0,0420 | 0,0090 |
| 12 | B9 | B11 | 0,0000 | 0,2080 | 0,0000 |
| 13 | B9 | B10 | 0,0000 | 0,1100 | 0,0000 |
| 14 | B12 | B13 | 0,0000 | 0,1400 | 0,0000 |
| 15 | B12 | B14 | 0,1231 | 0,2559 | 0,0000 |
| 16 | B12 | B15 | 0,0662 | 0,1304 | 0,0000 |
| 17 | B12 | B16 | 0,0945 | 0,1987 | 0,0000 |
| 18 | B14 | B15 | 0,2210 | 0,1997 | 0,0000 |
| 19 | B16 | B17 | 0,0524 | 0,1923 | 0,0000 |
| 20 | B15 | B18 | 0,1073 | 0,2185 | 0,0000 |
| 21 | B18 | B19 | 0,0639 | 0,1292 | 0,0000 |
| 22 | B19 | B20 | 0,0340 | 0,0680 | 0,0000 |
| 23 | B10 | B20 | 0,0936 | 0,2090 | 0,0000 |
| 24 | B10 | B17 | 0,0324 | 0,0845 | 0,0000 |
| 25 | B10 | B21 | 0,0348 | 0,0749 | 0,0000 |
| 26 ³ | B10 | B21 | 0,0348 | 0,0749 | 0,0000 |
| 27 | B10 | B22 | 0,0727 | 0,1499 | 0,0000 |
| 28 | B21 | B22 | 0,0116 | 0,0236 | 0,0000 |
| 29 | B15 | B23 | 0,1000 | 0,2020 | 0,0000 |
| 30 | B22 | B24 | 0,1150 | 0,1790 | 0,0000 |
| 31 | B23 | B24 | 0,1320 | 0,2700 | 0,0000 |
| 32 | B24 | B25 | 0,1885 | 0,3292 | 0,0000 |
| 33 | B25 | B26 | 0,2544 | 0,3800 | 0,0000 |
| 34 | B25 | B27 | 0,1093 | 0,2087 | 0,0000 |
| 35 | B27 | B29 | 0,2198 | 0,4153 | 0,0000 |
| 36 | B27 | B30 | 0,3202 | 0,6027 | 0,0000 |
| 37 | B29 | B30 | 0,2399 | 0,4533 | 0,0000 |
| 38 | B8 | B28 | 0,0636 | 0,2000 | 0,0428 |
| 39 | B6 | B28 | 0,0169 | 0,0599 | 0,0130 |

¹ Impedância de sequência positiva igual a de sequência negativa.² Impedância de sequência zero igual a três vezes a de sequência positiva.³ Linha em paralelo.