

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

Lincoln Társo Silva Oliveira

**Modelagem e implementação de um relé de sobrecorrente em
ambiente Matlab-Simulink para simulações de sistemas
elétricos no domínio do tempo**

Uberlândia
2019

Lincoln Társo Silva Oliveira

**Modelagem e implementação de um relé de sobrecorrente em
ambiente Matlab-Simulink para simulações de sistemas
elétricos no domínio do tempo**

Trabalho apresentado como requisito parcial
de avaliação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Uberlândia.

Orientador: José Rubens Macedo Junior

Assinatura do orientador

Uberlândia
2019

Lincoln Tárσιο Silva Oliveira

**Modelagem e implementação de um relé de sobrecorrente em
ambiente Matlab-Simulink para simulações de sistemas
elétricos no domínio do tempo**

Trabalho apresentado como requisito parcial
de avaliação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Uberlândia.

Banca examinadora

Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim

Prof. Dr. Wellington Maycon Santos Bernardes

Uberlândia
2019

Dedico este trabalho aos meus pais José Alberto e Tânia Beatriz, por tudo aquilo que fizeram para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José Alberto e Tânia Beatriz, por todo o carinho, apoio e atenção;

Ao Prof. Dr. José Rubens, pela confiança e pelos ensinamentos, não só de como ser um bom profissional, mas de como ser uma pessoa melhor, os quais levarei para toda a vida;

Aos meus companheiros, Diogo Nascimento, Gabriel Masete e João Victor, por todos esses anos juntos e por todos os dias em que vocês foram mais que uma família para mim.

RESUMO

Para fins de pesquisa e/ou didáticos, até o presente momento não existem muitos modelos prontos e de fácil aplicação de Relés que possam representar com fidelidade suas características. Assim sendo, o objetivo deste trabalho, foi a modelagem e implementação do Relé 50/51 no ambiente do software Matlab-Simulink®, desenvolvido pela companhia MathWorks®, o qual trata-se de uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos que, além disso, permite a criação de novos modelos além daqueles já existentes, abrindo um amplo leque de possibilidades.

Palavras-chave: Proteção de Sistemas Elétricos, Relés.

ABSTRACT

For researching and/or didactic purposes, there are not a lot of finished relay models that are easily applicable and that can represent its characteristics with fidelity. Thus, the objective of this work was the modelling and implementation of the 50/51 relay in the Matlab-Simulink[®], software environment, developed by the company MathWorks[®], which is a tool for modelling, simulating and dynamic systems analysis that, more than that, permits the creation of new models apart from those that already exist, opening a broad range of possibilities.

Keywords: Power-system protection, Relays.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de relés com funções de sobrecorrente.....	13
Figura 2 - Temporização de um relé 50/51.....	14
Figura 3 - Exemplo de Circuito	19
Figura 4 - Coordenograma	20
Figura 5 - Bloco MATLAB Function	22
Figura 6 - Interface de edição Matlab®	23
Figura 7 - Diagrama de blocos do modelo proposto.....	23
Figura 8 - Interface de configuração da MASK.....	24
Figura 9 - Versão final do relé	25
Figura 10 - Interface responsável pela configuração do relé.....	26
Figura 11 - Bloco para obtenção do coordenograma	28
Figura 12 - Interface do bloco para obtenção do coordenograma.....	28
Figura 13 - Coordenograma	28
Figura 14 - Circuito utilizado nos testes do Relé	29
Figura 15 - Resultado do primeiro evento simulado	31
Figura 16 - Resultado do segundo evento simulado	32
Figura 17 - Informações fornecidas pelo Relé após a simulação	32
Figura 18 - Resultado do terceiro evento simulado	33
Figura 19 - Informações fornecidas pelo Relé após a simulação	33
Figura 20 - Resultado do quarto evento simulado.....	34
Figura 21 - Informações fornecidas pelo Relé após a simulação	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das constantes da equação 2.....	16
Tabela 2 - Valores das constantes da equação 3.....	17
Tabela 3 - Saída da porta Flag	25
Tabela 4 - Parâmetros do relé.....	27
Tabela 5 - Características dos eventos	30
Tabela 6 - Configuração do Relé.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampere

ANSI - *American National Standards Institute*

HZ - Hertz

IEC - *International Electrotechnical Commission*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

s - Segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
2.1	RELÉ DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEO (ANSI 50)	14
2.2	RELÉ DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADO (ANSI 51)	15
2.2.1	TEMPO DEFINIDO.....	15
2.2.2	TEMPO INVERSO.....	15
3	COORDENAÇÃO DE RELÉS 50/51	18
3.1	PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	18
3.2	COORDENAÇÃO ENTRE DOIS RELÉS 50/51	18
4	MODELAGEM DE RELÉ 50/51 NO SOFTWARE MATLAB-SIMULINK® ..	22
4.1	BLOCO MATLAB FUNCTION.....	22
4.2	MASK EDITOR: RELAY	23
4.3	MODELO PRONTO: RELAY 50/51.....	24
4.4	MANUAL DE CONFIGURAÇÃO DO MODELO	26
4.5	COORDENOGRAMA.....	27
4.6	TESTES REALIZADOS.....	29
4.6.1	PRIMEIRO EVENTO	31
4.6.2	SEGUNDO EVENTO.....	31
4.6.3	TERCEIRO EVENTO	32
4.6.4	QUARTO EVENTO.....	33
5	CONCLUSÃO	35
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
7	APENDICE.....	37

1 INTRODUÇÃO

Os relés utilizados para a proteção de sistemas elétricos são os equipamentos responsáveis por comandar a abertura do disjuntor quando identificada alguma anormalidade, avaliando quaisquer eventos e verificando a necessidade ou não de atuação. Os relés de sobrecorrente, tal como o próprio nome descreve, atuam quando identificam uma corrente acima do seu valor de ajuste, podendo isso acontecer de forma instantânea (função ANSI 50) ou temporizada (função ANSI 51).

Para fins de pesquisa e/ou didáticos, até o presente momento não existem muitos modelos prontos e de fácil aplicação de relés que possam representar com fidelidade as características descritas acima. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi a modelagem e implementação das funções 50 (instantânea) e 51 (temporizada) de um relé de sobrecorrente no ambiente do software Matlab-Simulink®, desenvolvido pela companhia MathWorks®, o qual se resume em uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistema dinâmicos que, além disso, permite a criação de novos modelos além daqueles já existentes, abrindo um amplo leque de possibilidades.

O desenvolvimento e a implementação da modelagem do relé foram realizadas utilizando-se funções já prontas do Simulink®, assim como criando-se um novo bloco de elemento que apresenta uma interface de fácil entendimento, onde é possível entrar com todos os dados necessários para a realização de uma simulação ou determinada análise, tais como o tipo de curva e coordenação com outros relés. Tudo isso foi possível graças às possibilidades de se utilizar funções do Matlab®, através de modelos prontos que fazem a conexão destas duas ferramentas e desta maneira, sendo possível trazer as linhas de códigos utilizadas no Matlab® para o modelo de diagramas de blocos do Simulink®, realizando toda a programação e simulação do funcionamento de um relé idêntico ao utilizado na rede elétrica.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Um relé, tal como os exemplificados na Figura 1, pode ser descrito como um dispositivo por meio do qual um equipamento, que na proteção de sistemas elétricos pode ser exemplificado pelo disjuntor, é operado em resposta a variações nas condições deste equipamento. Para a proteção de sistemas elétricos, são os equipamentos responsáveis por comandar a abertura do disjuntor quando identificada alguma anormalidade, seja ela de corrente, tensão, frequência, potência ou outro parâmetro, avaliando e verificando a necessidade ou não de atuação.



Figura 1 – Exemplos de relés com funções de sobrecorrente

Todo equipamento deste tipo, normalmente atua segundo sua curva tempo *versus* sua condição. O relé de sobrecorrente pode ser descrito segundo sua curva tempo versus corrente, descrita na Figura 2, onde o eixo vertical é o tempo de retardo dado em segundos e o eixo horizontal a corrente, aqui dada em porcentagem, onde é possível observar três diferentes intervalos. Os dois primeiros, Tempo Inverso e Tempo definido, correspondem a função ANSI 51, também chamada de temporizada, a qual determina um tempo de retardo para

que o Relé atue. Já o último intervalo, chamado Instantâneo, corresponde função ANSI 50.

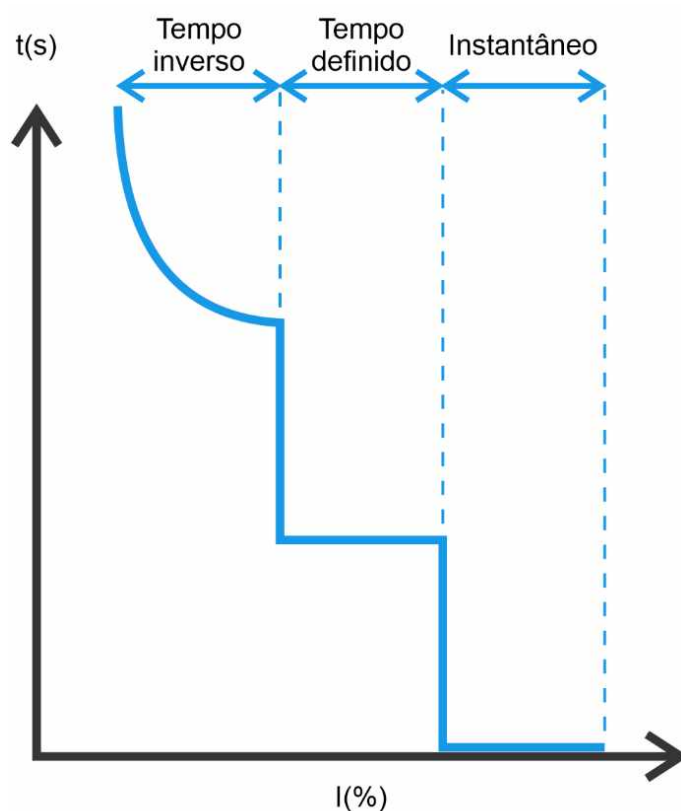


Figura 2 - Temporização de um relé 50/51

Para qualquer ponto imediatamente acima da curva do Relé, este deve acionar o dispositivo responsável por realizar a abertura do circuito ao qual está conectado. Nesse contexto, a função ANSI 51 tem o objetivo de dar ao sistema um tempo para que ele se recupere sozinho, já a função ANSI 50 existe para a situação onde é necessária a imediata interrupção da corrente sendo tais características descritas a seguir detalhadamente, contando com suas aplicações e formulações matemáticas.

2.1 RELÉ DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEO (ANSI 50)

Nesta função não há um tempo de retardo quando a corrente é superior ao seu ajuste, assim sendo seu tempo de atuação corresponde apenas ao tempo necessário à mudança de estado dos seus mecanismos de operação,

característica intrínseca a sua construção. Sua aplicação é necessária a proteção contra correntes de curtos-circuitos, as quais assumem valores muito grandes e cuja extinção deve ser imediata, evitando assim possíveis danos.

2.2 RELÉ DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADO (ANSI 51)

2.2.1 TEMPO DEFINIDO

O tempo de retardo para qualquer corrente acima da sua corrente de ajuste para essa função pode ser matematicamente definido pela equação (1):

$$t(i) = \begin{cases} \infty, & i < i_{AjusteD} \\ CT, & i \geq i_{AjusteD} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- $i_{AjusteD}$ é a corrente de ajuste de tempo definido;
- i é a corrente que o relé enxerga;
- CT é a constante de tempo de retardo definido;
- $t(i)$ é o tempo de retardo em segundos.

A aplicação deste relé se dá em ambientes onde picos de corrente já previstos acionam desnecessariamente a proteção do sistema, tal como correntes da conexão de transformadores e a partida de grandes motores, eventos que provocam correntes similares a correntes de curto-circuito. Desta maneira, tal corrente, se já prevista, pode surgir e se extinguir naturalmente sem a atuação desnecessária de qualquer elemento do sistema de proteção.

2.2.2 TEMPO INVERSO

Está função em relação a correntes pouco acima de seu ajuste possui um tempo de retardo muito alto quando comparado a sua resposta em relação a correntes maiores. A forma como é calculado o tempo de retardo varia de um fabricante para outro e de uma norma para outra. Desta maneira neste trabalho

serão citadas duas normas diferentes, comumente encontradas dentre os diversos equipamentos disponíveis no mercado, a IEEE e a IEC [1].

A norma IEEE define três curvas diferentes, as quais podem ser descritas pela equação (2):

$$t(i) = CT \left(\frac{\beta}{\left(\frac{i}{i_{AjusteT}} \right)^\alpha - 1} + K \right) \quad (2)$$

Onde:

- $i_{AjusteT}$ é a corrente de ajuste de tempo inverso;
- i é a corrente que o relé enxerga;
- CT é a constante de tempo de retardo inverso;
- $t(i)$ é o tempo de retardo em segundos.

As demais constantes são descritas na Tabela 1:

Tabela 1 - Valores das constantes da equação 2

Curvas	α	β	K
IEEE Moderadamente Inversa	0,02	0,0515	0,114
IEEE Muito Inversa	2	19,61	0,491
IEEE Extremamente Inversa	2	28,2	0,1215

Já a norma IEC define outras cinco curvas diferentes, as quais podem ser descritas pela equação (3):

$$t(i) = CT \left(\frac{\beta}{\left(\frac{i}{i_{AjusteT}} \right)^\alpha - 1} \right) \quad (3)$$

Onde:

- $i_{AjusteT}$ é a corrente de ajuste de tempo inverso;
- i é a corrente que o relé enxerga;
- CT é a constante de tempo de retardo inverso;
- $t(i)$ é o tempo de retardo em segundos.

As constantes são descritas abaixo:

Tabela 2 - Valores das constantes da equação 3

Curvas	α	β
IEC Inversa Padrão	0,02	0,14
IEC Inversa de Tempo Curto	0,04	0,05
IEC Muito Inversa	1	13,5
IEC Extremamente Inversa	2	80
IEC Inversa de Tempo Longo	1	120

Finalizado essa contextualização acerca da temporização de um relé de sobrecorrente, a seguir são apresentados alguns conceitos com relação a coordenação de relés. Todavia, é valido lembrar que o foco do trabalho não é a coordenação e sim a modelagem de um relé, sendo assim o que será apresentado tem apenas o objetivo contextualizar o leitor.

3 COORDENAÇÃO DE RELÉS 50/51

3.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

A energia elétrica é, sem dúvida alguma, um dos principais recursos responsáveis pelo desenvolvimento da sociedade moderna, devendo assim estar sempre disponível ao consumidor. Todavia, perturbações no sistema elétrico são coisas corriqueiras e que sem a devida mitigação podem vir a interromper toda a operação dele. Assim, um sistema de proteção, deve ser projetado e construído a fim de garantir o controle de tais eventos, isolando-os ou eliminando-os, evitando maiores danos, tal como perda de sincronia de geradores, ou em uma situação mais grave levar a um colapso total da rede.

Todavia, o que foi descrito acima, não se trata de uma tarefa fácil. O Sistema Elétrico Brasileiro por exemplo está todo interligado, repleto de diversas construções cada uma dotada de suas próprias características, exigindo uma análise diferente para cada caso. É quase um trabalho artesanal, projetar onde cada relé ou chave fusível deve estar e embora exista na literatura [2 a 4] diversas técnicas de projeto, nenhuma delas deve ser levada como uma lei absoluta e assim cabe ao engenheiro ou projetista a capacidade de se adaptar-se a cada caso conforme for necessário. Desta maneira, é proposta uma lógica de coordenação entre Relés 50/51, desenvolvida com base em informações descritas na literatura [2 a 4], que assim como destacado anteriormente, não deve ser considerada absoluta, na medida em que cada caso tem suas determinadas características.

3.2 COORDENAÇÃO ENTRE DOIS RELÉS 50/51

O processo descrito em sequência trata-se de um modelo iterativo passível de ser aplicado a qualquer sistema radial, desde que sejam sempre consideradas as circunstâncias descritas acima.

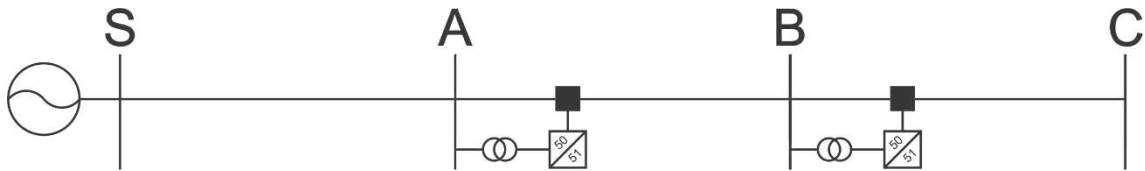


Figura 3 - Exemplo de Circuito

Considere o circuito trifásico a quatro fios na Figura 3, onde estão conectados dois relés, um na barra A e outro na barra B e em cada barra existe um nível de curto circuito trifásico $I_{CC3\phi}$, bifásico $I_{CC2\phi}$ e monofásico $I_{CC1\phi}$. Definido tais considerações temos os seguintes passos:

- ❖ 1º Passo: Corrente nominal da barra ao qual está conectado o Relé:

$$I_N = \frac{\sum \text{Cargas aparentes a jusante da barra}}{\sqrt{3} * V_{L-L}} \quad (4)$$

- ❖ 2º Passo: Escolha da corrente de ajuste temporizada inversa do relé:

Para o relé de fase, temos que:

$$I_N * F_C < i_{AjusteTF} < I_{CC2\phi} \text{ do final do trecho} \quad (5)$$

Onde:

- F_C é dado entre 1,3 a 1,5

Para o relé de neutro, temos que:

$$I_N * \delta < i_{AjusteTN} < I_{CC1\phi} \text{ do final do trecho} \quad (6)$$

Onde:

- δ é dado como 10%

- ❖ 3º Passo: Escolha da corrente de ajuste instantânea do relé:

Para o relé de fase, temos que:

$$i_{AjusteIF} \geq I_{CC3\phi} \text{ até } 80\% \text{ do final do trecho} \quad (7)$$

Para o relé de neutro, temos que:

$$i_{AjusteIN} \geq I_{CC1\phi} \text{ até } 80\% \text{ do final do trecho} \quad (8)$$

- ❖ 4º Passo: Ajuste da coordenação

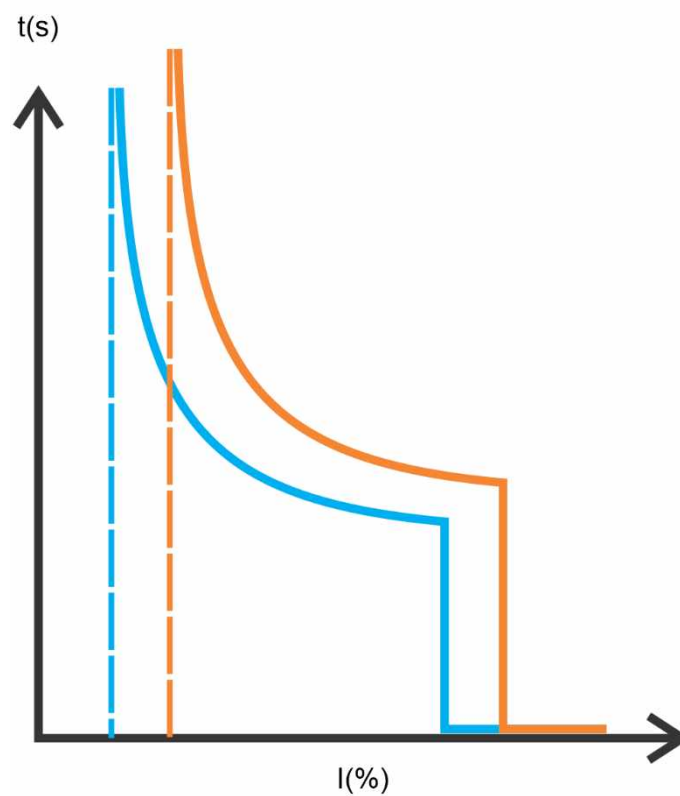


Figura 4 - Coordenograma

Definidos os ajustes de corrente, ainda resta a escolha das curvas desejadas, o que, tal como descrito anteriormente, leva novamente ao ponto em

que a proteção de sistema elétrico se torna um trabalho artesanal, em busca da melhor solução de cada caso, a fim de garantir um sistema confiável, seletivo e ágil.

Finalizada toda a fundamentação teórica acerca da temporização e coordenação de relés de sobrecorrente com funções 50 e 51, a seguir são apresentadas todas as informações as cerca do projeto, tais como as ferramentas utilizadas e o funcionamento dele.

4 MODELAGEM DE RELÉ 50/51 NO SOFTWARE MATLAB-SIMULINK®

A seguir são apresentadas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do projeto, como funcionam e como foram utilizadas, além do projeto final e pro fim o manual de como configura-lo para uso em outros projetos, levando-se em consideração que o projeto foi desenvolvido para versões 2018 ou mais novas do *software*, sendo o que é descrito a seguir válido apenas para elas e para as mais antigas pode ser necessário alguns ajuste, ou mesmo em versões mais antigas, pode ser que seja impossível a aplicação do modelo proposto.

4.1 BLOCO MATLAB FUNCTION

Tal como foi descrito anteriormente o desenvolvimento e implementação prática da modelagem do relé foi realizado utilizando-se funções já prontas do Simulink®, criando-se um novo bloco de elemento que apresenta uma interface de fácil entendimento, onde é possível entrar com todos os dados necessários para a realização de uma simulação ou determinada análise, tais como o tipo de curva e correntes de ajuste. Tudo isso foi possível graças a possibilidade de se utilizar funções do Matlab®, através de modelos prontos que fazem a conexão destas duas ferramentas, especificamente o bloco MATLAB Function ilustrado na Figura 5, este que exerce o mesmo papel de uma função qualquer criada no Matlab®.



Figura 5 - Bloco MATLAB Function

Dado um duplo-clique sobre o bloco, ele direciona o usuário à interface de edição do Matlab®, tal como ilustra a Figura 6 abaixo:

```

MATLAB Function* x +
1 function y = fcn(u)
2
3 y = u/2;

```

Figura 6 - Interface de edição Matlab®

Na interface descrita basta especificar a entradas e saídas do bloco, ou seja, determinar seus argumentos e para onde retornar os valores após processados. Na Figura 7 é possível observar toda a logica utilizado no processamento realizado pelo relé, tal forma que ela reflete a logica da temporização dele, na medida em que se resume a testes sequenciais verificando-se se foi atingido algum ponto imediatamente acima da curva temporizada do relé.

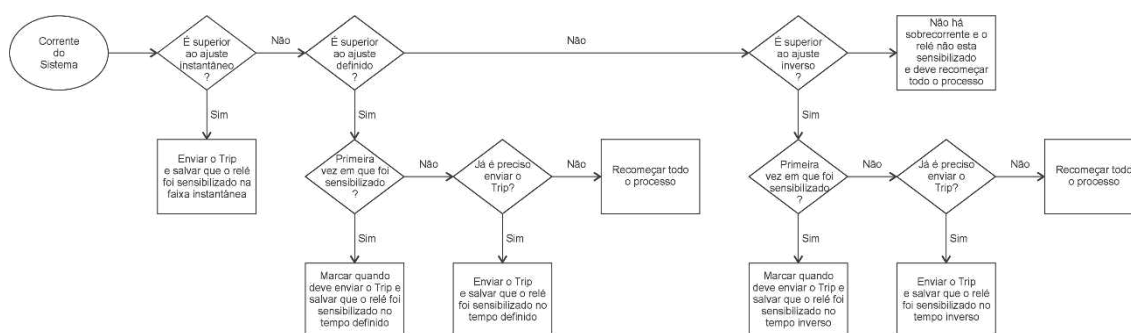


Figura 7 - Diagrama de blocos do modelo proposto

4.2 MASK EDITOR: RELAY

O novo modelo precisa de uma interface de fácil manuseio e isto foi obtido utilizando uma MASK ou uma interface customizável para o usuário, ela transforma a junção de todos os blocos prontos e um único bloco, com um ícone próprio e uma interface contendo todos os seus parâmetros totalmente customizáveis.

Para criar uma MASK, pode se clicar sobre o conjunto de blocos com o botão direito do mouse e se direcionar ao campo EDIT MASK, ou utilizar o atalho CTRL + M do teclado enquanto selecionados os blocos e assim o usuário será redirecionado a interface descrita na Figura 8.

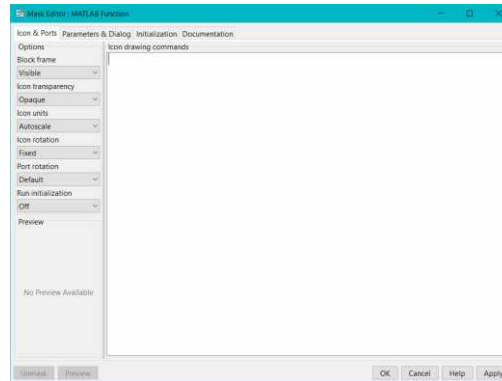


Figura 8 - Interface de configuração da MASK

Nesta interface é possível definir um ícone para o bloco, nomear suas entradas e saídas e ainda configurar como desejado uma interface para configuração deste. Nesta é possível adicionar botões, caixas de combinações, formulários, outras abas dentro da mesma interface, etc. Todas essas ferramentas possibilitam ao usuário desenvolver qualquer nova criação tornando-a organizada e limpa, facilitando qualquer trabalho necessário, pois possível transformar qualquer emaranhado de blocos em um único elemento.

4.3 MODELO PRONTO: RELAY 50/51

A Figura 9 mostra a versão final do relé com a indicação de todas as suas entradas e saídas.

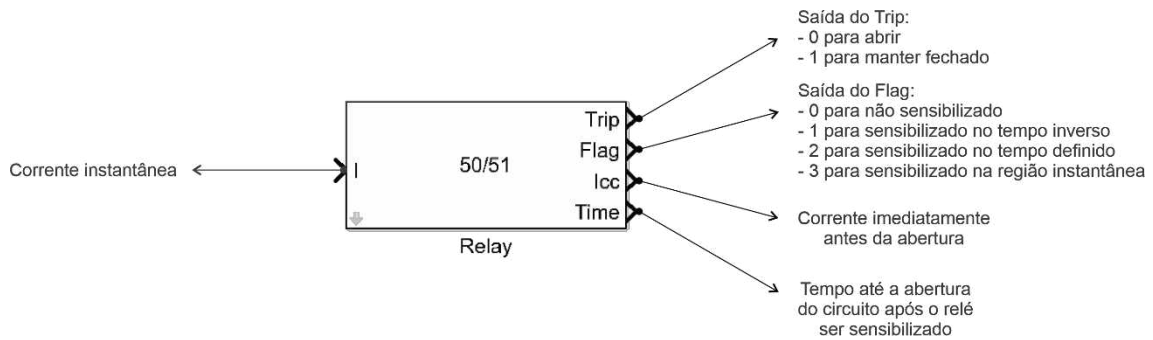


Figura 9 - Versão final do relé

O modelo proposto, conta com uma entrada para o valor instantâneo da medição de corrente, podendo essa ter sido realizada no secundário de um TC ou diretamente na rede e além disso, conta com quatro saídas denominadas *Trip*, *Flag*, *Icc* e *Time*.

A saída *Trip* representa o sinal de saída do relé, enviando um sinal 1 para manter o circuito fechado e 0 para abri-lo.

A saída *Flag* informa ao usuário em que função (Tempo Inverso, Tempo Definido ou Instantânea) o equipamento atuou tal como descreve a Tabela 3.

Tabela 3 - Saída da porta Flag

Sinal	Função
0	Não sensibilizado
1	Tempo Inverso
2	Tempo Definido
3	Instantânea

A saída *Icc* mostra a corrente que o relé enxerga e crava no valor imediatamente anterior ao momento em que o relé envia um sinal 0 para sua saída *Trip*.

A saída *Time*, ao longo de uma simulação até que o relé atue, emite um sinal inf e após a atuação do relé emite um sinal contendo o tempo de entre a identificação de uma sobrecorrente até o envio do sinal de abertura para o disjuntor.

Todas as saídas além do *Trip* descritas servem como ferramenta para auxiliar o projetista, aluno ou pesquisador a identificar com facilidade quais informações que deseje acerca do funcionamento do relé. Em muitos relé reais, essas informações são armazenadas para que o responsável por eles, possa entender as circunstâncias que levaram o equipamento a atuar.

4.4 MANUAL DE CONFIGURAÇÃO DO MODELO

A fim de facilitar a configuração do relé e tornar intuitivo seu ajuste, foi desenvolvida a interface MASK descrita na Figura 10, onde o usuário tem acesso, de maneira organizada, a todas os detalhes do modelo, podendo assim modificá-los de acordo com suas necessidades.

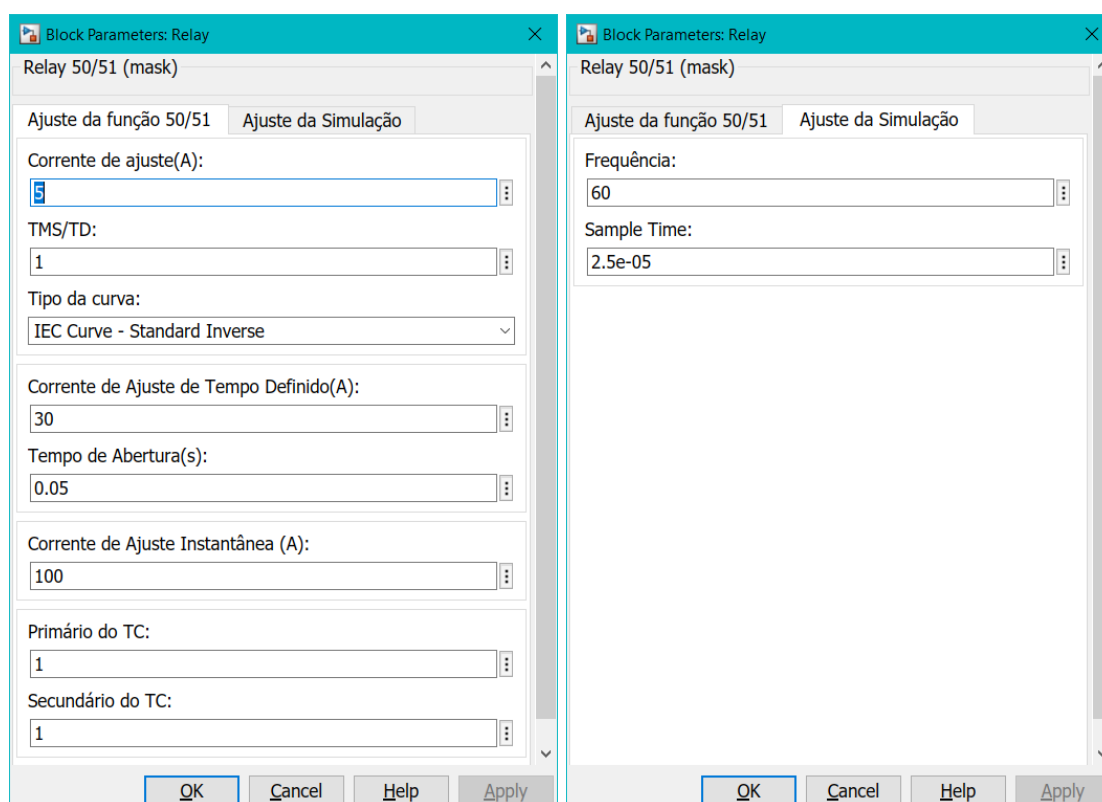


Figura 10 - Interface responsável pela configuração do relé

Todos os parâmetros da Figura 6 e suas descrições estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do relé

Parâmetro	Função
Corrente de ajuste (A)	Definir a corrente de ajuste da curva inversa
TMS/TD (S)	Definir constante de tempo de retardo inverso
Tipo da curva	Caixa de combinações contendo todas as curvas IEEE e IEC
Corrente de ajuste de tempo definido (A)	Definir a corrente de ajuste da curva de tempo definido
Tempo de abertura (S)	Definir constante de tempo de retardo definida
Corrente de ajuste instantânea (A)	Definir a corrente de ajuste instantânea
Primário do TC (A)	Se existir um TC, defini a corrente do primário deste, se não, basta preencher com 1
Secundário do TC (A)	Se existir um TC, defini a corrente do secundário deste, se não, basta preencher com 1
Frequência (Hz)	Definir a frequência de operação nominal do circuito
Sample Time	Definir a taxa de amostragem a ser utilizada pelo relé

4.5 COORDENOGRAMA

Além do bloco do relé 50/51, também foi desenvolvido uma pequena ferramenta com o intuito de visualizar um coordenograma entre dois ou mais relés, a qual está descrita na Figura 11.

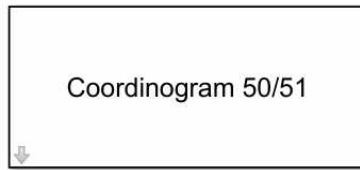


Figura 11 - Bloco para obtenção do coordenograma

Ao serem dados dois cliques no bloco este leva a interface da Figura 12.

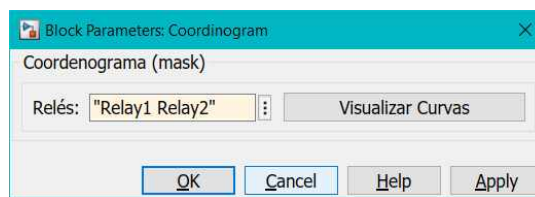


Figura 12 - Interface do bloco para obtenção do coordenograma

Em sua interface basta preencher o campo Relés com o nome dos relés separados por espaço e entre aspas duplas, tal como ilustrado acima e em seguida pressionar o botão Visualizar Curvas, o qual apresenta um coordenograma igual ao da Figura 13.

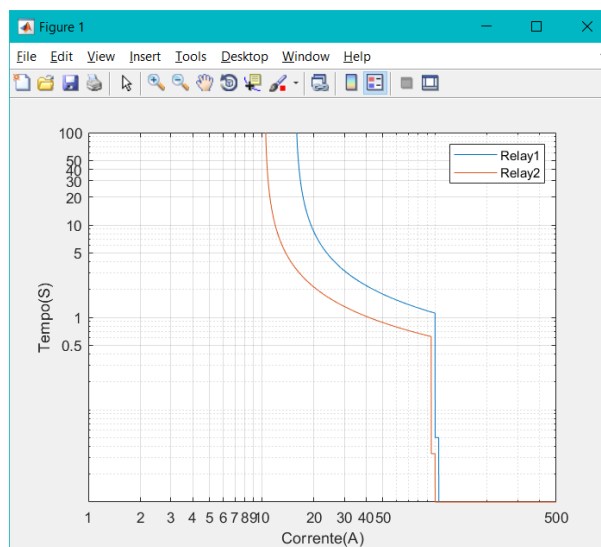


Figura 13 - Coordenograma

4.6 TESTES REALIZADOS

A fim de demonstrar a aplicação e o funcionamento do bloco do Relé 50/51, foram desenvolvidos realizados quatro testes, exemplificando a identificação de uma corrente na faixa temporizada inversa, na temporizada definida e instantânea, testes esses que deverão ilustrar a atuação do relé e além disso, foi realizado um último teste, no qual foi aplicada uma corrente, acima da corrente de ajuste temporizada, mas que se extinguiu antes que o relé atuasse.

Para a realização dos testes, foi montado o seguinte circuito monofásico descrito na Figura 14.

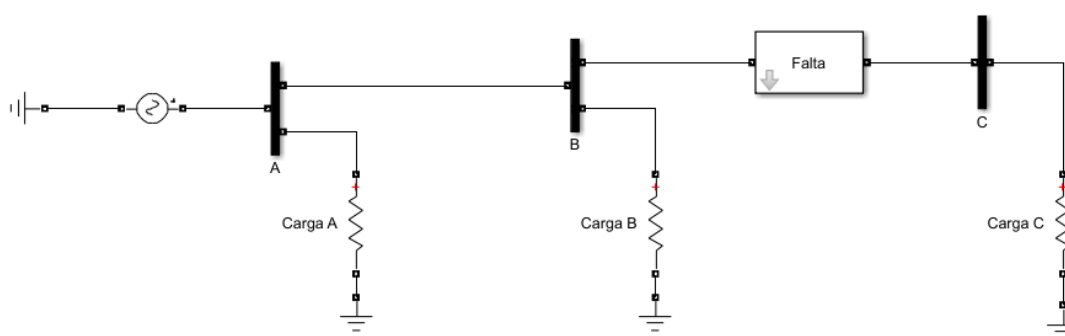


Figura 14 - Circuito utilizado nos testes do Relé

O circuito descrito não representa um circuito real, que como citado no capítulo 3.2, o foco do trabalho não é a coordenação entre relés e sim apenas a modelagem de um. Desta maneira foi criada um circuito totalmente controlado, onde o bloco Falta auxilia com a aplicação de correntes em quaisquer valores desejados, sendo assim este representa apenas uma ferramenta para testes.

A medição de corrente e o disjuntor responsável pela abertura do circuito estão dentro da barra B, e para cada caso, será provocada uma falta entre as barras B e C, as quais são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos eventos

Evento	Descrição	Corrente medida em B
1º Evento	Atuação na faixa temporizada inversa com interrupção antes da atuação do relé	40
2º Evento	Atuação na faixa temporizada inversa	40
3º Evento	Atuação na faixa temporizada definida	80
4º Evento	Atuação na faixa Instantânea	120

A configuração do Relé, utilizada durante os testes, é descrita na Tabela 6.

Tabela 6 - Configuração do Relé

Parâmetro	Configuração adotada
Corrente de Ajuste (A)	10
TMS/TD (S)	1
Tipo da curva	IEC Curve – Standard Inverse
Corrente de Ajuste de tempo definido (A)	50
Tempo de abertura (S)	1
Corrente de ajuste instantânea (A)	100
Primário do TC (A)	1
Secundário do TC (A)	1
Frequência (Hz)	60
Sample Time	2.5e-05

4.6.1 PRIMEIRO EVENTO

No primeiro evento a corrente foi elevada de 8 A para 40 A durante 1,5 s. Segunda a equação 9, o tempo de retardo para as configurações descritas seria de 4,9798 s, na faixa de corrente temporizada inversa, e sendo assim o relé não deveria atuar.

$$t(i) = CT \left(\frac{\beta}{\left(\frac{i}{i_{AjusteT}} \right)^\alpha - 1} \right) = 4,9798 \text{ s} \quad (9)$$

A Figura 15 mostra que o relé não atuou, como pode ser observado pelo fato de que após a elevação de corrente, volta a percorrer no circuito a mesma corrente que era média antes do evento.

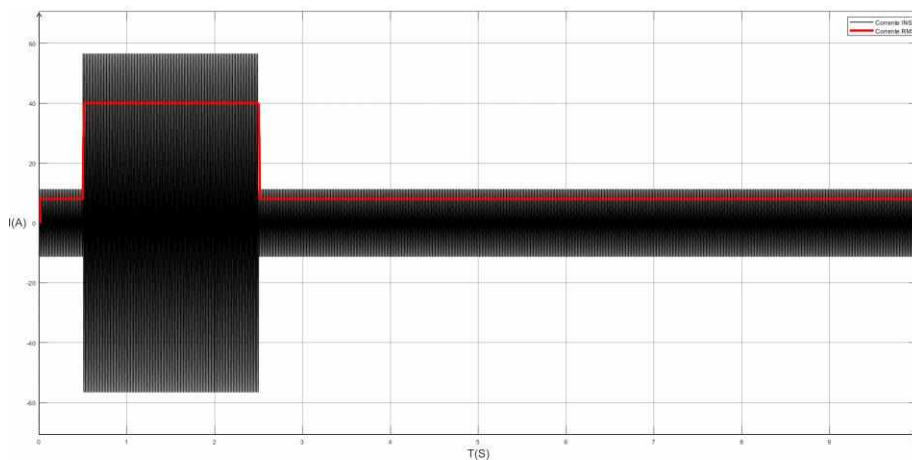


Figura 15 - Resultado do primeiro evento simulado

4.6.2 SEGUNDO EVENTO

No segundo evento a corrente foi elevada de 8 A para 40, assim como no primeiro, todavia não foi programado um instante para que ela se extinguísse. Segunda a equação 9, o tempo de retardo para as configurações descritas seria

de 4,9798 s, na faixa de corrente temporizada inversa, e sendo assim o relé deveria atuar após passado este tempo.

A Figura 16 mostra que o relé atuou assim como previsto anteriormente, já que após o evento não há mais corrente no circuito.

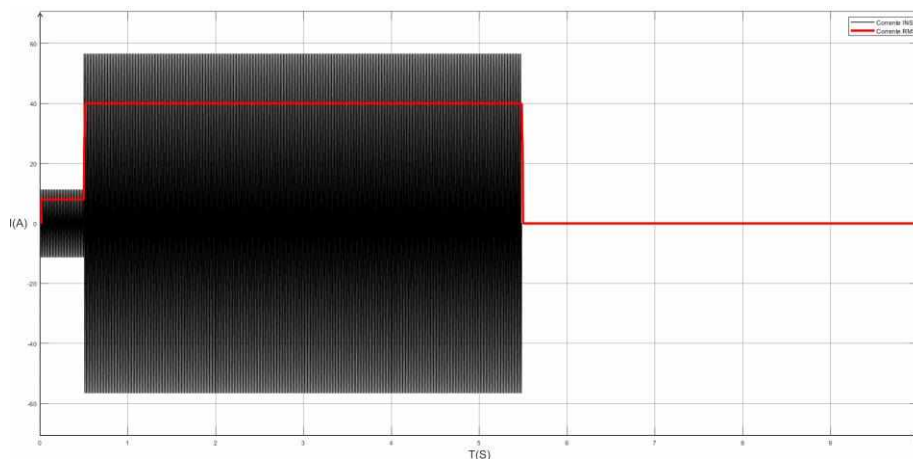


Figura 16 - Resultado do segundo evento simulado

A seguir, na figura 17, são apresentadas as informações fornecidas pelo Relé, após ter atuado.

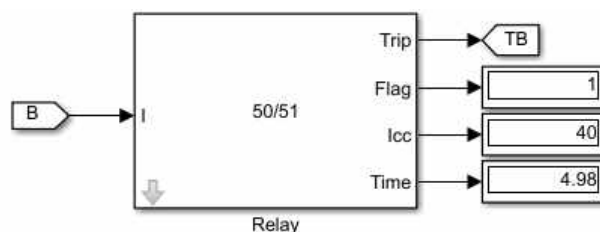


Figura 17 - Informações fornecidas pelo Relé após a simulação

4.6.3 TERCEIRO EVENTO

No terceiro evento a corrente foi elevada de 8 A para 80. O tempo de retardo para as configurações descritas seria de 1 S, na faixa de corrente temporizada definida. e sendo assim o relé deveria atuar após passado este tempo.

A Figura 18 mostra que o relé atuou assim como previsto anteriormente, já que após o evento não há mais corrente no circuito.

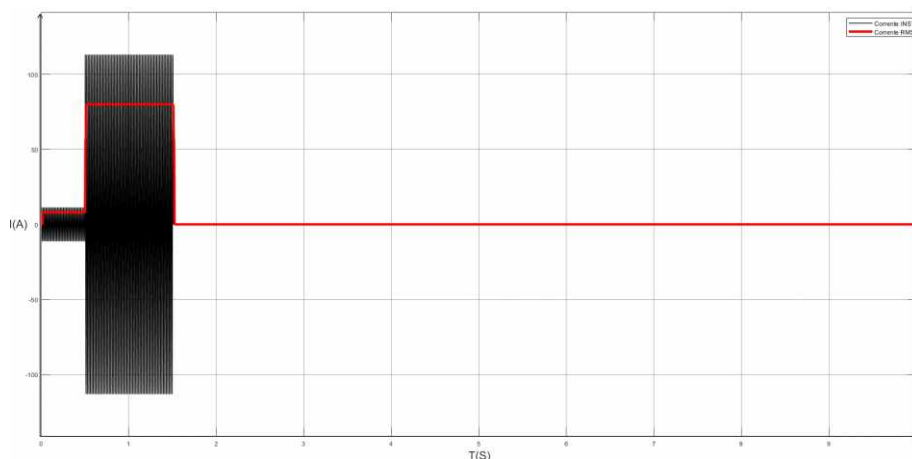


Figura 18 - Resultado do terceiro evento simulado

A seguir, na figura 19, são apresentadas as informações fornecidas pelo Relé:

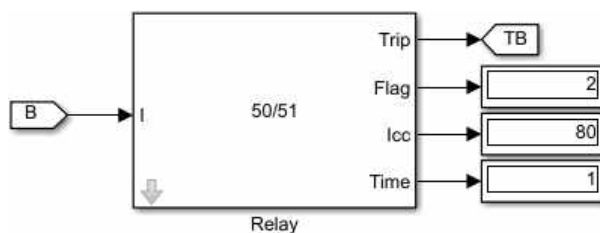


Figura 19 - Informações fornecidas pelo Relé após a simulação

4.6.4 QUARTO EVENTO

No quarto evento a corrente foi elevada de 8 A para 120 e assim o Relé deveria atuar instantaneamente.

Na Figura 20 o relé atuou assim como previsto anteriormente, já que após o evento não há mais corrente no circuito. Todavia, é importante salientar que ele não atuou realmente de maneira instantânea, devido a fato de existir um transitório de corrente, tal que o tempo real de abertura foi de 0,01128 s. O relé atuou praticamente imediatamente antes da corrente atingir 100 A, tal que a medição de corrente realizada travou em 99,97 A.

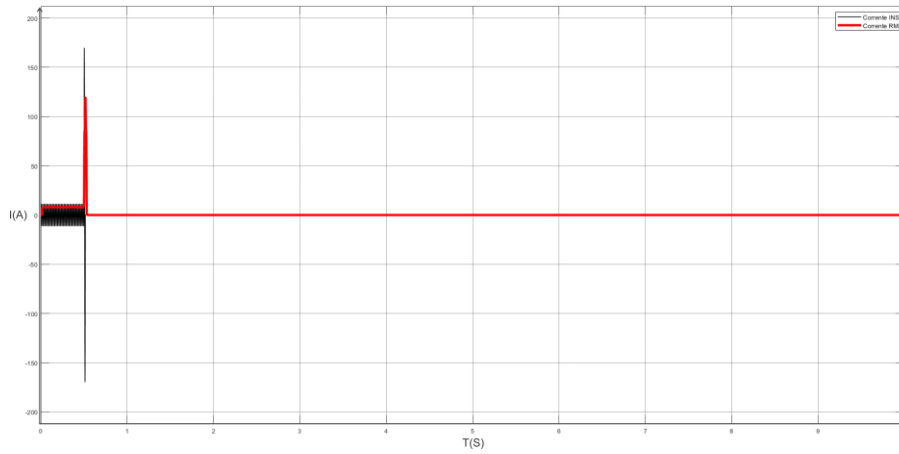


Figura 20 - Resultado do quarto evento simulado

A seguir, na figura 21, são apresentadas as informações fornecidas pelo Relé:

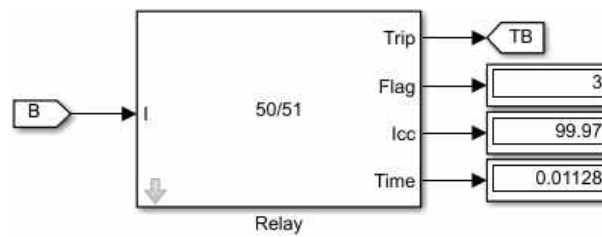


Figura 21 - Informações fornecidas pelo Relé após a simulação

5 CONCLUSÃO

Um sistema de proteção, deve ser projetado e construído a fim de garantir o controle de quaisquer perturbações, isolando-as ou eliminando-as, evitando maiores danos e os principais equipamentos responsáveis por fazerem isto são os relés. E neste trabalho foi desenvolvido no Matlab-Simulink® um modelo de um Relé 50/51, de fácil aplicação, utilizando blocos já prontos do software, principalmente o bloco MATLAB Function, o qual exerce exatamente o mesmo papel de uma função qualquer criada no Matlab®, o que facilitou a implementação de todas as curvas aqui citadas [1].

Além disso, a fim de garantir o fácil manuseio do modelo, foi criada uma interface limpa e organizada, onde o usuário pode ter acesso sem dificuldades a todas as configurações do Relé. Junto a isso, foi desenvolvida também uma ferramenta para obtenção do coordenograma entre dois ou mais relés, afim de auxiliar quaisquer projetos, sejam eles para fins de pesquisa e/ou ensino, que futuramente venham utilizar o novo modelo.

A fim de verificar o correto funcionamento do modelo, foi também verificado seu funcionamento em quatro diferentes situações. Na primeira, foi aplicada uma corrente acima de seu ajuste temporizado inverso ao circuito ao qual estava conectado, todavia ela se extinguiu antes que o relé pudesse atuar, e tal como esperado foi o que aconteceu, o relé não atuou. Já na segunda situação, foi realizado o mesmo, mas não foi definido um tempo para extinção da corrente, e o relé atuou exatamente no tempo previsto. Na terceira situação, foi aplicada uma corrente acima de seu ajuste temporizado definido, sem a definição de um instante para sua extinção, e o relé atuou normalmente. E na última, o objetivo era aplicar uma corrente acima do ajuste instantâneo, todavia, como esperado, o relé atuou imediatamente após a corrente atingir o valor de ajuste.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bernardes, Wellington Maycon Santos. Análise da proteção de sistemas de energia elétrica utilizando técnicas modernas de otimização heurística. EESC/USP. 2018.
- [2] MAMEDE Filho, João. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. LTC Livros Técnico e Científicos Ltda. 2011.
- [3] SATO, Fujito; FREITAS, Walmir. Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica. Elsevier, Editora Ltda. 2014.
- [4] COURY, Denis; BARBOSA, Daniel; MIRANDA, Juliano; SILVA, Lázaro. Proteção digital dos sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. SBSE. 2012.

7 APENDICE

APENDICE A: PROGRAMAÇÃO DO BLOCO MATLAB FUNCTION DO RELÉ

```

function [TRIP,FT,FD,FI,ICC,TO] =
fcn(CLOCK,IRMS,IAJT,IAJD,IAJI,CURVE,TAJ,TD)

persistent A B C FLAGT FLAGD FLAGI STATUS TIME LAST RESET
TOPEN TFIND TSOLVE;

if isempty(STATUS)
    STATUS = 1;
    FLAGT = 1;
    FLAGD = 1;
    FLAGI = 1;
    TIME = inf;
    LAST = 0;
    RESET = 1;
    TOPEN = inf;
    TFIND = 1000;
    TSOLVE = 1000;
    A = 1;
    B = 1;
    C = 1;
    switch CURVE
        case 1
            A = 0.14;
            B = 0.02;
            C = 0;
        case 2
            A = 13.5;
            B = 1;
            C = 0;
        case 3
            A = 80;
            B = 2;
            C = 0;
    end
end

```

```

case 4
    A = 120;
    B = 1;
    C = 0;
case 5
    A = 0.0515;
    B = 0.02;
    C = 0.114;
case 6
    A = 19.61;
    B = 2;
    C = 0.491;
case 7
    A = 28.2;
    B = 2;
    C = 0.1217;
case 8
    A = 0.05;
    B = 0.04;
    C = 0;
end
end

if(IRMS>=IAJI && STATUS==1 && FLAGI==1 && RESET==1)
    TRIP = 0;
    FLAGI = 0;
    STATUS = 0;
    TIME = 0 + CLOCK;
    TOPEN = TIME - CLOCK;
    LAST = IRMS;
    RESET = 0;
    FT = FLAGT;
    FD = FLAGD;

```

```

FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
elseif(IRMS>=IAJD && STATUS==1 && FLAGD==1 && RESET==1)
    TRIP = 1;
    FLAGD = 0;
    STATUS = 0;
    TIME = CLOCK + TD;
    TOPEN = TIME - CLOCK;
    LAST = IRMS;
    FT = FLAGT;
    FD = FLAGD;
    FI = FLAGI;
    ICC = IRMS;
    TO = TOPEN;
    TFIND = CLOCK;
elseif(IRMS>=IAJT && STATUS==1 && FLAGT==1 && RESET==1)
    TRIP = 1;
    FLAGT = 0;
    STATUS = 0;
    TIME = CLOCK + TAJ*(A/(((IRMS/IAJT)^B)-1)+C);
    TOPEN = TIME - CLOCK;
    LAST = IRMS;
    FT = FLAGT;
    FD = FLAGD;
    FI = FLAGI;
    ICC = IRMS;
    TO = TOPEN;
    TFIND = CLOCK;
elseif(STATUS==0 && RESET==1)
    if(FLAGI==0)
        TRIP = 0;
        RESET = 0;

```



```

FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
elseif(FLAGD==0)
    if(CLOCK>TIME)
        TRIP = 0;
        RESET = 0;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
else
    if(IRMS<LAST)
        if(IRMS<IAJT)
            TRIP = 1;
            FLAGD = 1;
            STATUS = 1;
            TIME = inf;
            TOPEN = TIME;
            LAST = 0;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
TFIND = 1000;
    elseif(IRMS<IAJD)
        FLAGD = 1;
        FLAGT = 0;

```

```

STATUS = 0;
TIME = TIME - TD + TAJ*(A/(((IRMS/IAJT)^B)-1)+C);
TOPEN = TAJ*(A/(((IRMS/IAJT)^B)-1)+C);
LAST = IRMS;
if(CLOCK>TIME)
    TRIP = 0;
    RESET = 0;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
    else
        TRIP=1;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
    end
    else
        TRIP = 1;
        LAST = IRMS;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
    end
elseif(IRMS>LAST)
    if(IRMS>IAJI)
        FLAGD = 1;

```

```

        FLAGI = 0;
        TRIP = 0;
        RESET = 0;

FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
    else
        TRIP = 1;
        LAST = IRMS;

FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
    end
    else
        TRIP = 1;

FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
    end
    end
else
    if(CLOCK>TIME)
        TRIP = 0;
        RESET = 0;

FT = FLAGT;
FD = FLAGD;

```

```

FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
  else
    if(IRMS<LAST)
      if(IRMS<IAJT)
        TRIP = 1;
        FLAGT = 1;
        STATUS = 1;
        TIME = inf;
        TOPEN = TIME;
        LAST = 0;
      FT = FLAGT;
      FD = FLAGD;
      FI = FLAGI;
      ICC = IRMS;
      TO = TOPEN;
      TSOLVE = 1000;
    else
      FLAGT = 0;
      STATUS = 0;
      TIME = TIME - TAJ*(A/(((LAST/IAJT)^B)-1)+C) +
TAJ*(A/(((IRMS/IAJT)^B)-1)+C);
      TOPEN = TAJ*(A/(((IRMS/IAJT)^B)-1)+C);
      LAST = IRMS;
    if(CLOCK>TIME)
      TRIP = 0;
      RESET = 0;
    FT = FLAGT;
    FD = FLAGD;
    FI = FLAGI;
    ICC = LAST;

```

```

TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
    else
        TRIP=1;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
    end
end
elseif(IRMS>LAST)
    if(IRMS>IAJI)
        FLAGT = 1;
        FLAGI = 0;
        TRIP = 0;
        RESET = 0;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
    elseif(IRMS>IAJD)
        FLAGT = 1;
        FLAGD = 0;
        TIME = TIME + TD - TAJ*(A/(((LAST/IAJT)^B)-1)+C);
        TOPEN = TD;
        LAST = IRMS;
        if(CLOCK>TIME)
            TRIP = 0;
            RESET = 0;
FT = FLAGT;

```

```

FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
    else
        TRIP=1;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
    end
    else
        TIME = TIME - TAJ*(A/(((LAST/IAJT)^B)-1)+C) +
TAJ*(A/(((IRMS/IAJT)^B)-1)+C);
        TOPEN = TAJ*(A/(((IRMS/IAJT)^B)-1)+C);
        LAST = IRMS;
        if(CLOCK>TIME)
            TRIP = 0;
            RESET = 0;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = LAST;
TO = TOPEN;
TSOLVE = CLOCK;
    else
        TRIP = 1;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;

```

```
TO = TOPEN;
    end
    end
else
    TRIP = 1;
FT = FLAGT;
FD = FLAGD;
FI = FLAGI;
ICC = IRMS;
TO = TOPEN;
    end
    end
end
elseif(RESET==0)
    TRIP = 0;
    FT = FLAGT;
    FD = FLAGD;
    FI = FLAGI;
    ICC = LAST;
    TO = TSOLVE-TFIND;
else
    TRIP = 1;
    FT = FLAGT;
    FD = FLAGD;
    FI = FLAGI;
    ICC = IRMS;
    TO = TOPEN;
end
```

**APENDICE B: PROGRAMAÇÃO DO BOTÃO PARA PLOTAR O
COORDENOGRAMA DE DOIS OU MAIS RELÉS**


```

close;
clear;

DATA = (get_param(gcb,'COOR'));
DATA = strrep(DATA, '"', '');
RELAY = textscan(DATA, '%s', 'Delimiter', ' ');
RELAY = permute( RELAY{1}, [2,1] );
LEG = RELAY;

irms = 1:10000;
irms = irms./10;

for RELAY = RELAY
    IAJT = str2num(get_param(strcat(bdroot, '/', string(RELAY)), 'IAJT'));
    IAJD = str2num(get_param(strcat(bdroot, '/', string(RELAY)), 'IAJD'));
    IAJI = str2num(get_param(strcat(bdroot, '/', string(RELAY)), 'IAJI'));
    TAJ = str2num(get_param(strcat(bdroot, '/', string(RELAY)), 'TAJ'));
    TD = str2num(get_param(strcat(bdroot, '/', string(RELAY)), 'TD'));

    switch (get_param(strcat(bdroot, '/', string(RELAY)), 'CURVE'))
        case 'IEC Curve - Standard Inverse'
            A = 0.14;
            B = 0.02;
            C = 0;
        case 'IEC Curve - Very Inverse'
            A = 13.5;
            B = 1;
            C = 0;
        case 'IEC Curve - Extremely Inverse'
            A = 80;
            B = 2;
            C = 0;
        case 'IEC Curve - Long Time Standard Inverse'

```

```

A = 120;
B = 1;
C = 0;
case 'IEEE Moderately Inverse'
    A = 0.0515;
    B = 0.02;
    C = 0.114;
case 'IEEE Very Inverse'
    A = 19.61;
    B = 2;
    C = 0.491;
case 'IEEE Extremely Inverse'
    A = 28.2;
    B = 2;
    C = 0.1217;

case 'IEC Curve - Short Time Inverse'
    A = 0.05;
    B = 0.04;
    C = 0;
end

temp = ((A)./(((irms.^B))/(IAJT^B)-1)+C)*TAJ;

for i = 1:10000
    if IAJI<irms(i)
        temp(i) = 0.001;
    elseif IAJD<irms(i)
        if TD <= 0
            temp(i) = 0.001;
        else
            temp(i) = TD;
        end
    end
end

```

```
    end
end

loglog(temp);
hold on;
end

legend(LEG);

hold off;

grid on;

set(gca, 'XTick', [(0:10).*10 200 300 400 500 5000 10000]);
xticklabels({'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','20','30','40','50','500','1000'})
xlim([10 10000]);
xlabel('Corrente(A)');

ylim([0 100]);
ylabel('Tempo(S)');
set(gca, 'YTick', [0.5 1 5 10 20 30 40 50 100]);

set(gcf, 'Position', [100 50 1000 700]);

clear;
```