

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS



**SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA DE
COGERAÇÃO EM AMBIENTE MATLAB**

Maurício Bosqueto Maia de Campos

PROJETO DE FORMATURA/2004

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



PROJETO DE FORMATURA / 2004

**SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA DE COGERAÇÃO
EM AMBIENTE MATLAB**

ALUNO: Maurício Bosqueto Maia de Campos
ORIENTADOR: Eduardo César Senger
COORDENADOR: Carlos Márcio Vieira Tahan

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter permitido que esta faculdade acontecesse;

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo César Senger pela cobrança correta por um trabalho à altura desta Universidade;

À minha família pelo amor, incentivo e tantas outras virtudes passadas a mim;

Ao meu amor Raquel.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

SINOPSE

A energia elétrica é hoje um dos recursos fundamentais para a sociedade moderna devendo estar disponível ao consumidor na tensão, frequência e quantidade suficiente às suas aplicações. Visando atender suas necessidades de energia elétrica, alguns consumidores industriais optam por produzir sua própria energia, decisão esta que pode ser motivada por diferentes fatores, tais qual econômico, estratégico e/ou político da empresa. Este trabalho tem por objetivo simular um sistema de cogeração em ambiente MatLab para a partir dele estudar os fenômenos relacionados à conexão entre o sistema de geração de energia elétrica próprio de um consumidor qualquer e o sistema de transmissão ou distribuição da concessionária fornecedora de energia elétrica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVO	11
3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	13
3.1	FERRAMENTA UTILIZADA	13
3.2	DIAGRAMA UNIFILAR	14
3.3	PLANTA MODELADA	16
3.4	MODELOS UTILIZADOS	18
3.4.1	<i>Cargas RL.....</i>	<i>18</i>
3.4.2	<i>Barramento da Concessionária.....</i>	<i>19</i>
3.4.3	<i>Linha de Transmissão.....</i>	<i>20</i>
3.4.4	<i>Transformador de Potência.....</i>	<i>21</i>
3.4.5	<i>Motor de Indução.....</i>	<i>22</i>
3.4.6	<i>Máquina Síncrona</i>	<i>23</i>
3.4.7	<i>Disjuntor</i>	<i>24</i>
3.4.8	<i>Barras de Medição.....</i>	<i>24</i>
3.4.9	<i>Gráficos</i>	<i>25</i>
3.5	SUBSISTEMAS	27
3.5.1	<i>Controle de Tração Aplicado ao Eixo do Motor 5000HP.....</i>	<i>27</i>
3.5.2	<i>Controlador de Velocidade e Tensão</i>	<i>28</i>
3.5.3	<i>Sistema de Proteção.....</i>	<i>30</i>
3.5.3.1	<i>Relé de Sobrecorrente – função 51</i>	<i>31</i>
3.5.3.2	<i>Relé de Sobretensão – função 59.....</i>	<i>33</i>
3.5.3.3	<i>Relé de Subtensão – função 27</i>	<i>35</i>
3.5.3.4	<i>Relé de Frequência – função 81.....</i>	<i>36</i>
3.5.3.5	<i>Relé de Tensão de Neutro – função 59N</i>	<i>38</i>
4	SIMULAÇÕES REALIZADAS.....	40
4.1	CURTO-CIRCUITO NO ALIMENTADOR DAS CARGAS SECUNDÁRIAS.....	41
4.2	CURTO-CIRCUITO NA ENTRADA DE ALTA-TENSÃO	46
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	53
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama unifilar adotado	14
Figura 3.2 – Sistema modelado no matlab	16
Figura 3.3 – Modelo de cargas RL	18
Figura 3.4 – Modelo de Barramento da Concessionária	19
Figura 3.5 – Modelo de linha de transmissão	20
Figura 3.6 – Modelo de transformador de potência	21
Figura 3.7 – Modelo de motor de indução	22
Figura 3.8 – Modelo de máquina síncrona	23
Figura 3.9 – Modelo de disjuntor	24
Figura 3.10 – Modelo de barra de medição	25
Figura 3.11 – Modelo de gráficos	25
Figura 3.12 – Subsistema de tração do motor de indução	26
Figura 3.13 – Subsistema controlador do gerador	28
Figura 3.14 – Subsistema de controle da excitação do gerador.	29
Figura 3.15 – Subsistema de controle de velocidade do gerador	29
Figura 3.16 – Interface do relé 51	31
Figura 3.17 – Relé 51	32
Figura 3.18 – Interface do relé 59	33
Figura 3.19 – Relé 59	34
Figura 3.20 – Interface do relé 27	35
Figura 3.21 – Relé 27	36
Figura 3.22 – Interface do relé 81	37
Figura 3.23 – Relé 81	38
Figura 3.24 – Interface do relé 59N	39
Figura 3.25 – Relé 59N	39
Figura 4.1 – Localização do curto-circuito na média tensão	41
Figura 4.2 – Corrente na carga	42
Figura 4.3 – Corrente do motor	42

Figura 4.4 – Velocidade do rotor do motor de indução	43
Figura 4.5 – Torque aplicado pelo rotor	43
Figura 4.6 – Corrente do gerador	44
Figura 4.7 – Tensão do gerador	44
Figura 4.8 – Localização do curto-circuito na alta tensão	46
Figura 4.9 – Tensão e corrente no lado de baixa tensão do transformador de potência	47
Figura 4.10 – Corrente na carga secundária, corrente do gerador e tensão do gerador.	48
Figura 4.11 – Potência mecânica do rotor, tensão de excitação, tensão de fase e velocidade do rotor do gerador.	49
Figura 4.12 – Potência ativa e reativa fornecidas pelo gerador.	50
Figura 4.13 – Corrente trifásica, velocidade do eixo e torque do motor.	51

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é hoje um dos recursos fundamentais para a sociedade moderna devendo estar disponível ao consumidor na tensão, frequência e quantidade suficiente às suas aplicações.

Visando atender suas necessidades de energia elétrica, alguns consumidores industriais optam por produzir sua própria energia, decisão esta que pode ser motivada por diferentes fatores, tais qual econômico, estratégico e/ou político da empresa.

Surge assim a questão do paralelismo entre os sistemas elétricos industriais providos de geração própria e o sistema de transmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica.

Dependendo da natureza do mercado em que a indústria está inserida o fator econômico pode ser aquele que levará a mesma a optar pela instalação de um sistema de cogeração de energia elétrica. Por exemplo, em uma indústria sucro-alcoleira o bagaço da cana-de-açúcar que seria eliminado torna-se o combustível que irá gerar a energia elétrica para o funcionamento da mesma. Neste caso, a economia em compra de energia elétrica ou a própria venda da mesma vêm a ser o ponto fundamental da decisão.

No entanto, em uma usina siderúrgica o fator disponibilidade de energia elétrica pode ser aquele que vem a tornar necessário o sistema de cogeração. Nas plantas industriais de uma usina siderúrgica estão alocados autofornos de alto valor financeiro os quais se tornam inutilizáveis quando ocorre falta de energia elétrica em meio a um processo de fundição em andamento. Para estes consumidores a garantia extra de fornecimento alcançada pela instalação de um gerador em sua planta compensa o investimento necessário.

Independente da razão que motiva sua instalação, é inerente aos sistemas de cogeração a conexão entre o sistema de geração do consumidor e o sistema de transmissão/distribuição da concessionária. Não há como definir fisicamente um ponto que identifique esta conexão, já que uma vez fechada a mesma, os dois sistemas passam a constituir um só. No entanto, podemos estudar os efeitos decorrentes deste acoplamento e as conseqüências de eventos relacionados a esta conexão tanto para a concessionária quanto para o consumidor.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo simular um sistema de cogeração em ambiente MatLab para a partir dele estudar os fenômenos relacionados à conexão entre o sistema de geração de energia elétrica próprio de um consumidor qualquer e o sistema de transmissão ou distribuição da concessionária fornecedora de energia elétrica.

De forma a obtermos um sistema generalista, não direcionado a um sistema específico, porém realista, o sistema deve ser planejado para possuir os elementos usuais de uma planta de cogeração para desta forma obtermos resultados confiáveis.

Podemos explicar um sistema padrão pelos blocos que o constituem.

O primeiro bloco é o da entrada da concessionária. A função dos elementos presentes neste bloco é a alimentação da planta cogeradora e simulação de um consumidor vizinho à mesma. Desta forma será possível analisar a resposta do modelo a perturbações provenientes da própria concessionária e também o caso de ilhamento da planta.

O segundo bloco a ser modelado é o da planta industrial do consumidor. Este bloco terá como função a simulação dos elementos típicos que constituem uma planta de cogeração como a entrada em alta tensão e o barramento de média tensão com as cargas presentes na planta como o motor de indução de alta capacidade e as demais cargas secundárias presentes. Assim, será possível analisarmos o comportamento dinâmico da planta quando a mesma for exposta a eventos abruptos observando, inclusive, o processo de seletividade das cargas.

O terceiro bloco a ser modelado é o sistema de geração de energia elétrica próprio da planta. A função deste bloco é ser uma fonte particular de energia elétrica dando ao consumidor autonomia e disponibilidade de energia elétrica. Ele será constituído por uma máquina síncrona controlada por sistemas de controle de velocidade e de tensão.

Por fim, teremos o bloco de proteção dos sistemas elétricos modelados. Este bloco será modelado através dos recursos disponíveis na ferramenta Simulink do MatLab de forma a recriar as características das funções de proteção importantes aos eventos que serão simulados.

Assim, ao final da modelagem dos blocos teremos um sistema composto por concessionária, planta industrial, gerador e funções de proteção associadas aos mesmos.

Com o modelamento destes itens será possível então realizar simulações de situações típicas em uma planta cogeradora e/ou a análise do comportamento dinâmico e em regime de estudos de caso e prospectos de investimentos.

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

3.1 FERRAMENTA UTILIZADA

O modelo proposto a ser trabalhado é de complexidade relativamente alta, portanto exige que a ferramenta computacional seja de alta capacidade. Ainda, este trabalho tem a proposta de se tornar uma ferramenta de estudos de casos e por isso seus componentes e parâmetros devem ter maleabilidade suficiente para o atendimento das mais variadas modificações.

Visando atender estes requisitos foi escolhido o MATLAB (Matrix Laboratories) em sua versão N° 6.5 (Realise 13) por dispor de uma linguagem técnica de alta performance que possibilita integrar visualização e programação em um ambiente de uso ameno onde os problemas e suas soluções são apresentados em notação matemática familiar.

O MATLAB em sua versão 6.5 possui ainda uma ferramenta chamada SimPowerSystem que é a combinação de circuitos elétricos e equipamentos que envolvem conversão eletromecânica como transformadores, motores e geradores. O SimPowerSystem é na verdade um bloco de modelos dedicados que trabalham dentro de uma ferramenta macro do MATLAB chamada Simulink que por sua vez é um ambiente de modelagem de sistemas variados (elétrico, eletrônico, mecânico, termodinâmico).

3.2 DIAGRAMA UNIFILAR

A seguir apresentamos o diagrama unifilar do sistema modelado onde os blocos descritos podem ser identificados em suas funções elétricas.

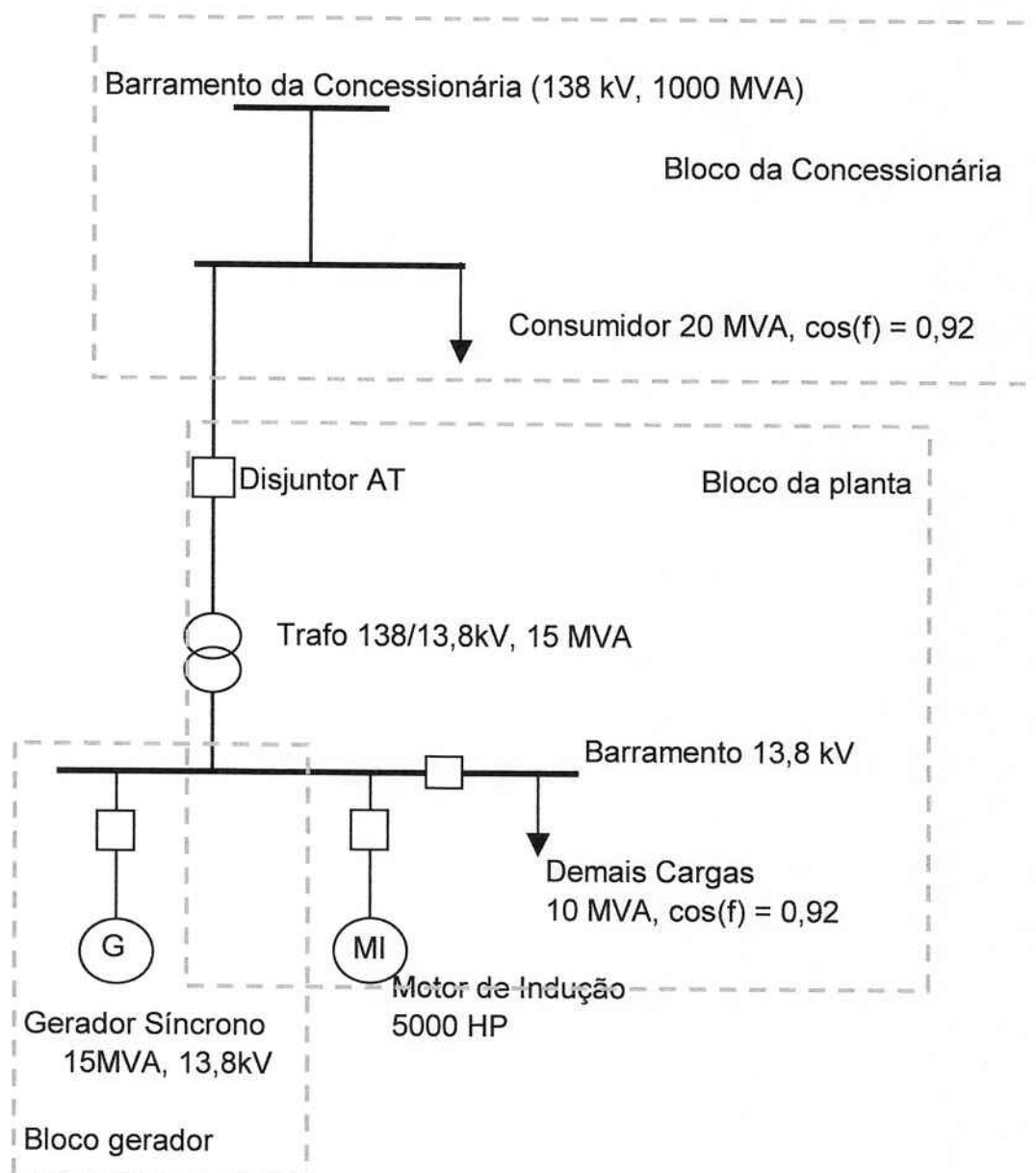


Figura 3.1 – Diagrama unifilar adotado

A planta apresentada e escolhida para ser simulada segue o mesmo padrão de trabalhos anteriores de conclusão de graduação e pós-graduação realizados na Escola Politécnica da USP.

Podemos observar que a planta é do tipo auto-suficiente, ou seja, quando isolada do barramento da concessionária ainda assim pode operar toda a carga presente em sua planta sem a necessidade de cortes de carga já que o gerador tem capacidade para produzir até 15 MVA e a soma das cargas presentes resulta em 13,73MVA.

Com o gerador isolado, o barramento de média tensão, onde estão conectadas as cargas da planta, é alimentado por um transformador trifásico abaixador de 15MVA com relação de transformação 138/13.8 kV e assim pode também alimentar todas as cargas da planta.

No entanto todas as cargas estão sendo alimentadas pelo mesmo barramento e esta característica determina que para que possa ser feita a seleção de cargas os sistemas de proteção de cada uma devem estar devidamente ajustados e, ainda, é necessário que as cargas possuam disjuntores dedicados.

Portanto, percebe-se que a alimentação desta planta está sobre-dimensionada situação que pode ser compreendida por um planejamento de expansão da carga ou ainda por ocasião da venda de energia elétrica do produtor para a concessionária, circunstância comum atualmente, mas que não é objeto de estudo deste trabalho.

3.3 PLANTA MODELADA

Baseado no diagrama unifilar apresentado, foram então modelados os elementos que o compõem o sistema, sendo abaixo apresentado o modelo conforme criado no Matlab.

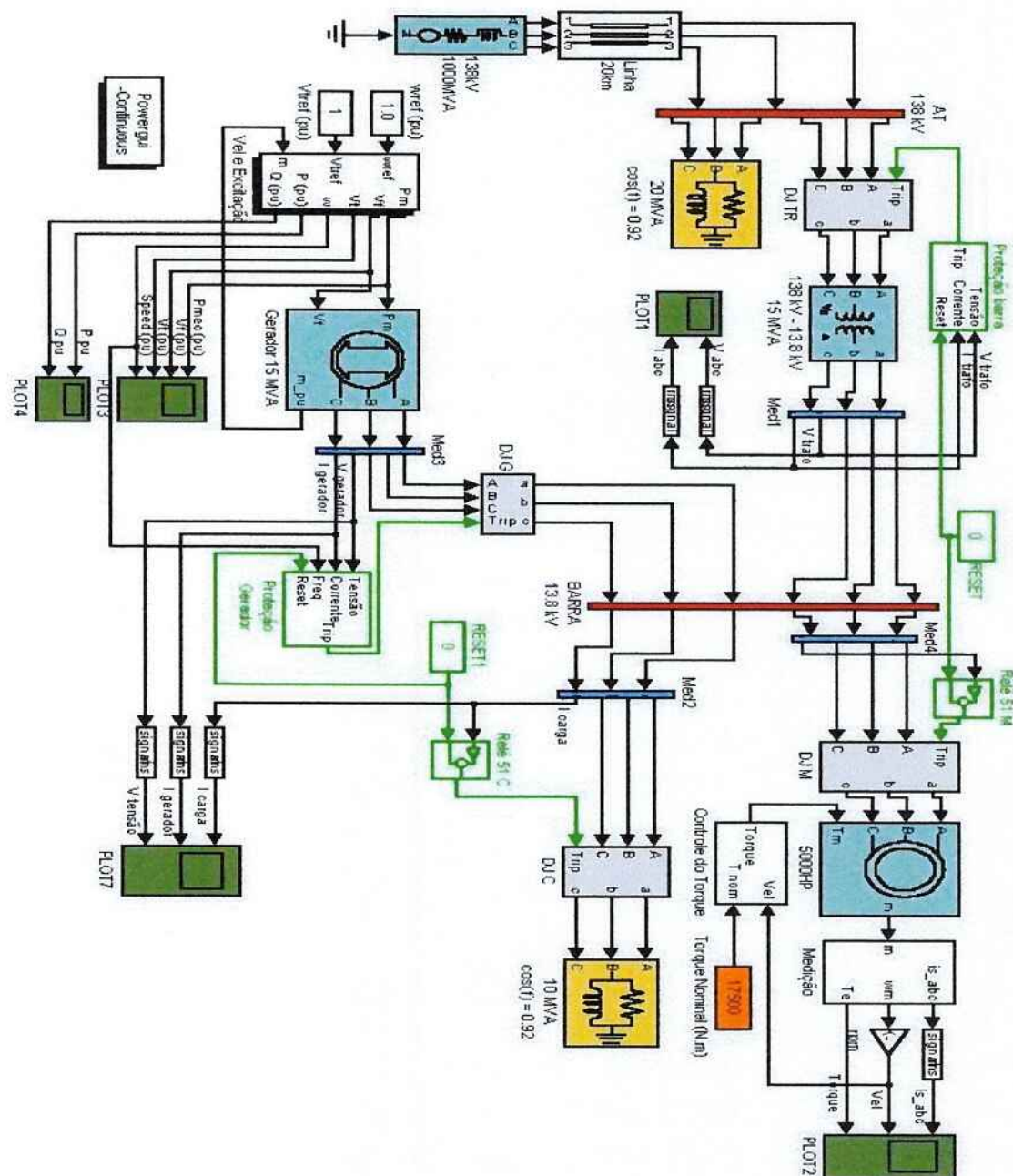


Figura 3.2 – Sistema modelado no matlab

Portanto temos um sistema constituído por elementos que simulam o comportamento do:

- Barramento da concessionária
- Linha de Transmissão
- Consumidor vizinho
- Transformador de Potência 30MVA
- Barramento 13.8kV onde estão conectados:
 - Motor 5000HP
 - Gerador 15MVA
 - Demais cargas da planta

No modelo é possível observar a presença de elementos que são necessários para a simulação da planta, mas que não foram apresentados nos blocos já que não realizam funções primárias, como a conversão eletromecânica de energia, e que serão detalhados abaixo.

Os disjuntores são equipamentos que realizam a interrupção de corrente, seja ela corrente de regime ou corrente de curto-circuito. São equipamentos caros, porém essenciais já que são eles que interrompem situações que podem levar a sérios danos na instalação, como o próprio curto-circuito mencionado.

Os transformadores de instrumentação, que no modelo estão representados por barras de medição, têm a função de criar um espelho da corrente e da tensão no ponto onde estão inseridos em níveis de tensão e corrente que podem ser lidos e trabalhados por equipamentos eletrônicos como os relés de proteção e medidores de energia. Para esta simulação as saídas destas barras de medição são as entradas dos relés modelados e dos gráficos usados para o acompanhamento e análise da simulação.

No modelo apresentado ainda podem ser identificados os blocos de plotagem que recebem um sinal em sua entrada e geram gráficos destes sinais de forma

a tornar possível a visualização dos parâmetros que são importantes para a análise da simulação.

Finalmente, existem blocos que formam subsistemas com funções específicas que serão melhor detalhas posteriormente.

3.4 MODELOS UTILIZADOS

Apresentaremos a seguir os modelos básicos que foram utilizados na constituição do sistema. Estes modelos transformam os parâmetros neles inseridos em modelos matemáticos que são agrupados e trabalhados no matlab.

3.4.1 Cargas RL

Para o modelamento de cargas ordinárias como grupos de pequenos motores, cargas secundárias, consumidores vizinhos, ou seja, cargas que não são de interesse o estudo de seu comportamento eletromecânico dinâmico foi utilizado o modelo definido no matlab como *3-phase parallel RLC load*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

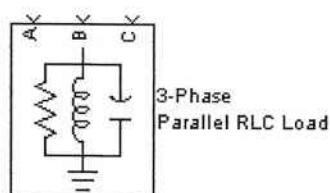


Figura 3.3 – Modelo de cargas RL

Para o sistema modelado temos presentes as seguintes cargas utilizando este modelo:

Consumidor Vizinho

$$V_n (\text{rms}) = 138\text{kV}$$

$$F_n = 60\text{Hz}$$

$$P = 18.6 \text{ MW}$$

$$Q = 7.84 \text{ MVar (indutivo)}$$

Resultando em uma carga com 20MVA e $\cos(f) = 0.92$

Demais Cargas da Planta

$$V_n (\text{rms}) = 13.8\text{kV}$$

$$F_n = 60\text{Hz}$$

$$P = 9.2 \text{ MW}$$

$$Q = 3.92 \text{ MVar (indutivo)}$$

Resultando em uma carga com 10MVA e $\cos(f) = 0.92$

3.4.2 Barramento da Concessionária

Para o modelamento do barramento da concessionária fornecedora de energia elétrica local foi utilizado o modelo definido no matlab como *3-phase inductive source – undergrounded neutral*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

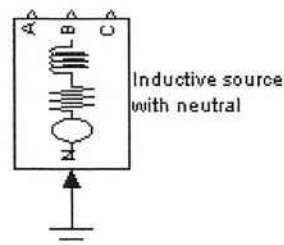


Figura 3.4 – Modelo de Barramento da Concessionária

Para o sistema modelado temos presente a seguinte barra de geração utilizando este modelo:

Barramento da Concessionária

$$V_{fn} \text{ (pico)} = (138/\sqrt{3})\times\sqrt{2} \text{ kV}$$

$$F_n = 60\text{Hz}$$

$$R = 138^2/1000/10 \ \Omega$$

$$L = 138^2/1000/377 \text{ H}$$

3.4.3 Linha de Transmissão

Para o modelamento da linha de transmissão entre a concessionária e o barramento da planta foi utilizado o modelo definido no matlab como *distributed parameters line*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

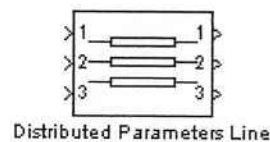


Figura 3.5 – Modelo de linha de transmissão

Para o sistema modelado temos presente a seguinte linha de transmissão utilizando este modelo:

Linha 20km

$$N^{\circ} \text{ de fases} = 3$$

$$F_n = 60\text{Hz}$$

$$R/\text{km} = [0.01273 \ 0.3864] \ \Omega/\text{km} \ (R_0 \ R_1)$$

$$L/\text{km} = [0.9337\text{e-}3 \ 4.1264\text{e-}3] \text{ H}/\text{km} \ (L_0 \ L_1)$$

$$C/\text{m} = [12.74\text{e-}9 \ 7.751\text{e-}9] \text{ F}/\text{km} \ (C_0 \ C_1)$$

$$\text{Comprimento} = 20\text{km}$$

3.4.4 Transformador de Potência

Para o modelamento do transformador de potência abaixador localizado na planta industrial foi utilizado o modelo definido no matlab como *three phase transformer (two windings)*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

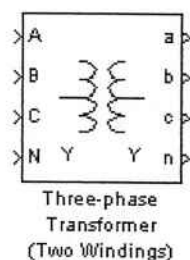


Figura 3.6 – Modelo de transformador de potência

Para o sistema modelado temos presente o seguinte transformador de potência utilizando este modelo:

Transformador de Potência Abaixador

$S_n = 15 \text{ MVA}$

$F_n = 60 \text{ Hz}$

Enrolamento AT = [138e3 , 0.0015 , 0.03] - [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1 (pu)]

Enrolamento BT = [13800 , 0.0015 , 0.03] - [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2 (pu)]

Conexão = Yd

$R_m = 70 \text{ pu}$

$L_m = 120 \text{ pu}$

3.4.5 Motor de Indução

Para o modelamento do motor de indução de 5000HP localizado na planta industrial foi utilizado o modelo definido no matlab como *asynchronous machine*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

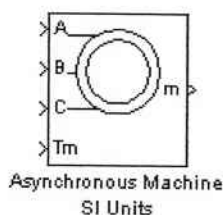


Figura 3.7 – Modelo de motor de indução

Para o sistema modelado temos presente o seguinte motor de indução utilizando este modelo:

Motor 5000HP

Tipo de rotor = Gaiola de Esquilo (Squirrel-Cage)

Referência = Rotor

$S_n = 5000 \times 746 \text{ VA}$

$V_n(\text{rms}) = 13800 \text{ V}$

$F_n = 60 \text{ Hz}$

$R_s = 0.431465561 \, \Omega$ (estator)

$L_s = 3.362456122/377 \text{ H}$ (estator)

$R_r = 0.32731875 \, \Omega$ (rotor)

$L_r = 3.36245625/377 \text{ H}$ (rotor)

$L_m = 30/377 \text{ H}$

Inércia = $75 \text{ J}(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$

Fator de fricção = $0.3 \text{ F}(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$

Pares de pólo = 2

3.4.6 Máquina Síncrona

Para o modelamento do gerador de 15MVA localizado na planta industrial foi utilizado o modelo definido no matlab como *synchronous machine*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

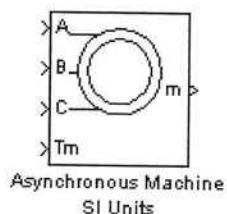


Figura 3.8 – Modelo de máquina síncrona

Para o sistema modelado temos presente a seguinte máquina síncrona utilizando este modelo:

Gerador 15MVA

Rotor = Pólos Salientes

$S_n = 15\text{MVA}$

$V_n = 13800\text{V}$

$F_n = 60\text{Hz}$

$X_d = 1.859 \text{ pu}$

$X_d' = 0.196 \text{ pu}$

$X_d'' = 0.149 \text{ pu}$

$X_q = 1.682 \text{ pu}$

$X_q'' = 0.159 \text{ pu}$

$X = 0.09 \text{ pu}$

Constantes de tempo de eixo direto = curto-circuito

Constantes de tempo de eixo de quadratura = circuito aberto

$T_d' = 0.562 \text{ s}$

$T_d'' = 0.0251 \text{ s}$

$T_{qo}'' = 0.315 \text{ s}$

$R_s = 0.0036 \text{ pu}$

Coeficiente de Inércia = 2.25

Par de pólos = 2

3.4.7 Disjuntor

Para o modelamento dos disjuntores localizados na planta industrial foi utilizado o modelo definido no matlab como *3-phase circuit breaker*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

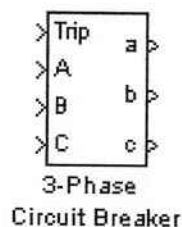


Figura 3.9 – Modelo de disjuntor

Para o sistema modelado temos presentes os seguintes disjuntores utilizando este modelo:

Disjuntor do gerador (DJ G)

Disjuntor de Alta Tensão (DJ T)

Disjuntor do Motor (DJ M)

Disjuntor do alimentador das demais cargas (DJ C)

3.4.8 Barras de Medição

Para o modelamento dos transformadores de instrumentação localizados na planta industrial foi utilizado o modelo definido no matlab como *Three-Phase V-I Measurement*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

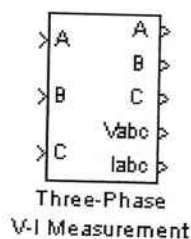


Figura 3.10 – Modelo de barra de medição

De forma a otimizar a área ocupada pelo sistema e assim tornar a visualização do mesmo mais fácil, estas barras foram comprimidas em seu tamanho e podem ser identificadas no modelo mostrado pelas barras azuis. Para o sistema modelado temos presentes as seguintes barras de medição utilizando este modelo:

Barra de medição do Gerador

Barra de medição do Transformador

Barra de medição do Motor (DJ M)

Barra de medição do alimentador das demais cargas

3.4.9 Gráficos

Para a aquisição dos sinais analisados foi utilizado o modelo definido no matlab como *Plot*, que poderá ser identificado no modelo da planta pela figura abaixo:

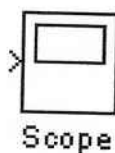


Figura 3.11 – Modelo de gráficos

Para o sistema modelado temos presentes os seguintes gráficos utilizando este modelo:

Gráfico da tensão e corrente do transformador de potência – plot 1

Gráfico da corrente, velocidade do rotor e torque do motor – plot 2

Gráfico da potência mecânica, tensão de excitação, tensão de fase e velocidade do gerador – plot 3

Gráfico da potência ativa e potência reativa do gerador – plot 4

Gráfico da corrente das cargas secundárias e corrente e tensão do gerador – plot 7

3.5 SUBSISTEMAS

Para a modelagem de blocos com funções específicas foram usados e/ou desenvolvidos subsistemas próprios destinados a estas finalidades. Abaixo apresentamos os subsistemas utilizados e/ou desenvolvidos presentes no modelo.

3.5.1 Controle de Tração Aplicado ao Eixo do Motor 5000HP

O controle de tração aplicado ao eixo do motor de 5000HP tem a função de simular uma carga cuja tração varia de acordo com a velocidade do motor, mas não em sua totalidade, pois uma parcela deste torque, 20%, é fixo. Quando somadas as duas parcelas, na velocidade nominal do motor, teremos aplicado 17500 N.m ao eixo do motor.

Abaixo podemos observar internamente a constituição deste subsistema:

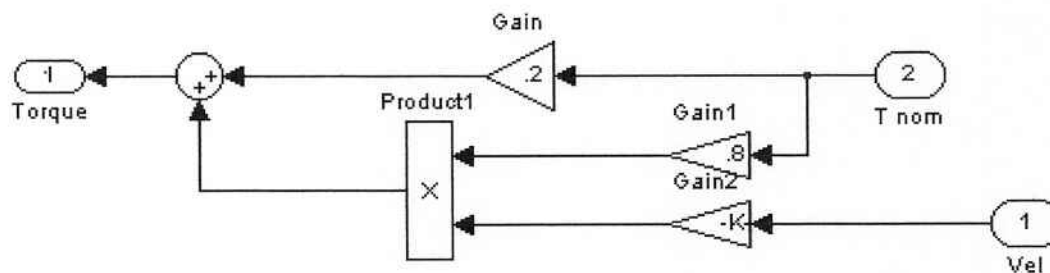


Figura 3.12 – Subsistema de tração do motor de indução

A velocidade instantânea do motor é dividida por 17500 em sua entrada de forma a obtermos seu valor em pu, em seguida passa por um bloco multiplicador onde contribui em 80% no valor do torque do motor quando este está com sua velocidade nominal.

3.5.2 Controlador de Velocidade e Tensão

Estes dois controladores constituem a malha de controle do gerador e são responsáveis diretamente pelas repostas do mesmo as oscilações do sistema a que o mesmo for exposto.

Este subsistema foi extraído de um exemplo de aplicação do MATLAB onde fazia o controle um gerador de 15MVA, porém, gerando energia em 2400V. Seus parâmetros foram adaptados de forma que o gerador respondesse adequadamente as oscilações a que foi exposto.

Abaixo podemos conferir este subsistema e seus desmembramentos:

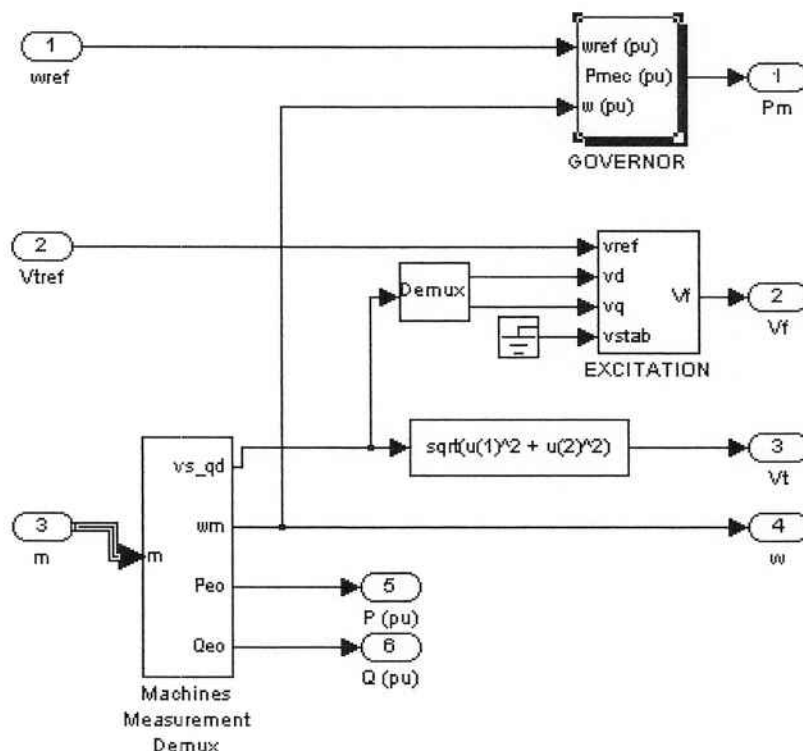


Figura 3.13 – Subsistema controlador do gerador

O sistema de controle de velocidade e excitação da máquina síncrona possui três entradas que são: a rotação e tensão de referência (fixas em 1pu) e os dados de saída do gerador.

Para o sistema de controle de excitação, especificamente, as entradas são os valores de referência da excitação, o potencial de terra e as tensões direta e de quadratura, obtidas da saída da própria máquina. Abaixo podemos observar a malha de controle da tensão de excitação.

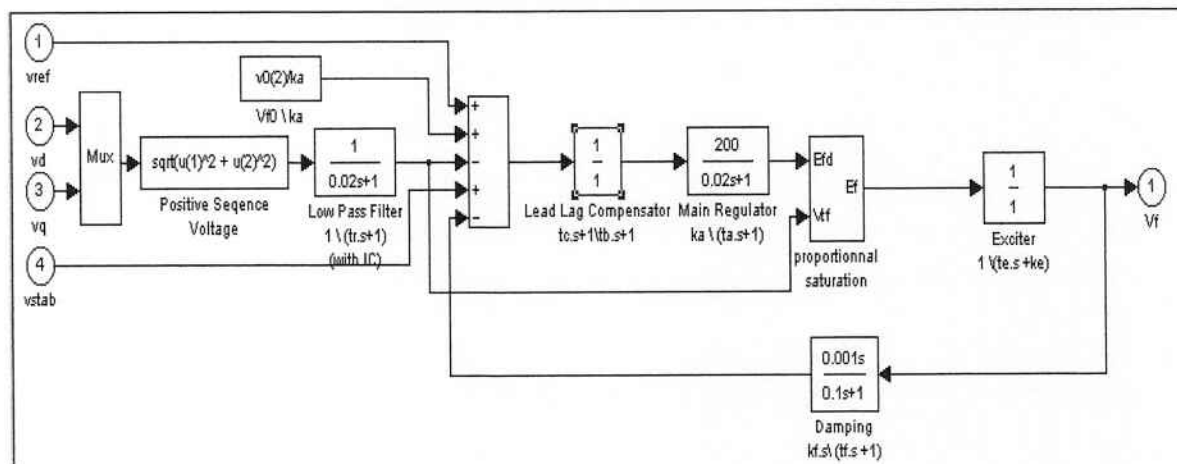


Figura 3.14 – Subsistema de controle da excitação do gerador

Para o sistema de controle da velocidade as entradas são a velocidade de referência e a velocidade instantânea do eixo da máquina. Abaixo podemos observar a malha de controle de velocidade da máquina síncrona.

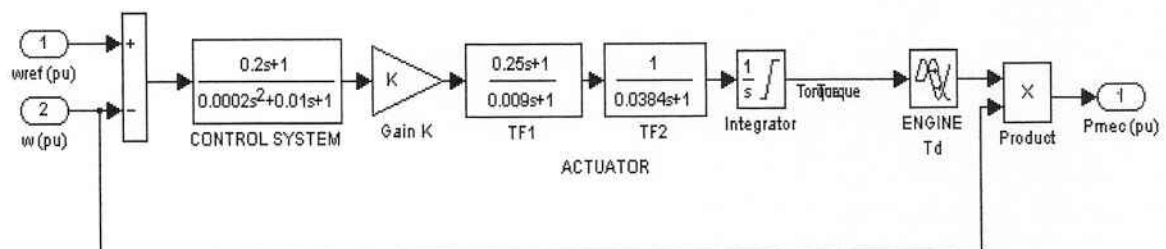


Figura 3.15 – Subsistema de controle de velocidade do gerador

As saídas do sistema de controle do gerador são a potência mecânica entregue ao eixo do gerador, tensão de excitação e informações sobre o estado do gerador como tensão de linha, velocidade do eixo, potência ativa e potência reativa.

3.5.3 Sistema de Proteção

Para o sistema de proteção foram modelados cinco relés: relé de sobrecorrente (função 51), relé de tensão de neutro (função 59N), relé de sobretensão (função 59), relé de subtensão (função 27) e relé de frequência (função 87).

Estes relés tiveram suas funcionalidades e características modeladas através das premissas definidas conforme o livro *Protective Relaying*, J. Lewis Blackburn, referência no assunto.

Para os casos de curto-circuito o relé de sobrecorrente 51 seria capaz de identificar e atuar o disjuntor. No entanto, para curtos-circuitos monofásicos localizados a montante do transformador Yd de entrada da planta não existe contribuição de corrente por parte da planta e assim, este curto-circuito não seria localizado pelo relé 51. Para este caso foi modelado o relé 59N, que através da elevação da tensão de sequência negativa localiza faltas mesmo à montante do transformador de potência trifásico já que utiliza tensão ao invés de corrente para identificação da falta.

Os demais relés simulados têm a função de desligar o gerador caso este passe a operar em condições inadequadas colocando em risco a estabilidade do sistema.

Ao final, temos os disjuntores do motor e das cargas monitorados por relés de sobrecorrente e os disjuntores do gerador e da interligação monitorado pelos relés de sobrecorrente, sobretensão, subtensão e frequência e tensão de neutro.

Para a compreensão dos relés modelados, estes serão discutidos individualmente a seguir.

3.5.3.1 RELÉ DE SOBRECORRENTE – FUNÇÃO 51

A função do relé de sobrecorrente temporizado é, a partir da leitura da corrente determinar um tempo para a abertura do disjuntor. Este período de espera tem a função de não desligar uma parte do sistema em caso de situações onde a perturbação é temporária e em intensidade tal que não causa danos aos elementos do sistema. Ainda, esse tempo pode ser ajustado de forma a se realizar a seleção de cargas em um sistema, desligando primeiramente aquelas cujo desligamento afeta de forma menos prejudicial o processo como um todo.

O relé possui uma interface de entrada onde podem ser selecionadas as curvas típicas de tempo de atuação Inversa, Muito Inversa e Extremamente Inversa conforme norma IEC. Além das curvas podemos selecionar a corrente de pickup e o dial de tempo (TD). Com estes ajustes torna-se possível a realização das seletividade de cargas.

Abaixo podemos observar a interface ajustável do relé:

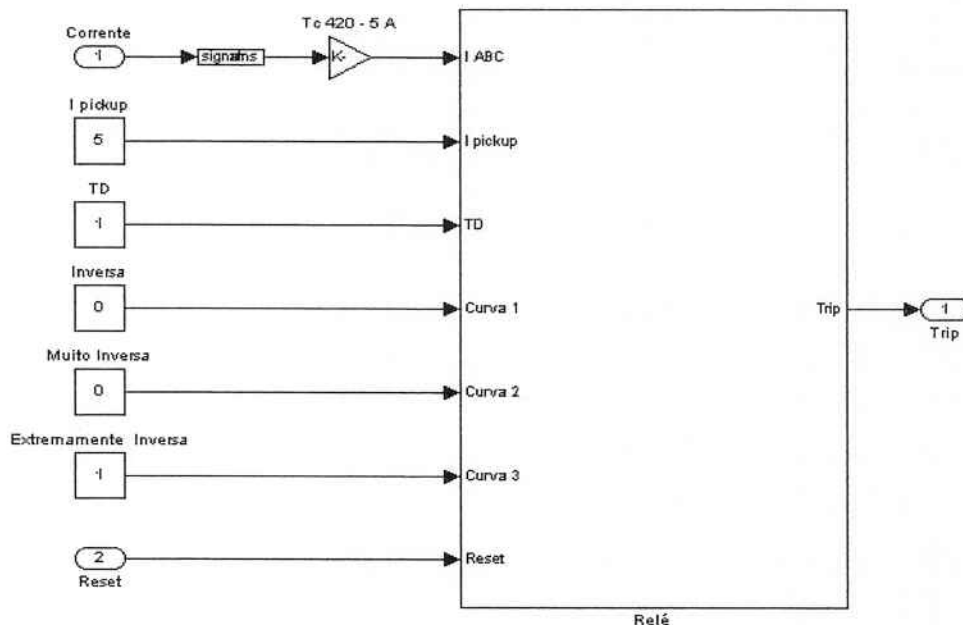


Figura 3.16 – Interface do relé 51

As entradas do relé são as correntes trifásicas no ponto elétrico onde o mesmo está inserido. Estas correntes são transformadas em valores rms e em seguida passam por um ganho que modela um transformador de corrente.

As entradas acima seguem para o subsistema onde o relé efetivamente processa suas entradas, tal subsistema pode ser observado abaixo:

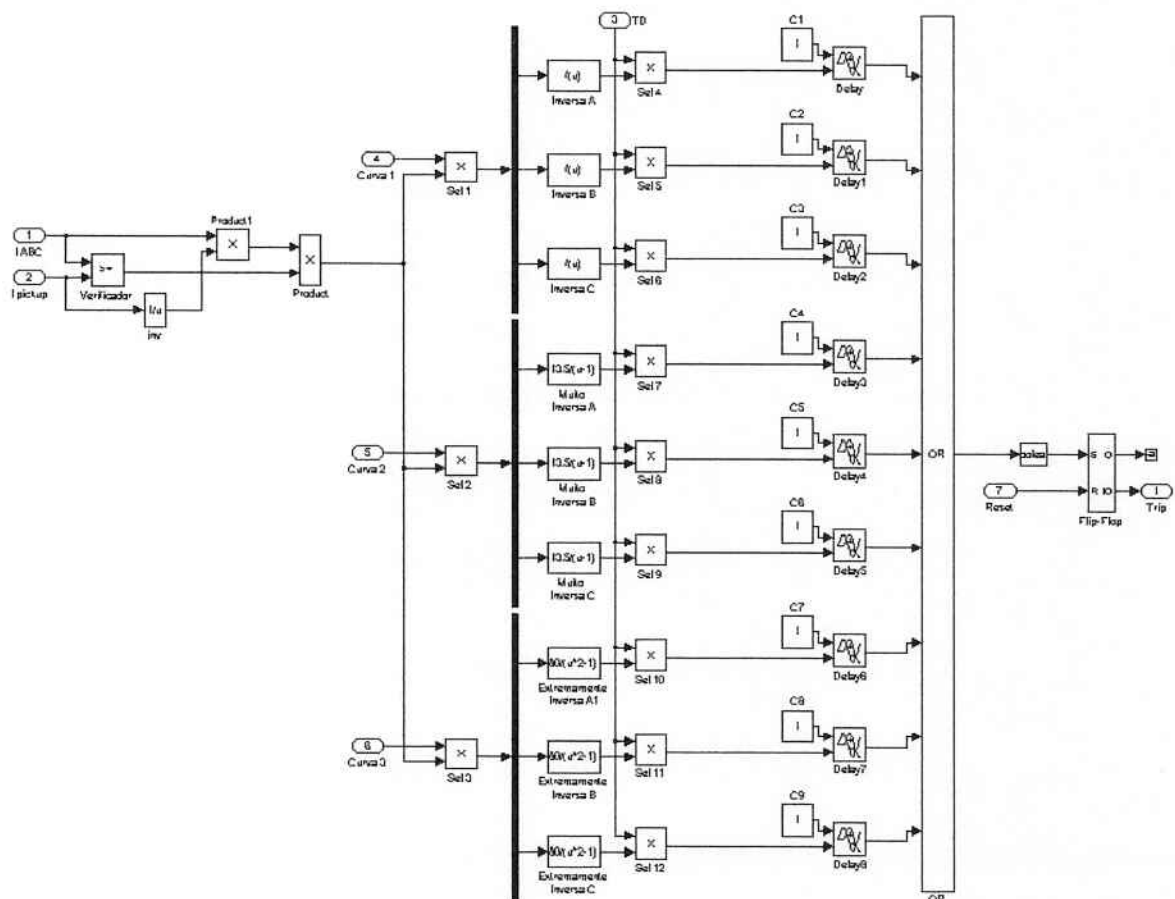


Figura 3.17 – Relé 51

Caso a corrente de linha ultrapasse o valor da corrente ajustável I pickup, o sinal de corrente passa por uma função que determina o tempo de atuação, de acordo com a curva de tempo escolhida. Este tempo de atuação é multiplicado pelo dial de tempo e em seguida passa a ser uma das entradas do bloco atrasador de sinais. O bloco atrasador possui duas entradas, uma delas é o próprio sinal de trip do disjuntor e a outra é o tempo que este sinal será atrasado.

Na malha apresentada existe um flip-flop que assegura que dado o trip, o disjuntor só será fechado novamente quando houver uma ordem expressa do operador. Esta ordem é o reset.

É possível ainda observar outros blocos presentes na malha cuja função é a transformação da formatação do sinal. Por exemplo, blocos de funções lógicas só aceitam em sua entrada valores booleanos e por isso muitas vezes precisamos alterar a natureza do sinal.

O relé de sobrecorrente está aplicado em todos os disjuntores existentes no modelo.

3.5.3.2 RELÉ DE SOBRETENSÃO – FUNÇÃO 59

O relé de sobretensão tem a função de abrir o disjuntor caso o sistema esteja exposto a uma dada tensão acima da tensão nominal por um intervalo de tempo suficiente para causar danos ao equipamento a ser protegido.

Este relé está aplicado na proteção do gerador e da interligação com a concessionária.

Abaixo podemos observar a interface ajustável do relé:

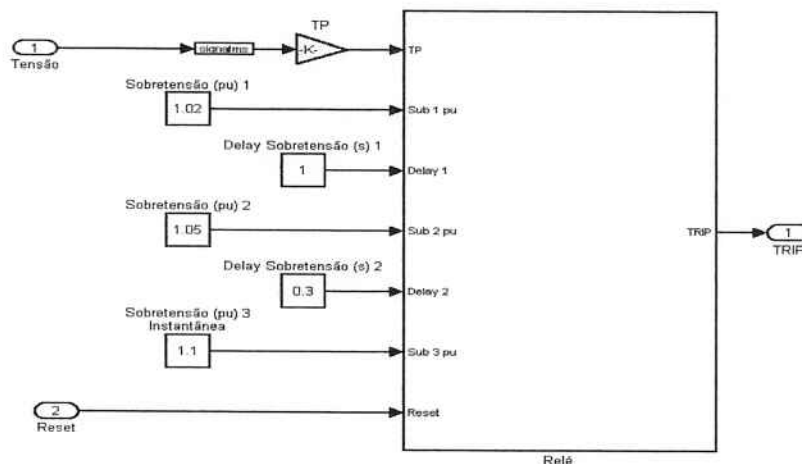


Figura 3.18 – Interface do relé 59

A entrada deste relé é a tensão local, que é transformada em rms e depois em pu.

É possível especificar dois níveis de sobretensão temporizados e um nível de sobretensão instantâneo. Para os níveis de tensão temporizados o tempo de espera também é ajustável.

O subsistema que realiza as operações do relé pode ser observado abaixo:

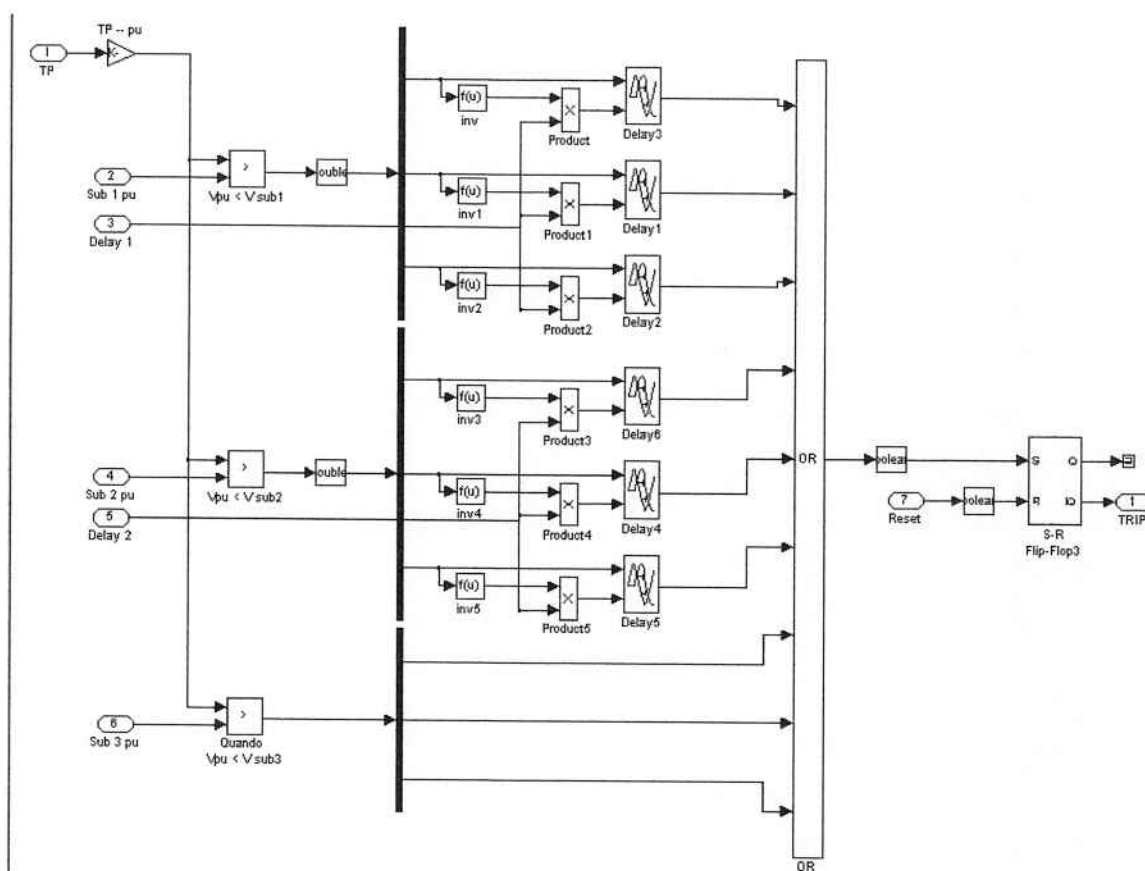


Figura 3.19 – Relé 59

O sinal de tensão, já em pu, é comparado com os níveis de sobretensão pré-estabelecidos seguindo então para o bloco atrasador de tempo no caso dos níveis de sobretensão temporizado ou atuando imediatamente o disjuntor através do trip para o caso de sobretensão instantânea.

3.5.3.3 RELÉ DE SUBTENSÃO – FUNÇÃO 27

O relé de subtensão, inversamente ao de sobretensão, tem a função de abrir o disjuntor caso o sistema esteja exposto a uma dada tensão abaixo da tensão nominal por um intervalo de tempo suficiente para causar danos ao equipamento a ser protegido.

Este relé está aplicado na proteção do gerador e da interligação com a concessionária.

Abaixo podemos observar a interface ajustável do relé:

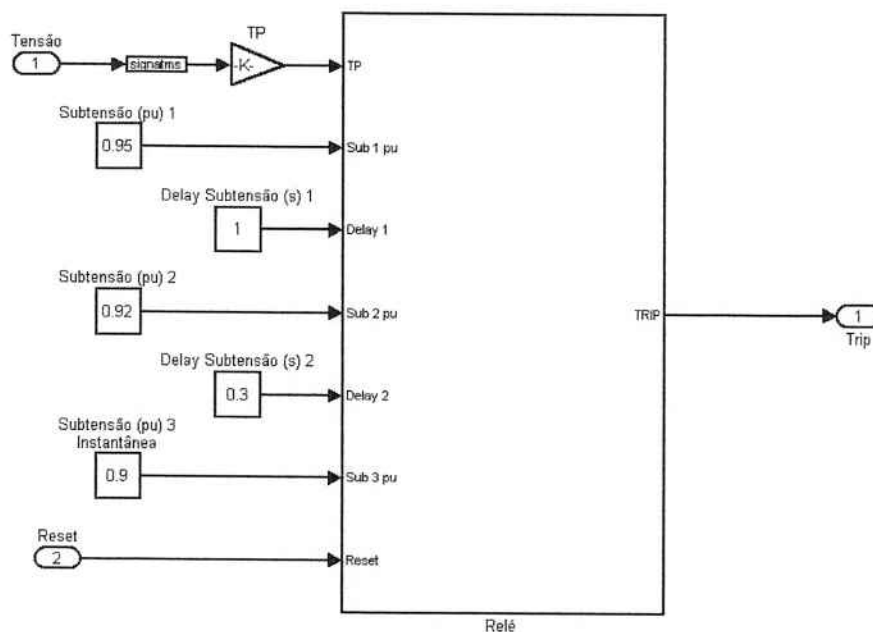


Figura 3.20 – Interface do relé 27

Assim como no relé de sobretensão no relé de subtensão é possível especificar dois níveis de subtensão temporizados e um nível de subtensão instantâneo. Para os níveis de tensão temporizados o tempo de espera também é ajustável.

O subsistema que realiza as operações do relé pode ser observado abaixo:

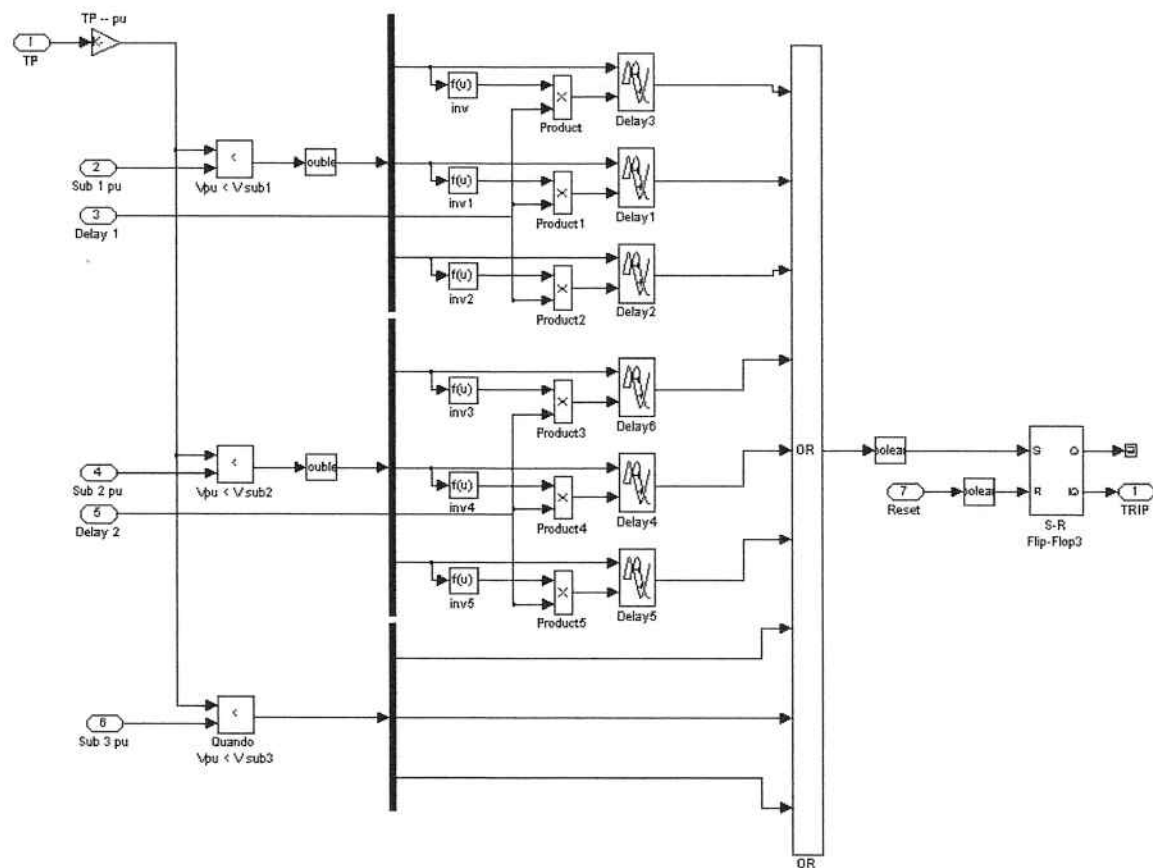


Figura 3.21 – Relé 27

Atuando de forma similar ao relé de sobretensão, o sinal de tensão, já em pu, é comparado com os níveis de subtensão pré-estabelecidos seguindo então para o bloco atrasador de tempo no caso dos níveis de subtensão temporizado ou atuando imediatamente o disjuntor através do trip para o caso de sobretensão instantânea.

3.5.3.4 RELÉ DE FREQUÊNCIA – FUNÇÃO 81

O relé de frequência tem a função de abrir o disjuntor caso o sistema esteja exposto a uma tensão cuja frequência difere daquela esperada por um intervalo de tempo suficiente para causar danos ao equipamento a ser protegido.

Abaixo podemos observar a interface ajustável do relé:

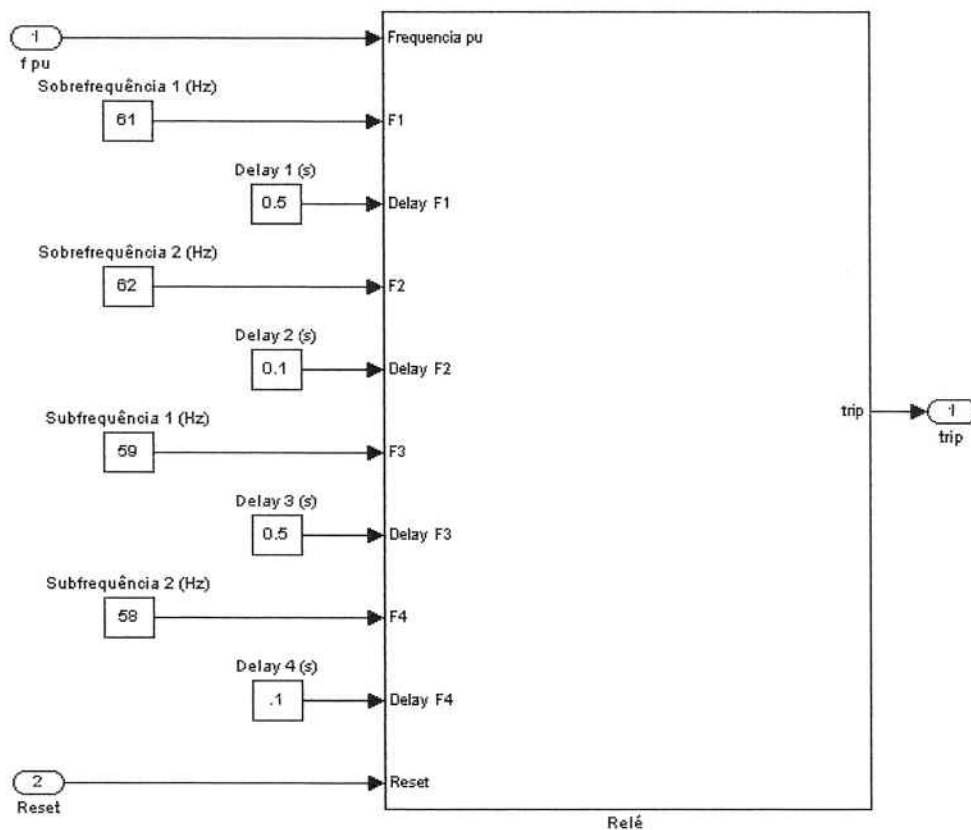


Figura 3.22 – Interface do relé 81

No relé de frequência temos ajustáveis dois níveis de sobre-frequência e dois níveis de sub-frequência além dos tempos de atuação para cada um destes níveis.

O subsistema que realiza as operações do relé pode ser observado abaixo:

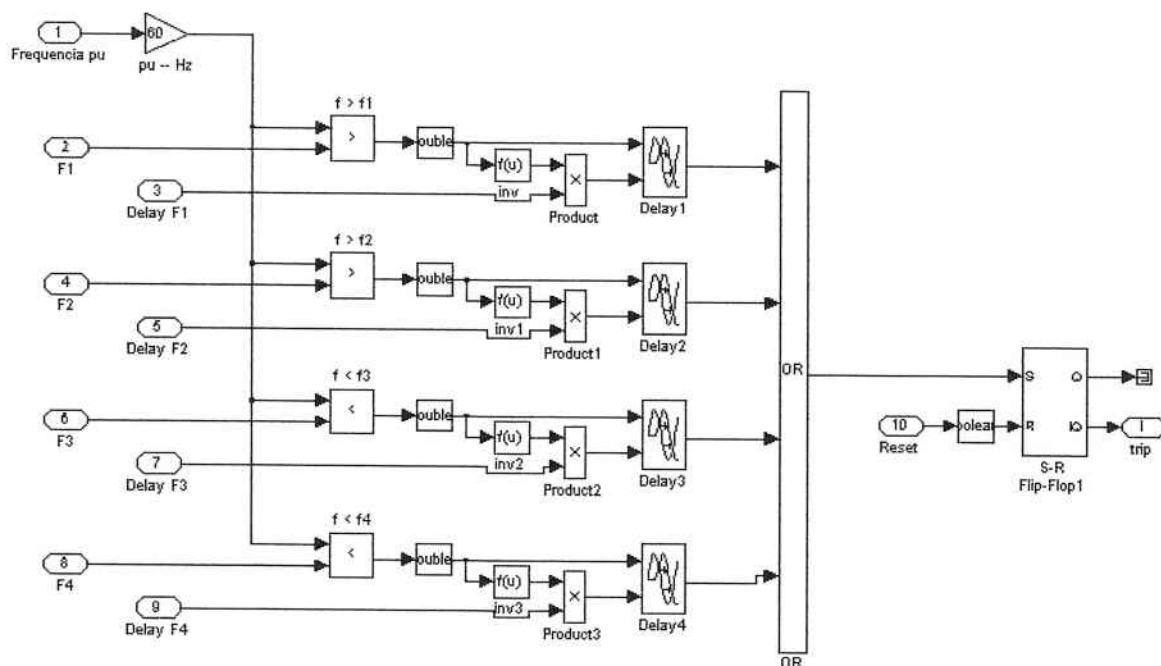


Figura 3.23 – Relé 81

No relé de frequência, o sinal de frequência é comparado com os níveis pré-estabelecidos e caso atinja um destes níveis passa a contar o tempo de atraso para que o trip seja estabelecido.

3.5.3.5 RELÉ DE TENSÃO DE NEUTRO – FUNÇÃO 59N

O relé de tensão de neutro é utilizado para detectar faltas monofásicas a montante de um transformador trifásico ligado em Yd. Este relé precisa ser modelado porque tal tipo de falta não pode ser identificado pelo relé 51 já que não existe contribuição de corrente de curto circuito do gerador para a falta neste caso devido à natureza do mesmo.

O relé de tensão de neutro detecta a falta através da tensão de sequência zero que sofre uma elevação durante o curto.

Abaixo podemos observar a interface ajustável do relé:

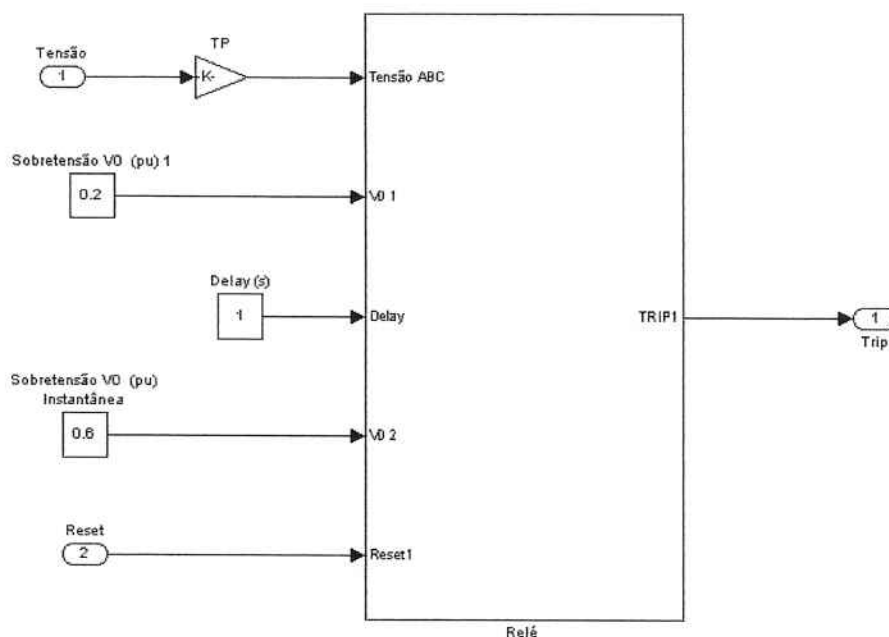


Figura 3.24 – Interface do relé 59N

Podemos ajustar neste relé dois níveis de sobretensão da seqüência zero, sendo o primeiro temporizado e o segundo instantâneo. O tempo de atuação para o primeiro nível de sobretensão também é ajustável.

O subsistema que realiza as operações do relé pode ser observado abaixo:

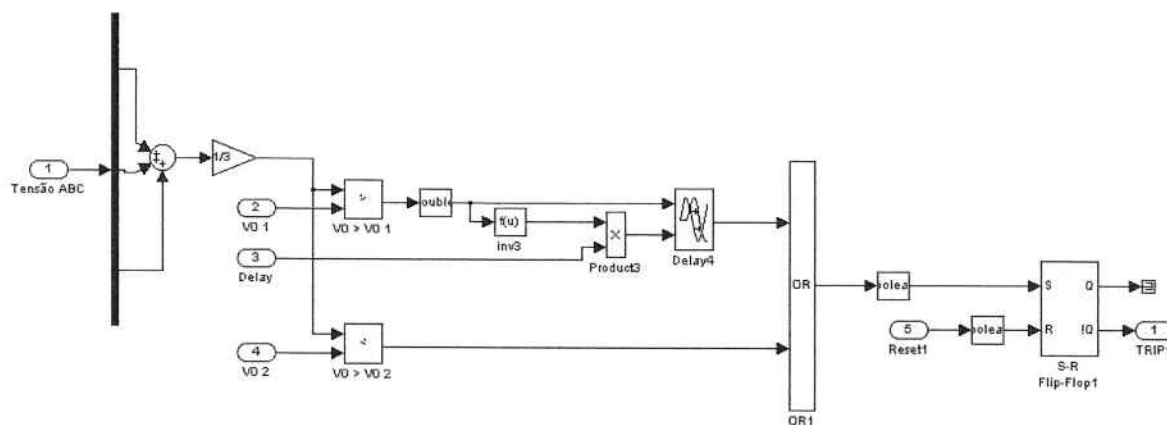


Figura 3.25 – Relé 59N

As tensões V_{an} , V_{bn} e V_{cn} são somadas e divididas por 3, obtendo assim a tensão de seqüência zero. Em seguida, esta tensão é comparada com os níveis pré-estabelecidos e caso ultrapasse um destes níveis irá estabelecer o trip de forma temporizada ou instantânea, dependendo do valor da magnitude da tensão de seqüência zero.

4 SIMULAÇÕES REALIZADAS

Visando a análise do sistema modelado foi proposta a execução da simulação de faltas definidas como curto-circuito trifásico a terra.

As faltas foram realizadas em dois pontos distintos: no alimentador de média tensão que alimenta as demais cargas da planta e no barramento de alta tensão da concessionária.

No primeiro caso estamos buscando analisar o que ocorre com o sistema quando as demais cargas devem ser eliminadas e o motor deve permanecer funcionando. Para ilustrar a finalidade desta simulação podemos imaginar o motor de indução como uma máquina cuja interrupção do fornecimento de energia elétrica durante seu funcionamento causaria avarias à mesma ou a interrupção de um processo de produção com custo alto, enquanto o ponto onde ocorreu o curto-circuito trifásico é um equipamento localizado à jusante do alimentador e de pouco valor agregado ao processo.

Logo, o resultado esperado é a interrupção do fornecimento de energia ao ponto onde ocorreu o curto-circuito através do disjuntor DJ C sem que os demais disjuntores abram, mantendo assim a continuidade de operação do motor de indução.

Podemos ainda observar como se comporta o gerador durante a execução desta simulação.

No segundo caso, o curto-circuito no barramento de alta-tensão deverá provocar o ilhamento do consumidor, passando este a depender unicamente de seu próprio gerador.

Com relação à proteção da planta neste caso, esperamos que apenas o disjuntor à montante do transformador de potência abra, permitindo que todo o processo da planta permaneça em funcionamento.

Visando a objetividade da simulação face à complexidade do sistema e o seu tempo de simulação, algumas atitudes foram tomadas, como a busca pela condição de estabilidade do sistema antes da simulação dos eventos de falta.

No entanto a regulação do estado inicial das máquinas – gerador e motor – é um processo muito sensível e sua perfeita coordenação não foi atingida, o que se pode observar nos instantes iniciais da simulação, onde o sistema leva aproximadamente 1.70s para atingir a estabilidade. O comportamento do sistema até este instante é a busca pelo regime e logo não será analisado do ponto de vista dos eventos simulados.

4.1 CURTO-CIRCUITO NO ALIMENTADOR DAS CARGAS SECUNDÁRIAS

O curto-circuito foi modelado através de um bloco próprio do Matlab e pode ser identificado através da figura abaixo:

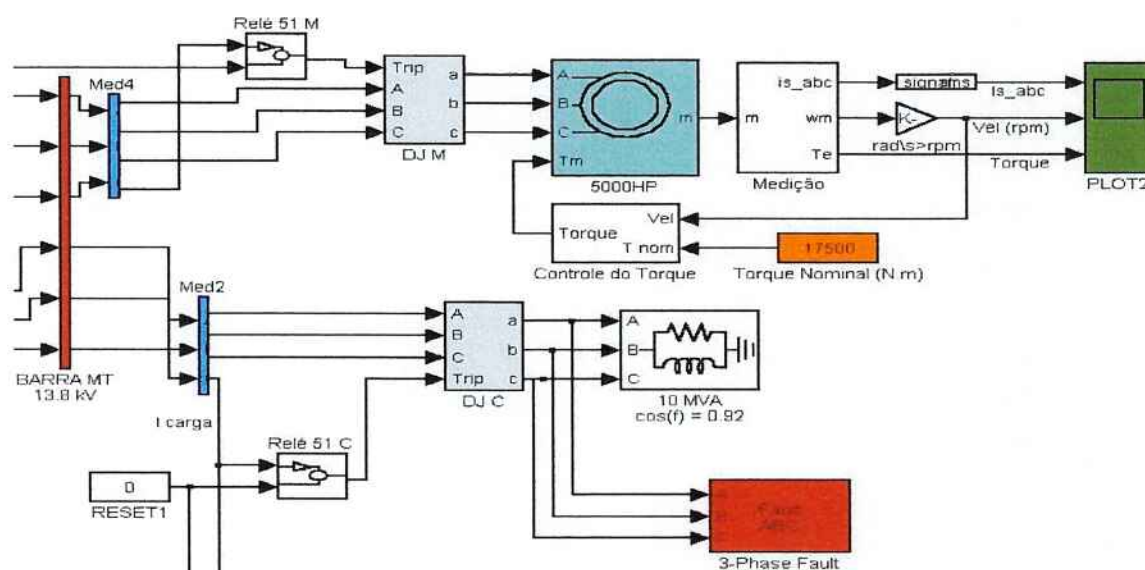


Figura 4.1 – Localização do curto-circuito na média tensão

O curto ocorre no 121º ciclo de simulação, ou seja, aos 2.017s.

Abaixo estão os resultados obtidos:

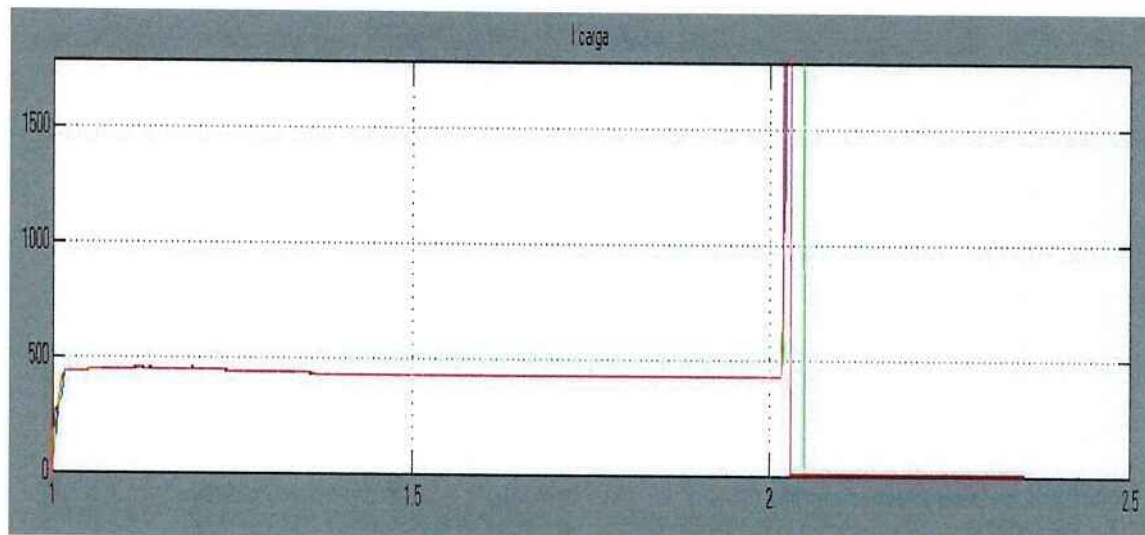


Figura 4.2 – Corrente na carga

Através da figura 4.2, podemos perceber o instante do curto-circuito e sua rápida eliminação através do disjuntor que o antecede. Podemos ainda determinar o tempo da eliminação do curto-circuito que é de aproximadamente dois ciclos, ou 35ms.

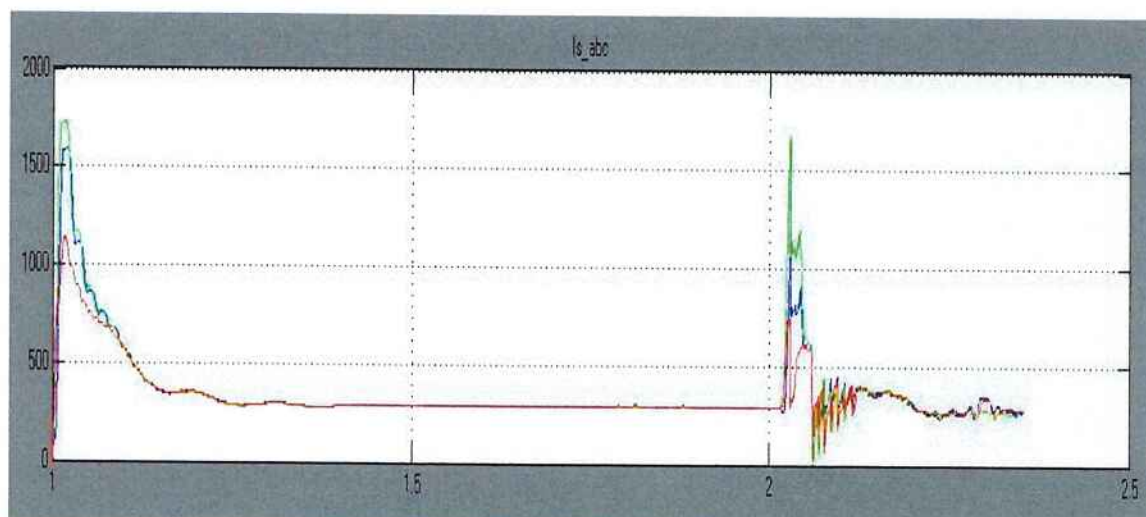


Figura 4.3 – Corrente do motor

Na figura 4.3 podemos observar que no momento do curto o motor fornece corrente ao mesmo, atuando como um gerador, mas após a eliminação deste

curto-circuito o motor volta a sua condição inicial e busca novamente a estabilidade. É importante notar que o disjuntor do motor não abriu e a seletividade de carga foi realizada com êxito

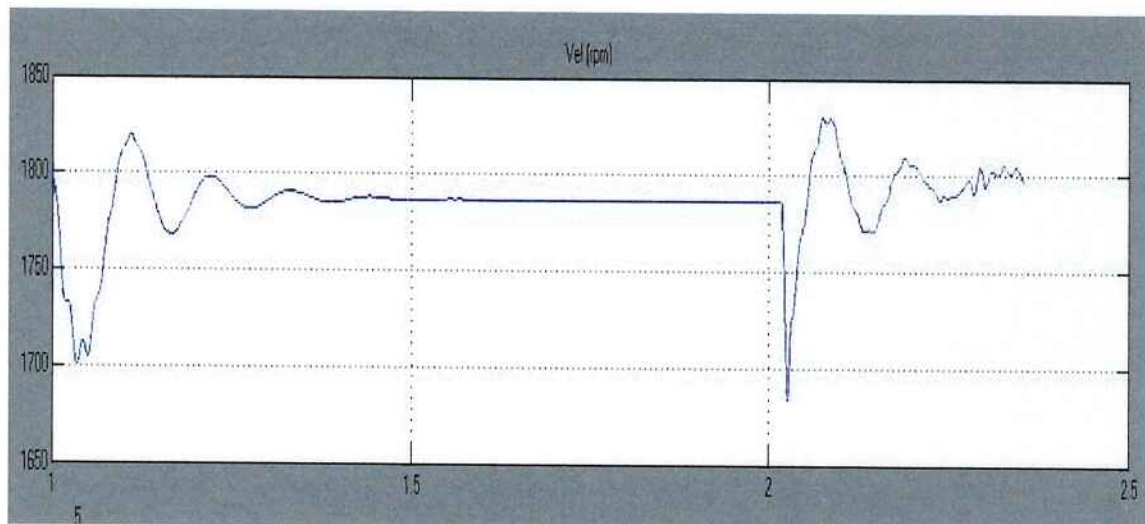


Figura 4.4 – Velocidade do rotor do motor de indução

Na figura 4.4 notamos que a velocidade do rotor do motor cai, porém, após a eliminação da falta também volta a buscar a estabilidade. Se o curto-circuito não tivesse sido rapidamente interrompido a velocidade do motor teria caído a níveis muito baixos.

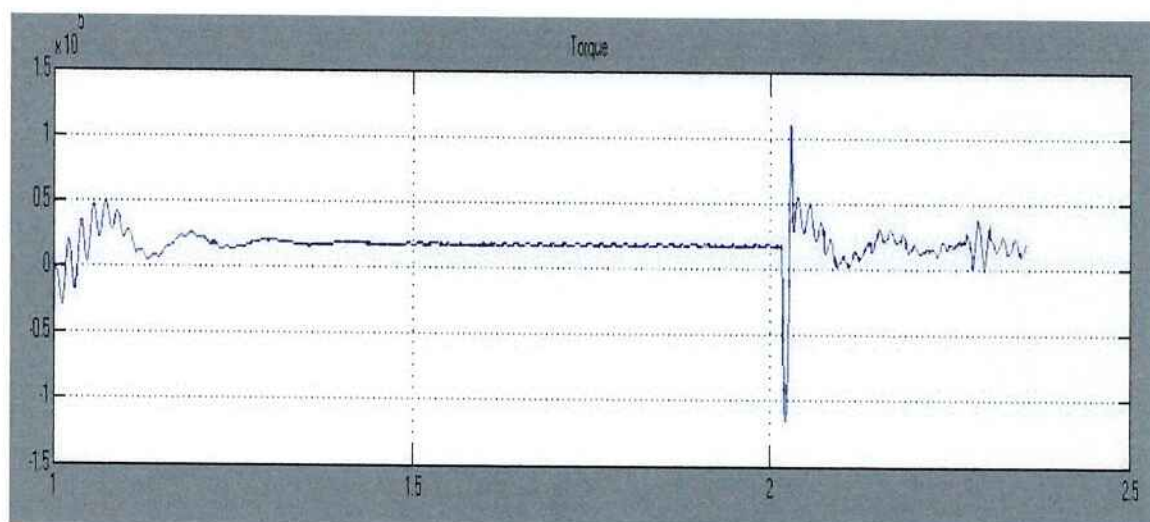


Figura 4.5 – Torque aplicado pelo rotor

Na figura 4.5 temos o comportamento do torque do motor, que apresenta um pico negativo enquanto esta máquina está atuando como gerador, mas que junto com a eliminação do curto retoma o processo de busca pelo regime.

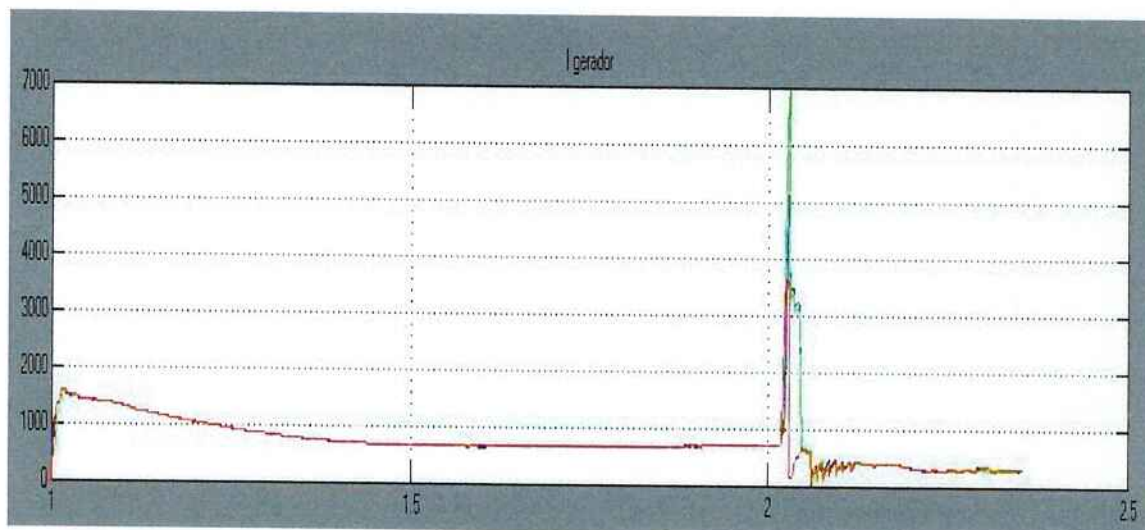


Figura 4.6 – Corrente do gerador

Na figura 4.6 observamos a corrente do gerador saltando quando o curto ocorre, retornando a um patamar menor quando este é eliminado, já que agora a carga da planta foi reduzida. O disjuntor do gerador, conforme pode-se concluir também não abriu desnecessariamente.

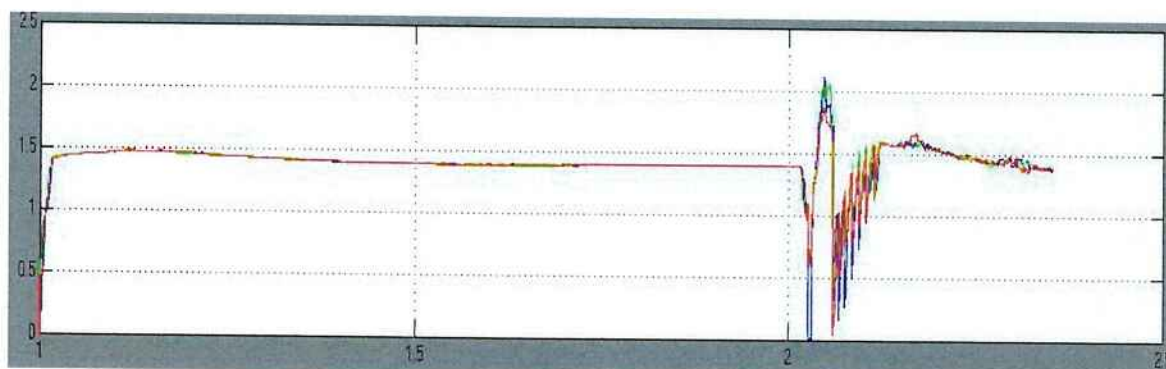


Figura 4.7 – Tensão do gerador

Finalmente, na figura 4.7 podemos observar que a tensão do gerador sofre uma depressão quando ocorre o curto, seguida de um pico quando a carga é eliminada e tendendo ao equilíbrio novamente com o retorno da normalidade ao sistema.

Observa-se ainda, que após a ocorrência de um evento que altera instantaneamente a estabilidade do sistema as respostas dos sinais passam a ser providas de componentes de alta frequências semelhantes a ruídos que não são habituais.

Tal fato pode ser explicado pelo nível de tolerância a erro estipulado pelo usuário visando a redução do tempo de execução da simulação.

Em tempo, o tempo total de simulação desejado era de 4s, porém conforme os gráficos apresentados o programa rodou a simulação até aproximadamente 2.4s quando interrompeu a simulação sem ordem do usuário. Tal evento pode ser explicado por um suposto limite atingido pelo programa, porém nenhum parâmetro relacionado a este tipo de ocorrência pôde ser identificado.

4.2 CURTO-CIRCUITO NA ENTRADA DE ALTA-TENSÃO

O curto-circuito na entrada de alta tensão pode ser compreendido como uma queda da linha de transmissão, um curto-circuito no consumidor vizinho que não tenha sido eliminado ou um próprio curto-circuito no barramento de alta tensão da entrada da subestação de energia da planta cogeradora.

Para este caso, localizamos o curto-circuito conforme a figura abaixo:

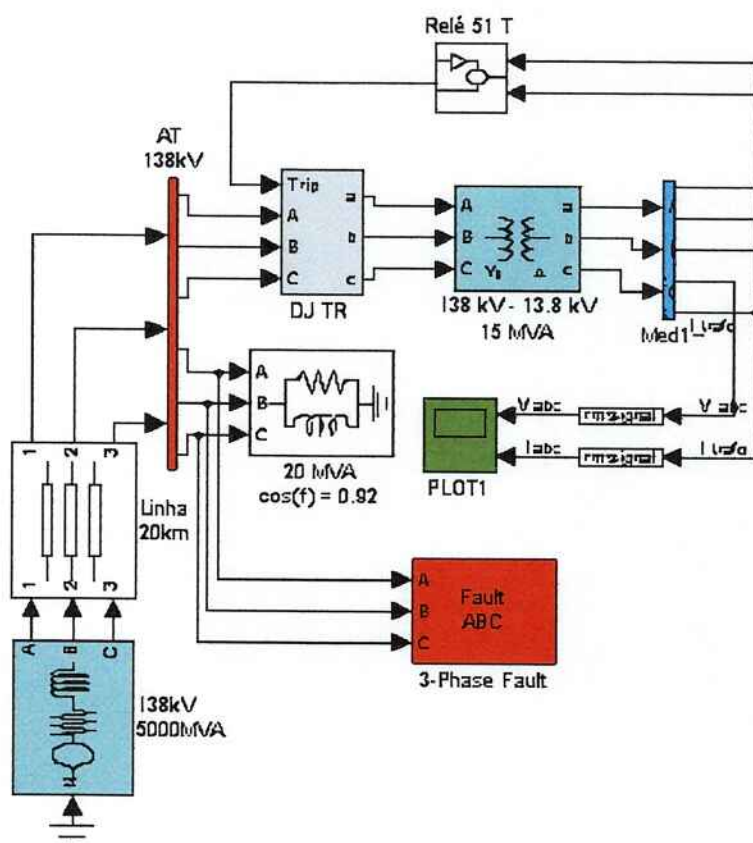


Figura 4.8 – Localização do curto-circuito na alta tensão

O curto ocorre no 121º ciclo de simulação, ou seja aos 2.017s.

Abaixo estão os resultados obtidos:

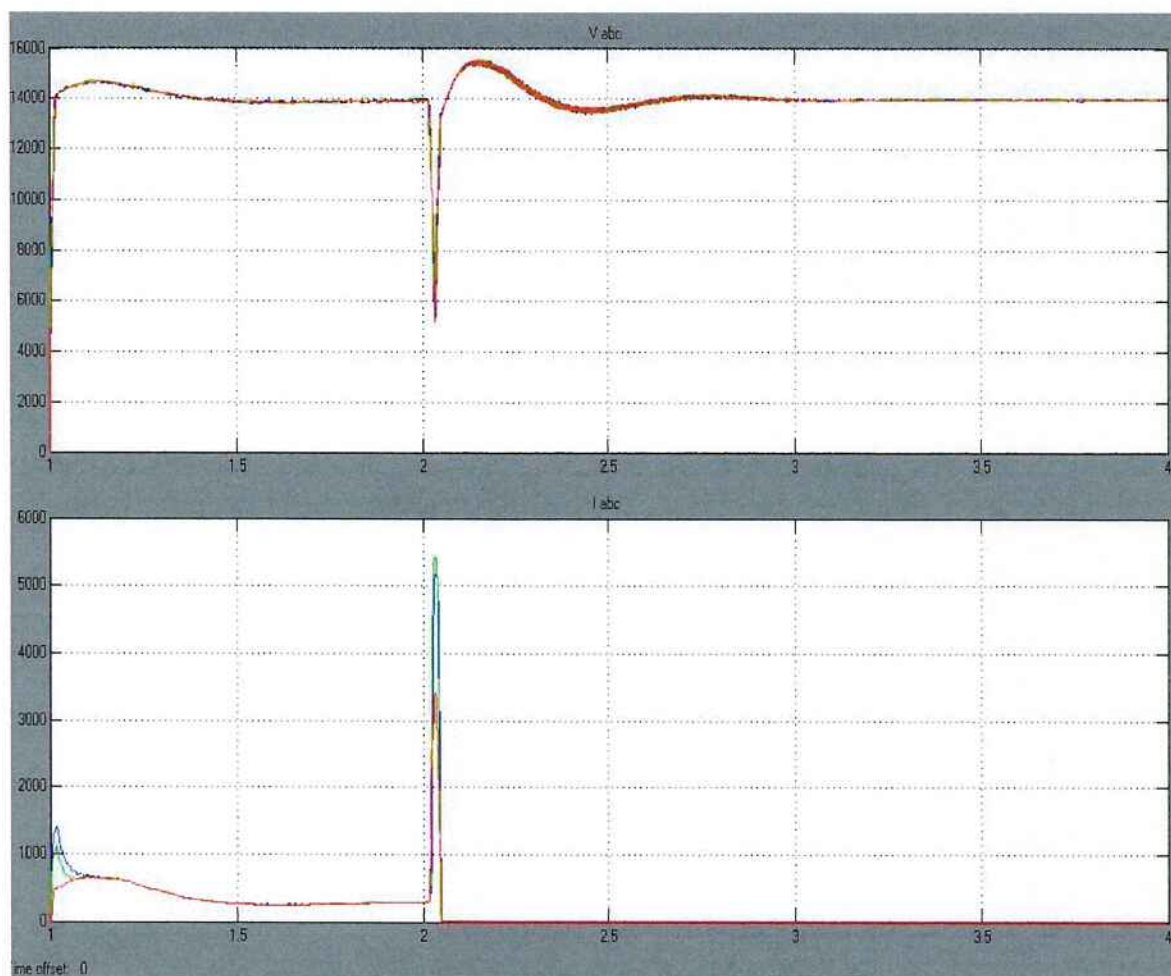


Figura 4.9 – Tensão e corrente no lado de baixa tensão do transformador de potência

Através da figura 4.9 podemos observar o instante em que ocorre o curto-circuito e o resultado do mesmo na tensão e corrente do transformador de potência.

A tensão sofre uma depressão em seu valor rms no momento do curto, seguido de um pico após a eliminação da falta. A presença de tensão mesmo após a eliminação do curto é indicação de que o disjuntor do gerador não abriu, e esta tensão é proveniente exclusivamente do gerador.

A corrente por sua vez sobe até aproximadamente 5.5kA, quando volta a cair em função da abertura do disjuntor. A abertura do disjuntor é evidenciada pela

presença de tensão, porém ausência de corrente fluindo pelo transformador de potência após a restauração do sistema.

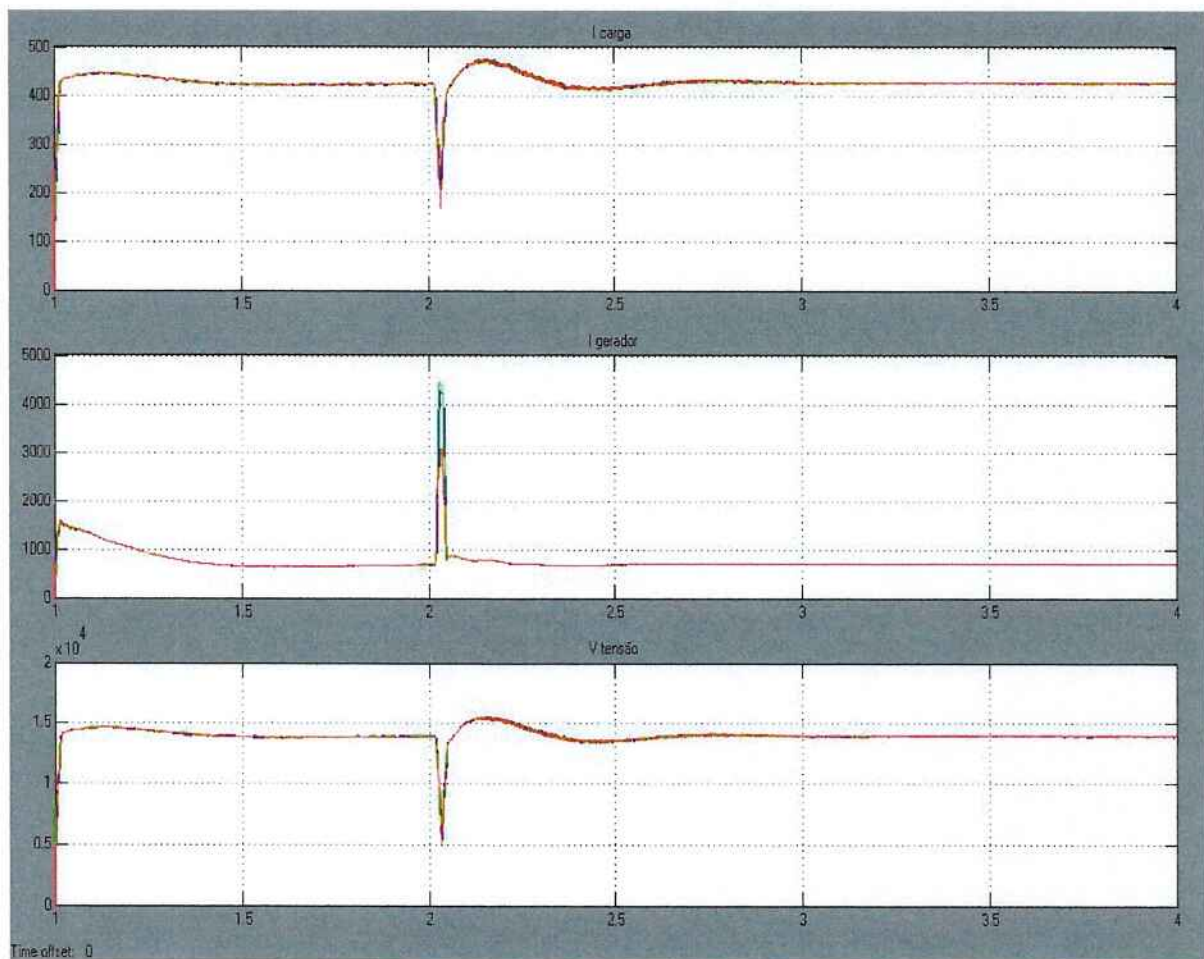


Figura 4.10 – Corrente na carga secundária, corrente do gerador e tensão do gerador.

Na figura 4.10 podemos observar que toda a potência flui para o curto-circuito o que reduz a corrente do alimentador das cargas secundárias. Após a eliminação do curto a corrente tem um pico ocasionado pela elevação da tensão do gerador.

O gerador acompanha a tendência do curto e sua corrente se eleva enquanto sua tensão cai durante o mesmo. No entanto, após a sua eliminação a tensão sofre um pico em função da sobre-excitação a que o gerador esteve exposto durante o curto.

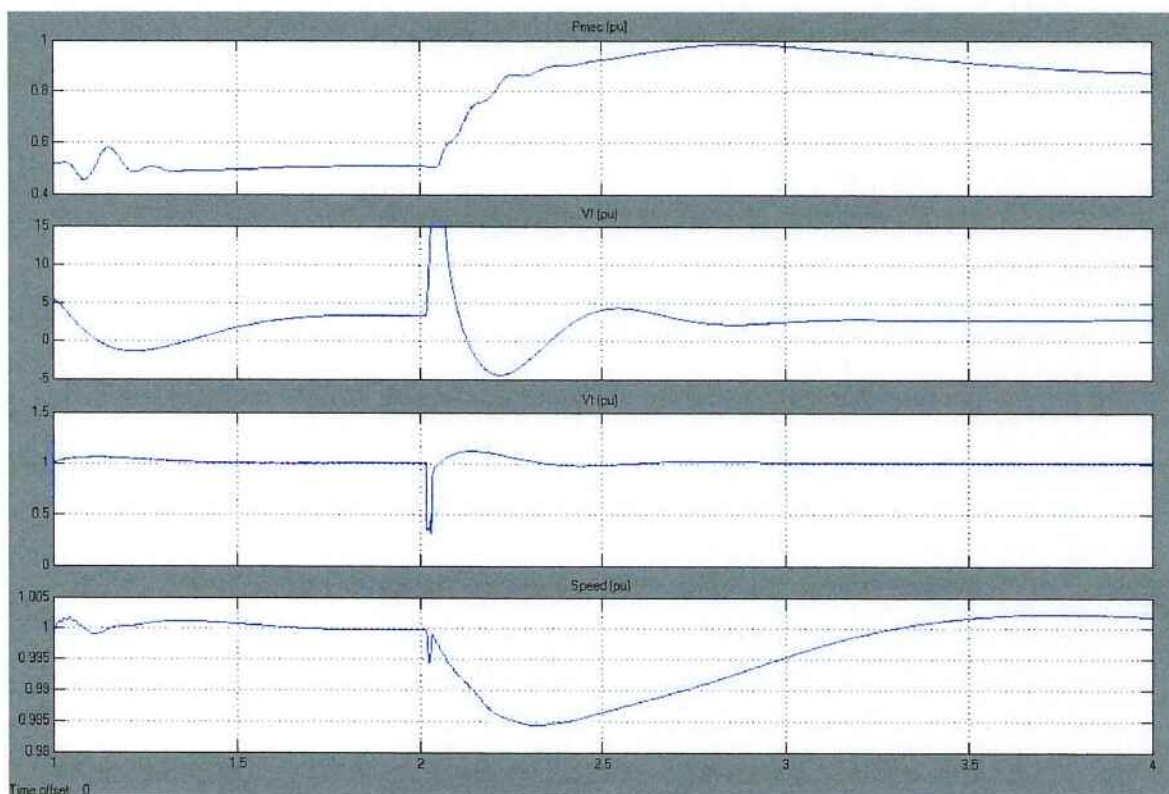


Figura 4.11 – Potência mecânica do rotor, tensão de excitação, tensão de fase e velocidade do rotor do gerador.

A figura 4.11 apresenta dados referentes ao gerador. Os sinais apresentados representam a forma como o gerador e seu sistema de controle de velocidade e tensão responderam ao evento ocorrido.

No gráfico da potência mecânica observamos que o sistema de controle da velocidade, ao sentir o curto e a nova carga presente após a sua eliminação, envia a ordem de aumento da potência mecânica até que o gerador se torne capaz de prover toda a potência elétrica absorvida pelas cargas da planta.

A tensão de excitação, por sua vez, ao identificar a queda de tensão nos terminais da máquina síncrona eleva-se a ponto de atingir a saturação. Após o restabelecimento do sistema a tensão de excitação torna-se negativa, a fim de contrabalançar a sobretensão presente nos terminais do gerador em função de sua tentativa exagerada de tentar manter a tensão nos terminais do gerador em 1 pu durante o curto-circuito. Após algum tempo, porém, a malha se estabiliza e volta a atingir o equilíbrio.

A tensão de fase do gerador, conforme já apresentado, cai durante o curto, sendo após a eliminação do mesmo, fruto do comportamento da tensão de excitação.

A velocidade do rotor, que afeta diretamente a frequência do sistema, também cai, porém sua queda é um processo muito mais relacionado com o aumento de carga proveniente do ilhamento do sistema do que com o curto; embora o aumento de carga seja consequência do curto. A velocidade do rotor volta a se estabilizar com o aumento da potência mecânica entregue ao rotor do gerador.

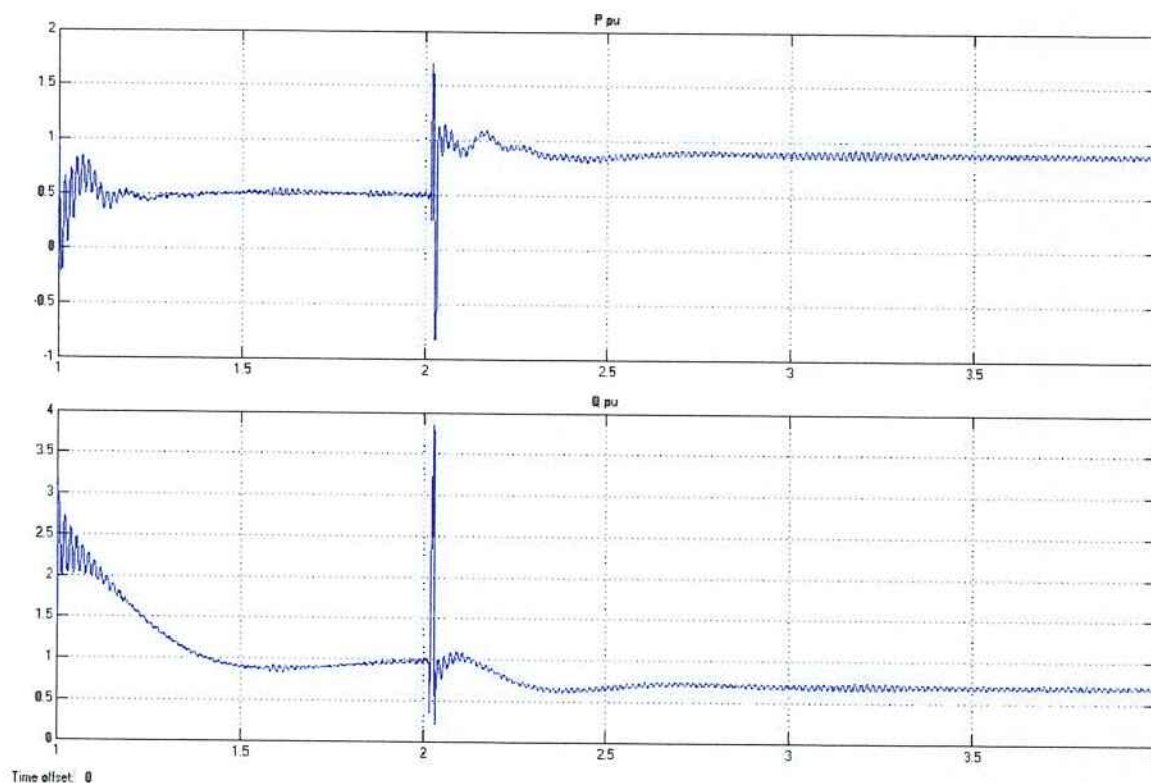


Figura 4.12 – Potência ativa e reativa fornecidas pelo gerador.

Conforme a figura 4.12 no apresenta, nos instantes iniciais o gerador procura o equilíbrio. Ocorrida a falta o gerador tem um pico de fornecimento de energia ativa e reativa, sendo que, encerrado o curto-circuito, a nova potência ativa fornecida pelo gerador é maior. Este resultado era esperado, já que a potência mecânica no eixo do rotor aumentou.

No entanto, uma interessante observação deve ser feita quando analisamos o comportamento da potência reativa antes e depois do curto-circuito. Percebe-se que após os transitórios que levam à estabilidade, a potência reativa fornecida pelo gerador é maior antes que depois do curto-circuito, ou seja, com os sistemas conectados o consumidor estava fornecendo reativos para a concessionária.

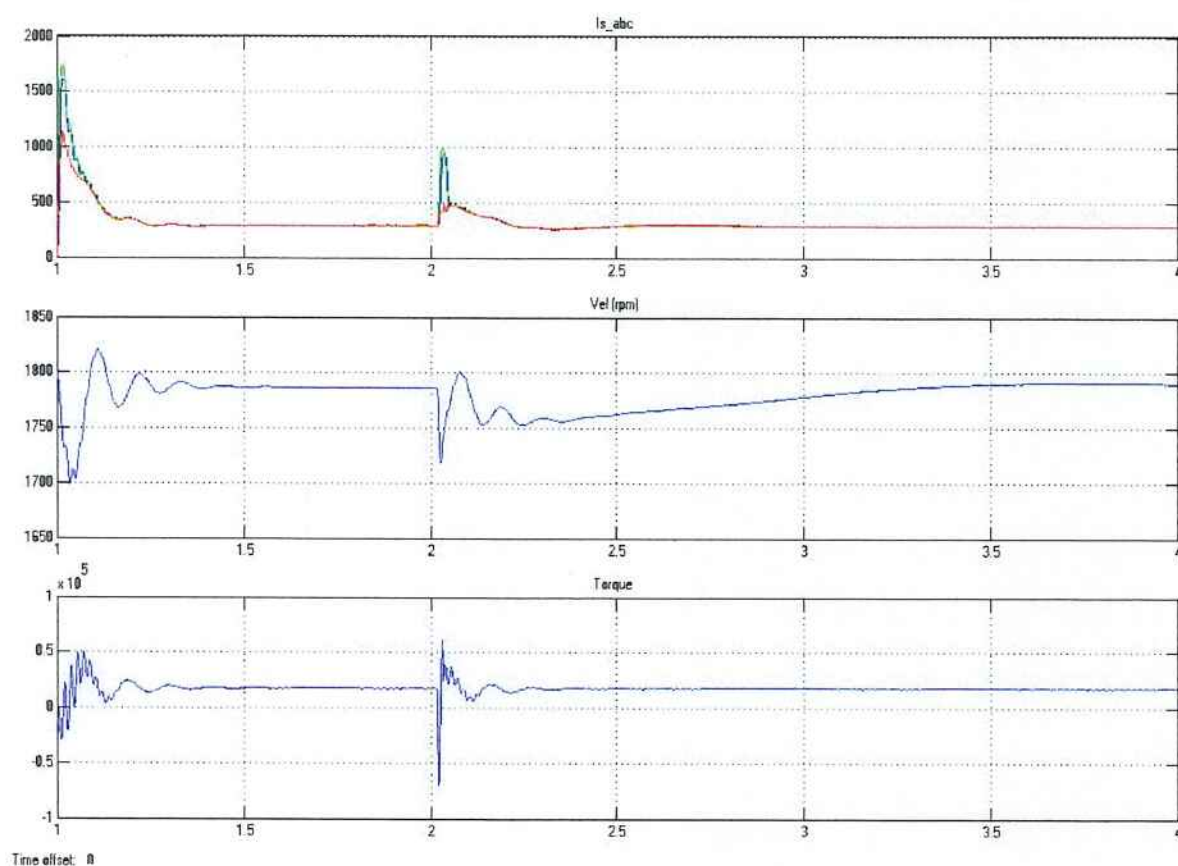


Figura 4.13 – Corrente trifásica, velocidade do eixo e torque do motor.

Para completar a análise desta simulação apresentamos os gráficos com os sinais referentes ao motor de indução na figura 4.13.

Com relação à corrente do motor, durante o curto-circuito a mesma eleva-se e o motor entra em estado de gerador assíncrono. Com a abertura do disjuntor de alta tensão o curto é eliminado do sistema do consumidor, e o motor retoma sua operação nominal.

Para evidenciar a operação de gerador do motor durante o curto, podemos analisar o comportamento do torque aplicado ao eixo do rotor pelo motor. Este torque não apenas cai, como se torna negativo, atingindo o valor de -70.000 N.m no momento em que o curto-circuito é extinto, a partir do qual o torque volta a estabilizar-se.

Finalmente, com o torque negativo a velocidade do motor cai com uma taxa alta, porém por pouco tempo, o que permite o motor se restabelecer rapidamente com a normalização do sistema.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

As proteções modeladas e suas localizações foram definidas para este caso, porém esta situação poderá variar em função das condições e particularidades de outros sistemas considerados.

O modelamento do motor de indução e do gerador mostrou-se essencial para a obtenção do comportamento dinâmico das tensões e correntes nos barramentos da planta, visto que se os mesmos fossem representados por uma carga resistiva-indutiva e gerador de sinal, respectivamente, não poderíamos analisar tal comportamento.

Nos casos considerados, o gerador manteve a estabilidade e recuperou suas condições normais de tensão e frequência após a eliminação da falta.

A utilização de diferentes funções de proteção é útil para a simulação de diferentes condições de operação e aumenta desta forma a confiabilidade do modelo.

O modelo criado pode ser alterado, incrementado ou simplificado de forma a simular plantas cogeradoras com características diferentes da que foi implementada. Assim, o resultado deste trabalho pode servir como uma ferramenta para análise e estudos de caso, além de também poder servir à fins acadêmicos.

Para estender a funcionalidade do modelo em questão pode ser desenvolvido um automatismo para o fechamento do paralelismo entre o consumidor e a concessionária.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Manual Power System Toolbox – Mathwork.
- [2] A. C. Caminha, **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**, Edgard Blücher, 1977.
- [3] S. L. Oliveira, **Tratado de Metodologia Científica**, Pioneira, 1997.
- [4] J. E. L. R. Fidalgo, M. A. Marques, **Estudo de Proteção de um Sistema Produtor com Cogeração Ligado a Rede da Concessionária**, Projeto de Conclusão de Curso EPUSP, 2003.
- [5] A. C. Moscardi, **Proteção de Plantas Termelétricas Industriais Operando em Cogeração**, Dissertação para obtenção de Título de Mestrado EPUSP, 2004.
- [6] F. A. R. Filho, **Uma Proposta de Algoritmo Digital para Proteção da Interligação Concessionária e Indústria Operando em Sistemas de Cogeração**, Tese para obtenção do título de Doutor EPUSP, 2002.
- [7] A. Vasconcellos, **Paralelismo de Sistemas Industriais Autogeradores e Rede Pública: Aspectos Técnicos da Integração dos Sistemas e Perspectivas Futuras**, Paper.
- [8] J. L. Blackburn, **Protective Relaying**, second edition, Dekker, 1997.
- [9] Decreto Federal N° 2003, **Regulamentação da Produção de energia Elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor**, 10 de setembro de 1996.