

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA
ÊNFASE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

**APLICAÇÕES DA QUALIDADE DE ENERGIA NA
EXPANSÃO DE UMA REFINARIA**

Por

Denise Gomes de Almeida

Monografia de Final de Curso

Prof. Glássio Costa de Miranda PhD
(Orientador)

Belo Horizonte, Junho/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica:

Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica

APLICAÇÕES DA QUALIDADE DE ENERGIA NA EXPANSÃO DE UMA REFINARIA

Denise Gomes de Almeida

Orientador: Glássio Costa de Miranda PhD

Monografia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, para a obtenção do título de especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

BELO HORIZONTE, Junho/2012

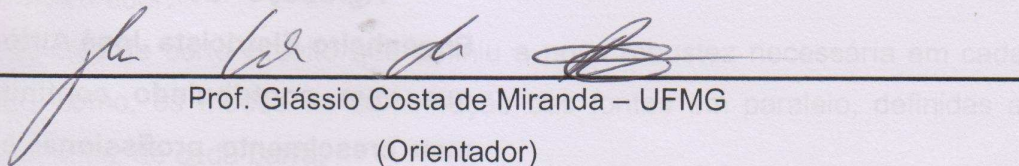
**APLICAÇÕES DA QUALIDADE DE ENERGIA NA EXPANSÃO DE UMA
REFINARIA**

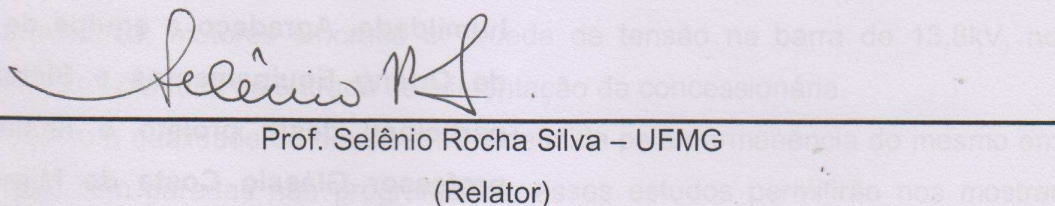
Denise Gomes de Almeida

Monografia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, para a obtenção do título de especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Aprovado em 23 de Junho de 2012

Por:


Prof. Glássio Costa de Miranda – UFMG
(Orientador)


Prof. Selênio Rocha Silva – UFMG
(Relator)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu grande mestre, Engenheiro Eletricista José Airton Bregalda, que vem contribuindo continuamente no meu crescimento profissional e intelectual através do compartilhamento de suas experiências e seu grande exemplo de humildade. Agradeço a equipe de trabalho da Orteng Equipamentos e Sistemas que participou deste projeto e finalmente ao professor Glássio Costa de Miranda pela paciência na condução dos trabalhos.

RESUMO

O trabalho tem como objetivo identificar como os estudos elétricos do sistema, realizados atendendo as normas em vigor, nacionais e internacionais, podem definir: o modo de operação, as modificações necessárias, bem como, uma simulação no tempo do comportamento do sistema durante um transitório. Serão relatados, através de dados reais, os estudos de uma refinaria que sofreu uma expansão de cargas e inclusão de uma nova fonte de geração que irá dar autonomia a essa refinaria. A qualidade de energia do sistema está diretamente ligada a esses estudos.

A nova fonte de energia será interligada a dois barramentos de distribuição de 13,8kV alimentados pela concessionária local através de duas redes locais de 138kV ligadas a transformadores de 138kV-13,8kV. A entrada de uma nova fonte requereu a utilização de um reator duplex para diminuir o nível de curto circuito nessas barras, pois a robustez dos equipamentos existentes é de 31,5kA. O reator duplex terá seu Conceito e Projeto detalhados. Os principais estudos em questão foram:

Os estudos de fluxo de potência mostraram que com uma regulação de tensão adequada à queda de tensão provocada pelo reator não atrapalharia o funcionamento da planta da refinaria e até auxiliaria na regulação de tensão na ausência do gerador.

O estudo de curto circuito que definiu a nova robustez necessária em cada barra, bem como, os modos de combinação das fontes em paralelo, definidas a partir da robustez de cada barra.

Estudo de estabilidade que permite simular no tempo as principais ocorrências, tal como o comportamento no tempo do: gerador de 65MVA em 13,8kV, transformadores, motores síncrono e queda de tensão na barra de 13,8kV, no momento de uma falta na entrada de alimentação da concessionária.

Como a qualidade de um sistema é definida pela permanência do mesmo em operação, sem paradas não programadas, esses estudos permitirão nos mostrar que com uma seletividade lógica da proteção adequada poderemos, ou não, reacelerar cargas motóricas e permanecer com o sistema operando, após a retirada de uma falta.

Palavras-chave: qualidade, energia, estudo, estabilidade.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Susceptibilidade de equipamento a afundamento de tensão.....	2
Tabela 2 – Parâmetros dos geradores síncronos adotados	7
Tabela 3 – Valores esperados para curto circuito com reator duplex	18
Tabela 4 – Níveis de curto circuito para o CASO 01.....	22
Tabela 5 – Níveis de curto circuito para o CASO 02.....	23
Tabela 6 – Níveis de curto circuito para o CASO 05.....	24

Lista de Figuras

Figura 1 – Tensão x Tempo para equipamento eletrônico de potência	2
Figura 2 – Relação X/R para motores (ANSI/IEEE Std. 242-1986).....	3
Figura 3 – Modelo adotado para gerador auxiliar	9
Figura 4 – Tela de parâmetros para motor de indução.....	9
Figura 5 – Tela de parâmetros para motor de indução.....	10
Figura 6 – Unifilar – Diagrama simplificado	13
Figura 7 – Configurações frequentes para reatores.....	15
Figura 8 - Circuito equivalente do reator duplex	17
Figura 9 – Modelamento da reatância do conjunto reator duplex + gerador ..	19
Figura 10 – Unifilar de Distribuição da Refinaria	21
Figura 11 – CASO 01 considerado no cálculo de curto circuito	22
Figura 12 – CASO 02 considerado no cálculo de curto circuito	23
Figura 13 – CASO 05 considerado no cálculo de curto circuito	24
Figura 14 – Ângulo de potência 221-TG-01	31
Figura 15 – Corrente de excitação 221-TG-01	31
Figura 16 – Potência reativa 221-TG-01	31
Figura 17 – Tensão de excitação 221-TG-01	31
Figura 18 – Potência elétrica 221-TG-01.....	32
Figura 19 – Potência mecânica 221-TG-01.....	32
Figura 20 – Velocidade do gerador 221-TG-01.....	32
Figura 21 – Corrente do gerador 221-TG-01.....	32
Figura 22 – Ângulo Absoluto de potência 103-TG-01	32
Figura 23 – Corrente de excitação 103-TG-01.....	32
Figura 24 – Potência reativa 103-TG-01	33
Figura 25 – Tensão de excitação 103-TG-01.....	33
Figura 26 – Potência elétrica 103-TG-01.....	33
Figura 27 – Potência mecânica 103-TG-01.....	33
Figura 28 – Velocidade do Gerador 103-TG-01.....	33
Figura 29 – Corrente do gerador 103-TG-01.....	33
Figura 30 – Potência X1	34
Figura 31 – Potência X2.....	34
Figura 32 – Potência reativa X1	34

Figura 33 – Potência reativa X2.....	34
Figura 34 – Corrente X1	34
Figura 35 – Corrente X2.....	34
Figura 36 – Tensão 125-PN-01.....	35
Figura 37 – Tensão 125-PN-02.....	35
Figura 38 – Tensão 221-PN-01.....	35
Figura 39 – Corrente 00-TF-04	36
Figura 40 – Corrente 00-TF-02	36
Figura 41 – Potência elétrica 310-MK-02	36
Figura 42 – Potência mecânica 310-MK-02	36
Figura 43 – Potência reativa 310-MK-02	37
Figura 44 – Tensão na barra do 310-MK-02	37
Figura 45 – Corrente do 310-MK-02.....	37
Figura 46 – Potência reativa 221-TG-01	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	SISTEMA ELÉTRICO EXISTENTE E MODIFICAÇÕES A SEREM IMPLEMENTADAS.....	11
3	REATOR DUPLEX.....	13
4	ESTUDO DOS CASOS	20
1	CASO 1.....	24
2	CASO 2.....	26
3	CASO 2A	28
4	CASO 3.....	28
5	EVENTO 1 DO CASO 1	30
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	37
6	BIBLIOGRAFIA	39

1 INTRODUÇÃO

Com o aquecimento da economia brasileira no Setor de petróleo e refino nos últimos 4(quatro) anos, surgiu a necessidade de novas refinarias, bem como a expansão da capacidade e qualidade das existentes. Dessa forma, a empresa, onde trabalho, foi contratada para algumas dessas demandas. Nessa monografia em específico trataremos da expansão de uma dessas refinarias, iniciada em 2007.

Essa refinaria, como todas as outras, está sempre em busca de qualidade de energia em suas instalações. A energia é um dos insumos principais do processo, a ausência da mesma trás paradas no sistema com perdas de produção que trazem grande prejuízo a empresa em questão.

A obediência, em toda a sua planta, a IEEEE, bem como as normas em vigor em suas últimas revisões tais como IEC's, NBR-IEC's, ABNT's faz com que vigore as mesmas exigências das instalações europeias e normas em vigor no Brasil, fazendo com que todos os seus fornecedores tenham um mesmo padrão de atendimento em qualidade e segurança. As especificações para fornecimento exigem todos os ensaios de tipo (ensaios realizados em protótipos e que garantem a resistência a ser verificada no ensaio para todos os demais produtos do fabricante com as mesmas características testadas), previstos nas normas citadas acima, tais como: compatibilidade eletromagnética para equipamentos eletrônicos, Ensaio de interrupção, curto-circuito, Arco interno (Ensaio destrutivo, onde é verificado o comportamento do equipamento durante um arco elétrico, levando a explosão), ensaio de impulso atmosférico (NBI), coordenação tipo 2 ou tipo C para painéis de baixa e alta tensão respectivamente. Ensaio de NBI para para-raios. Enfim, ensaios específicos para cada equipamento que garantem segurança para operadores e continuidade de operação nas possíveis falhas do sistema.

Os trabalhos realizados para essa refinaria iniciou com os estudos elétricos do sistema, tais como:

Estudos de fluxo de potência, onde se verifica o comportamento do sistema durante a partida de motores de alta potência com toda a planta em funcionamento, verificando se a energia presente na planta é suficiente, ou seja, os níveis de queda de tensão que ocorrerão no sistema estarão conforme gráfico e tabela abaixo. Indica

também se com a perda de uma fonte de energia será necessário o descarte de cargas. O modelamento do sistema teve como referências a literatura 2.3.2 – J.C. Das – Power System Analysis – Short-Circuit, Load Flow and Harmonics – Marcel Dekker e as recomendações do artigo IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis - IEEE Std 399-1997; bem como folha de dados de: transformadores, banco de capacitores, motores, reatores, geradores, cabos de potência, energia contratada pela refinaria da concessionária local e etc.

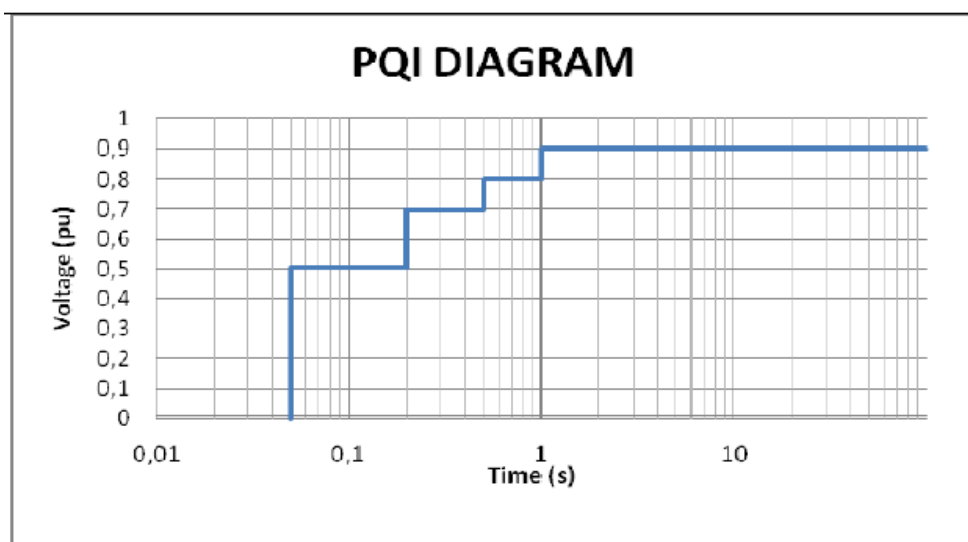


Gráfico de tensão versus tempo para Equip. eletrônico de potência

Figura 1 – Tensão x Tempo para equipamento eletrônico de potência

A IEEE STD 1346 apresenta dados de susceptibilidade de equipamentos a afundamento da tensão, e com esses dados foi preparado a tabela abaixo:

Equipamento.	Sensibilidade a Subtensão		
	Superior	Medio	Inferior
PLC	20ms, 75%	260ms, 60%	620ms, 45%
PLC - Entrada	20ms, 80%	40ms, 55%	40ms, 30%
Drive - 5hp	30ms, 80%	50ms, 75%	80ms, 60%
Relés controle CA	10ms, 75%	20ms, 65%	30ms, 60%
Controlador de motor	20ms, 60%	50ms, 50%	80ms, 40%
Computador industrial	30ms, 80%	50ms, 60%	70ms, 50%

Tabela 1 – Susceptibilidade de equipamento a afundamento de tensão

Estudos de curto circuito, onde será verificado se a robustez do sistema existente atende as novas características do mesmo. Verificando a necessidade de inclusão de reatores limitadores de curto circuito em barras existentes, pois os equipamentos instalados na mesma podem não possuir robustez suficiente para suportar os novos níveis de curto circuito. Determinará também as fontes que podem trabalhar em paralelo nas diversas barras do sistema. O estudo de curto circuito é fundamental para definir a forma operacional do sistema. O modelamento do sistema teve como referências a literatura 2.3.2 – J.C. Das – Power System Analysis – Short-Circuit, Load Flow and Harmonics – Marcel Dekker e as recomendações do artigo IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis - IEEE Std 399-1997; Norma ANSI/IEEE Std. 242-1986, “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”; Norma IEC909 de 1988, “Short-circuit Current Calculation in Three-Phase A.C. Systems”; bem como folha de dados de: transformadores, banco de capacitores, motores, reatores, geradores, cabos de potência, energia contratada pela refinaria da concessionária local e etc. A relação X/R adotada para todos os motores foi determinada através da figura abaixo transcrita da norma ANSI/IEEE Std. 242-1986 .

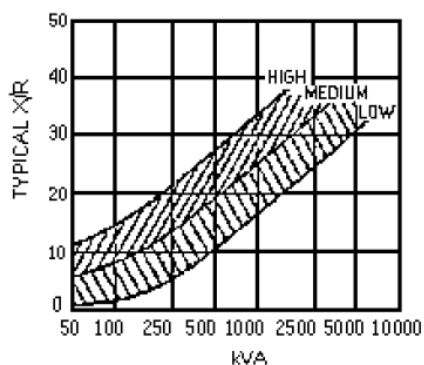


Figura 2 – Relação X/R para motores (ANSI/IEEE Std. 242-1986)

Apesar da norma IEC909 [5.9], item 13.3, citar que os motores que possuem potência menor que 50CV ou 37kW acionados de forma direta não contribuirão para o curto-circuito, estes foram modelados nesse sistema elétrico.

Não serão consideradas nos cálculos do curto-circuito as cargas não motóricas conforme recomendado no item 14 da norma IEC909 .

Não serão consideradas nos cálculos do curto-circuito as contribuições dos bancos de capacitores, uma vez que o período em que estes contribuem para falta é muito pequeno e a frequência da corrente de contribuição está bem acima da frequência industrial, conforme item 14 da norma IEC909

Os cálculos das correntes de curto-circuito foram processados no programa PTW-DAPPER que utiliza a metodologia de cálculo que fornece solução do sistema para correntes de faltas trifásicas, fase-terra, corrente de falta momentânea RMS; faltas assimétricas para 1/2, 4 e 30 ciclos e também de duração definida pelo usuário, valores das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero para cada falta localizada. O programa considera todos os valores de impedância entre cada falta localizada e as contribuições para a concessionária de energia, geradores e motores.

O programa calcula ainda as correntes de falta balanceadas e não balanceadas em todas as barras, e examina em detalhes as correntes dos ramos associados com a barra em falta. A análise de curto-circuito segue a técnica convencional da lei de Ohm, usando superposição e análise vetorial complexa, calcula valores da falta em RMS simétrico, corrente de pico e valores assimétricos com componente DC.

Este estudo foi processado utilizando o software PTW DAPPER no método "Compreensivo". Desta forma, para os valores subtransitórios e transitórios foram utilizados a metodologia do decremento da corrente de curto-circuito em função do tempo. As reatâncias ($X''d$) subtransitórias e transitórias das máquinas assíncronas utilizadas foram de acordo com a norma ANSI/IEEE C37.010-1999 [5.6], valores a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Potência} > 1000\text{HP} &= 1,0 * X''d \\ 50\text{HP} \leq \text{Potência} \leq 1000\text{HP} &= 1,2 * X''d \end{aligned}$$

As reatâncias ($X''d$) dos motores de baixa tensão foram calculadas considerando que o valor da corrente de partida dos motores é 6 vezes o valor da nominal. Sabendo que:

$$X''d = [1 / (IP / In)]$$

considerando $\left(\frac{IP}{In}\right) = 6$

temos que: $X''d = 0,17$

Potência > 1000HP = $1,0 * X''d = 0,1700$

$50HP \leq \text{Potência} \leq 1000HP = 1,2 * X''d = 0,2040$

Estudo de Estabilidade - Fundamentalmente, estabilidade é a propriedade de um determinado sistema a resistir a súbitas mudanças na geração, modulação de cargas, faltas elétricas e outras variáveis sem, contudo, perder o sincronismo. Esse estudo está diretamente ligado à qualidade de energia, pois o mesmo é dinâmico, fornecendo dados no tempo o que facilita a análise em todos os aspectos. Por exemplo, o tempo de um afundamento de tensão, verificando a possibilidade de reaceleração de um motor. Modelando o comportamento do gerador durante uma falha em uma das fontes que está em paralelo com o mesmo, definindo se a planta permanecerá energizada. Essas simulações permitem verificar o comportamento no tempo sendo as mais reais possíveis de acordo com o modelamento utilizado, quanto mais detalhado e mais próximo do real mais confiáveis serão os valores finais fornecidos pelo software. O estudo em questão levou em consideração a estabilidade e partida de motores dinâmicos, onde além de considerar o processo do motor ou gerador em foco, foram considerados todos os elementos dinâmicos do sistema elétrico que reagem, contribuindo ou dificultando a estabilidade. O modelamento levou em consideração as referências literárias e normas citadas acima nos itens 1 e 2 e tendo como documento base a referencia "2.3.1 – Schneider - Cahier Technique nº 185 – Dynamic Stability of Industrial Electrical Networks". O item 2.4 desse documento trata do problema de reaceleração dos motores assíncronos – "The motor, as it slows down, can restart without risk when voltage is restored provided that the voltage Ureaccel remains within acceptable limits. When Ureaccel voltage is at its greatest value, nearly twice network voltage. The consequences are destructive torques and currents (15 to 20 In) far greater than starting currents". Os cálculos foram executados com configuração dinâmica e os ajustes adotados para a pasta "Transient Stability Study Case" no sub item "Dyn Model"

Dessa forma trataremos aqui principalmente os dados do estudo de estabilidade que nos possibilita uma análise temporal do fluxo de potência e do curto circuito e nos facilitará a chegar num sistema com a maior qualidade de energia possível. Verificando não somente a robustez, mas também a compatibilidade dos equipamentos de manobra da planta como exemplo o valor do curto circuito no momento da abertura do equipamento: sendo esse tempo a somatória da sensibilização e disparo do trip do relé de proteção e tempo de abertura do equipamento de manobra. Essa análise nos propiciará tomar decisões para permanência ou troca de equipamentos existentes na planta.

Para realização dos estudos de estabilidade foi utilizado um software comercial denominado ETAP Power Station 7.1.0 que é um aplicativo específico voltado à análise de Fluxo de Potência, Curto-Circuito, Estabilidade, Harmônicos, Partida de Motores em Sistemas Elétricos de Potência. Sua abrangência cobre os sistemas de transmissão de alta tensão, os sistemas de sub-transmissão, os sistemas de distribuição e os sistemas industriais de média e baixa tensão. Sua funcionalidade, especialmente o atendimento das características dinâmicas do processo elétrico, aliada aos aspectos gráficos interativos, permite ao usuário aplicá-lo em problemas de operação e de planejamento de sistemas elétricos.

Como a definição de qualidade de energia de um sistema está diretamente ligada ao tempo de parada de um processo, a busca incessante de todos é por manter um processo o menor tempo possível interrompido sem que tenhamos um investimento muito alto para tal, sendo necessárias manobras, transferências de alimentação das cargas, auto sustentabilidade dos processos principais. Devendo o fornecimento de energia ser analisado em todo o contexto para evitar ao máximo, paradas não programadas de abastecimento de energia, ou desligamento de cargas. A reaceleração também é um dos recursos utilizados para evitar perda do processo.

Sobre reaceleração de motores assíncronos é fundamental observar o sincronismo entre o campo elétrico rotórico e o estatórico, regido pela rede, que é o ponto de partida para a definição de perda de sincronismo desses motores. Quando

da ocorrência de uma falta ou de afundamento da tensão, o motor já estava em pleno funcionamento, acionando uma carga. Como consequência há um torque restritivo no eixo do motor. Com o afundamento da tensão o motor e a carga reduzem a velocidade, em proporção direta com a inércia do conjunto. Por outro lado muitas cargas exercem torque no sentido contrario, tal como as bombas com fluido que tende a retornar antes da capacidade de fechamento da válvula de retorno. Ao aplicar tensão num motor nessa condição a corrente de reaceleração é elevada, pois tem que reacelerar o conjunto motor mais bomba assim como a própria carga. Muitos acoplamentos já falharam nessa condição.

Segue abaixo um exemplo de parâmetros necessários para modelamento dos equipamentos que compõem o sistema

Tabela 2 – Parâmetros dos geradores síncronos adotados

Parâmetros	Valores adotados p/ geradores	
	221-TG-01	103-TG-01-201
MVA	65,5	11,5
kV	13,8	13,8
%PF	80	80
Tipo pólo	Não saliente	Não Saliente
X_d'' (pu)	17	16
X_d' (pu)	22	29
X_d (pu)	267	275
X_q'' (pu)	12	12
X_q (pu)	244	108
X_q' (pu)	15	15
X_L (pu)	11	11
X/R	60	22
T_{do}'' (seg)	0.002	0.042
T_{do}' (seg)	5.6	5
T_{qo}'' (seg)	0.002	0.002
T_{qo}' (seg)	3.7	3.7
S100	1.07	1.07
S120	1.18	1.18
H	2.02	1.6
D	3	5

Onde os parâmetros têm a seguinte definição:

- X_d'' Reatância síncrona subtransitória de eixo direto
- X_d' Reatância síncrona transitória de eixo direto
- X_d Reatância síncrona de eixo direto
- X_q'' Reatância síncrona subtransitória de quadratura
- X_q Reatância síncrona transitória de quadratura
- X_q' Reatância síncrona de quadratura
- X_L Reatância de dispersão da armadura
- R_a Resistência de armadura
- X/R X/R da maquia (X''/R_a)
- T_{do}'' Constante de tempo de circuito aberto (eixo direto subtransitório)
- T_{do}' Constante de tempo de circuito aberto (eixo direto transitório)
- T_{qo}'' Constante de tempo de circuito aberto (eixo em quadratura subtransitório)
- T_{qo}' Constante de tempo de circuito aberto (eixo em quadratura transitório)
- S_{100} Fator de saturação correspondente à 100% da tensão de terminal
- S_{120} Fator de saturação correspondente à 120% da tensão de terminal
- H Inércia total do eixo
- D Fator de amortecimento do eixo

Na modelagem dos reguladores de tensão foram usados os modelos disponíveis no ETAP, segundo a IEEE 421-5 – 2005. Foram usados dois tipos de reguladores de tensão, para o 221-TG-01 foi usado o modelo AC8B, que representa o regulador PRISMIC 32 da Brush e para o 103-TG-01-201 foi usado o tipo IEEE AC5A, adequado a geradores sem escovas.

Os modelos matemáticos dos reguladores e com respectivos valores padrões estão indicados nas paginas do IEEE 421-5 – 2005.

Para os geradores principais foi utilizado o modelo de regulador para turbinas a gás, para o gerador auxiliar foi modelado conforme figura abaixo. Para a turbina do

conjunto 221-TG-01 foi usado o modelo existente no programa ETAP para o LM6000PC General Governor Model - PSLF.

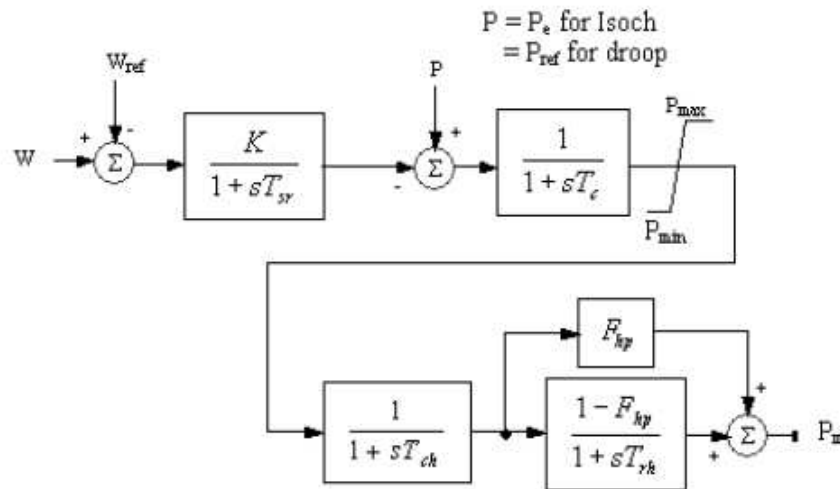


Figura 3 – Modelo adotado para gerador auxiliar

Exemplo de modelamento a ser feito no Software ETAP Power Station 7.1.0 para um motor de indução.

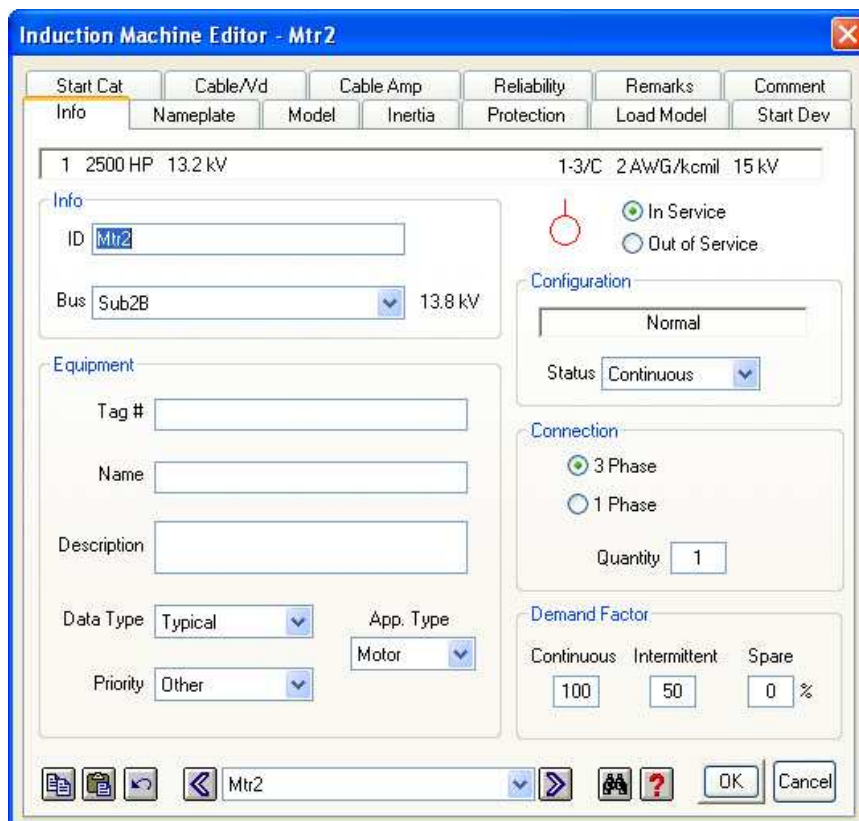


Figura 4 – Tela de parâmetros para motor de indução

Induction Machine Editor - Mtr2

Start Cat	Cable/Vd	Cable Amp	Reliability	Remarks	Comment
Info	Nameplate	Model	Inertia	Protection	Load Model

1 2500 HP 13.2 kV 1-3/C 2 AWG/kcmil 15 kV

Locked Rotor: LRC 576.1 % PF 19.47 %

ANSI Short-Circuit Z Xsc: Std MF 17.358 1/2 cy Xsc 26.037 1.5-4 cy

Parameters: Xo 15.38 X2 15.38 X/R 21.99 Td' 0.061

Torque: LRT 88.14 % MaxT 244 %

Buttons: Grounding... Parameter Estimation

Model: Single2 - Single-cage with deep-bars

None CKT Charac. Lib... HV-HS-HT MV4700HP4P Print

Mtr2 OK Cancel

Figura 5 – Tela de parâmetros para motor de indução

2 SISTEMA ELÉTRICO EXISTENTE E MODIFICAÇÕES A SEREM IMPLEMENTADAS

O sistema elétrico de alimentação da refinaria em questão (Subestação principal) é composto por 4 (quatro) transformadores de potência instalados na subestação principal. Estes transformadores possuem as seguintes características elétricas de: 138/14,6 kV, 15/20/25 MVA. Na subestação principal está instalado também o Turbo-Expansor de 11,52 MVA em 13,8 kV. Estas fontes de energia suprem todas as subestações existentes na refinaria.

A subestação de entrada é alimentada em 138kV por duas linhas de transmissão da concessionária de energia local, cada linha suporta a potência contratada pela refinaria que é de 6.3MVA em 138kV.

A alimentação da planta existente atende a demanda instalada com uma flexibilidade de manobras no sistema. Permitindo sem interrupção de energia, através de paralelismos e transferências, retirar um transformador de força para manutenção e permanecer com todo o processo da refinaria em funcionamento, bem como uma boa utilização da energia fornecida pela concessionária através do controle de reativos.

A necessidade de expansão, com dois novos processos trouxe uma demanda de energia que a subestação principal acima citada não teria condições de suprir. Para tal, visando auto sustentabilidade, definiu-se pela instalação de um turbo gerador. Essa nova fonte de energia e as novas cargas devem ser estudados, através do modelamento das mesmas e todos os estudos devem ser refeitos.

O principal objetivo dos estudos é exatamente definir o comportamento do sistema com a entrada do turbo gerador de 65,5MVA, e as cargas destinadas a duas novas plantas para: Carteira de Gasolina e Carteira de Diesel. Por se tratar de uma expansão os equipamentos existentes devem ser avaliados e os novos dimensionados para essa nova robustez do sistema. O projeto prevê a entrada do

turbo gerador na barra de 13,8kV, como o sistema existente possui uma suportabilidade de manobrar curtos circuitos de 31,5kA, deve-se prever uma forma de limitar o curto circuito dessa nova fonte. Existem no mercado limitadores de curto-circuito que funcionam como fusíveis limitadores, prática comum no mercado e existe a utilização de reatores. Nesse caso foi solicitado pela refinaria que fosse utilizado reatores Duplex, será explicado o funcionamento e princípio do reator duplex em um capítulo a frente específico.

Com a entrada dessa nova fonte, do reator duplex e das novas cargas, na maioria motóricas, foi necessário avaliar como esse sistema iria reagir, sendo necessária a realização dos estudos citados na introdução. O sistema existente possuía os estudos de curto circuito e fluxo de potência sendo necessário um remodelamento nos mesmos para inserção das novas cargas e fontes de alimentação. A entrada do turbo gerador trouxe a necessidade do estudo de estabilidade que possibilita a verificação do comportamento do sistema no tempo. Alguns casos de uso:

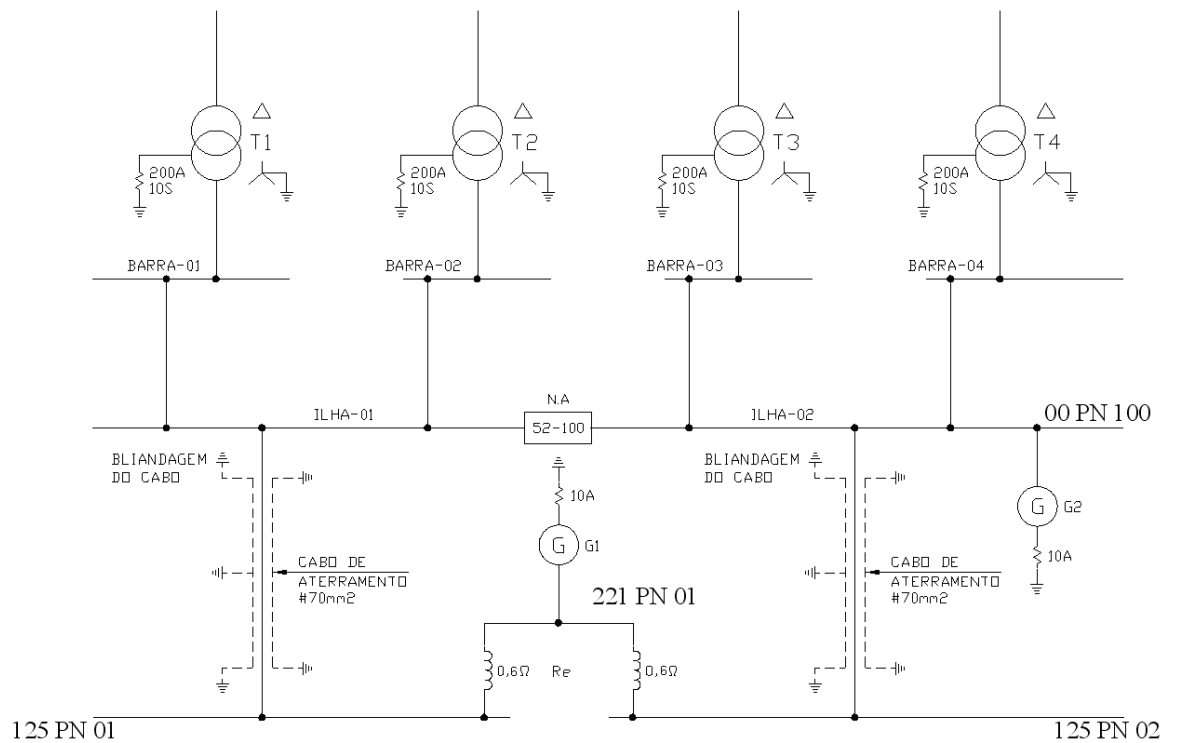
- Verificar a reação do gerador na ausência da concessionária de energia, um sistema forte de referência para a frequência;
- Verificar qual seria o tempo dos transitórios e como o gerador reagiria no momento de uma falha de uma das fontes ou até mesmo como seria a sua estabilidade na perda da concessionária por falha na entrada de 138kV.

Somente com os transformadores existentes a refinaria não suportaria a entrada das duas novas plantas. Para verificar o sistema quanto aos novos níveis de tensão e sobrecarga o fluxo de potência será essencial.

O estudo de curto circuito irá definir a flexibilidade de operação da planta quanto a robustez dos equipamentos. Quantos transformadores poderão trabalhar em paralelo, não esquecendo que as cargas motóricas contribuem para o curto circuito, devendo ser consideradas no modelamento.

Segue abaixo um diagrama simplificado mostrando as principais barras de alimentação/distribuição

Figura 6 – Unifilar – Diagrama simplificado



3 REATOR DUPLEX

O reator duplex é um reator limitador de curto circuito com tap central que pode beneficiar o sistema quando conectado entre duas barras de alimentação e um sistema de geração local. Quando um sistema de geração é adicionado a uma planta industrial há muitas maneiras de se conectar o gerador ao sistema elétrico, uma das maneiras é conectar o gerador através de um reator duplex a uma barra dupla do sistema de média tensão.

O reator duplex é composto por dois módulos idênticos interligados entre si por um acoplamento negativo. Três reatores são conectados ao sistema por um par de bobinas com acoplamento contrário entre elas. Quando o reator duplex é conectado ao sistema isto significa que o mesmo traz vantagens para a estabilidade e controle do curto circuito do sistema em relação a reatores instalados em duas barras separadas.

Se a reatância do primeiro reator X_1 é a reatância própria da bobina 1 e X_2 é a reatância própria da bobina 2, quando a corrente circula em série através das duas bobinas a reatância equivalente será $X_1 + X_2 + f_c X_1 + f_c X_2$ onde f_c é o fator de acoplamento. O fator de acoplamento representa o quão próximas estão as duas bobinas e o quanto estão acopladas magneticamente. Reatores a seco com núcleo de ar apresentam valores típicos de acoplamento na ordem de 0.4 enquanto que reatores imersos a óleo apresentam fator de acoplamento na ordem de 0.5. Em sistemas de 5kV reatores a seco com núcleo de ar podem ter fatores de acoplamento na ordem 0.6.

A maneira que os reatores podem ser conectados está representada nas figuras abaixo: figura (a) mostra reatores independentes tendo cada um uma reatância X . Na figura (b) os reatores são posicionados de tal forma que os campos magnéticos dos reatores sejam subtrativos. O mesmo efeito é obtido com o rearranjo das conexões em (c). Quando a corrente flui por apenas uma perna do reator então o reator duplex se torna o reator mostrado na figura (a) abaixo. Quando a corrente circula através das duas pernas do enrolamento é criada uma nova condição, o efeito pode ser definido pelo fator de acoplamento entre as duas pernas do reator. O fator de acoplamento define o quanto as duas bobinas estão linkadas (acopladas) entre si. Todos estes efeitos podem então ser definidos em função de X e f_c .

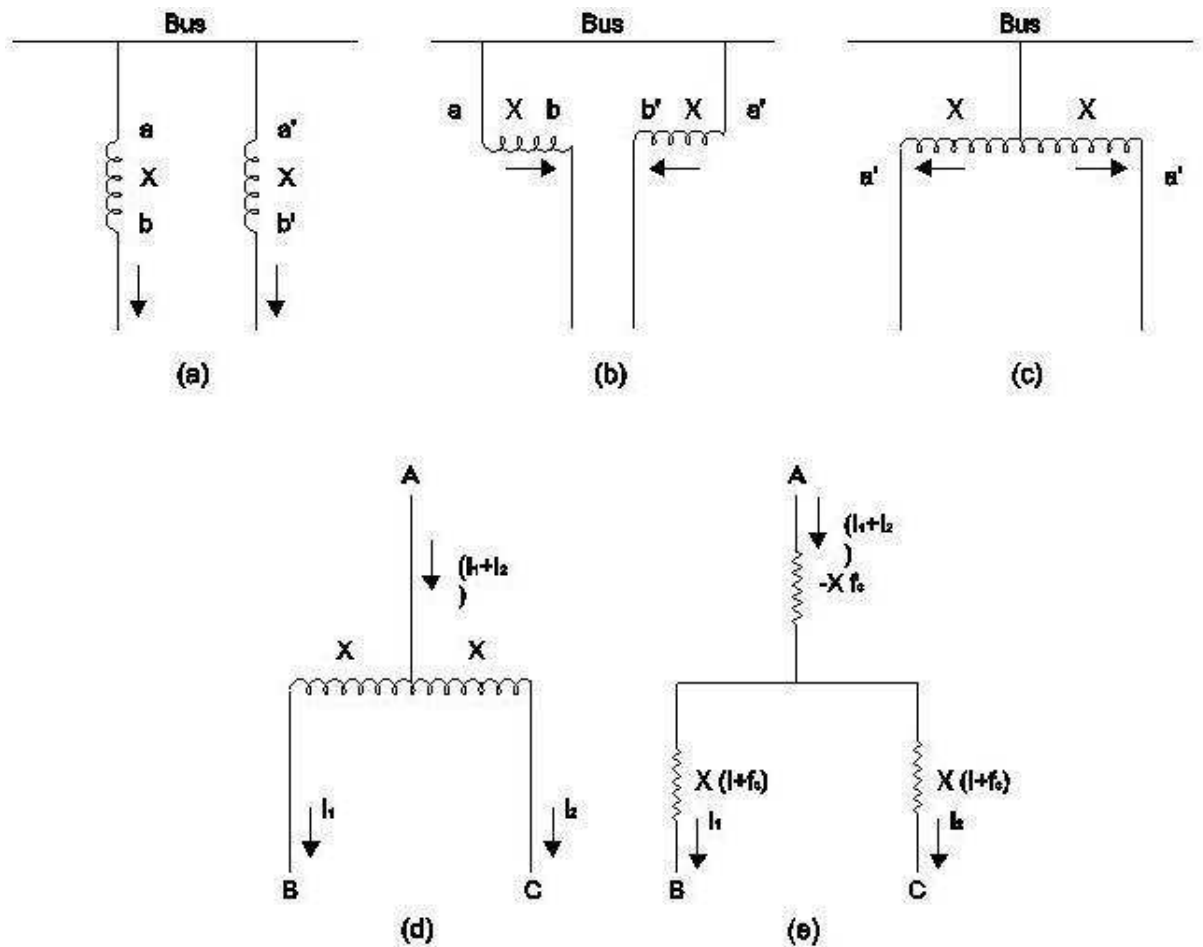


Figura 7 – Configurações frequentes para reatores

Produzem uma reatância pequena em condições normais e alta reatância em condições de falta (vantagem: pequena queda de tensão em condições normais). Este tipo de reator pode ser aplicado em sistemas que possuem dois circuitos de alimentação separados que permanecem sempre isolados.

Este reator é controlado de tal maneira que em condições normais os campos magnéticos de cada metade da bobina sejam opostos, resultando numa reatância baixa entre fonte e carga. No caso de uma falta num circuito de alimentação a corrente de curto circuito passa somente por uma das metades da bobina e conseqüentemente não tem fluxo significativo oposto da outra metade da bobina.

A corrente de curto circuito é limitada pela reatância aumentada da metade da bobina em série com o alimentador sob falta.

A circulação de corrente I na bobina 1 do reator irá produzir uma queda de tensão reativa de IX e irá induzir na bobina 2 uma tensão $IX(fc)$ com direção oposta (polaridade oposta). As equações que representam estas relações como elas são aplicadas para o modelo proposto em (d) acima são:

$$E_b = E_a - I_1X + I_2X(fc) \quad (1)$$

$$E_c = E_a - I_2X + I_1X(fc) \quad (2)$$

Estas relações fundamentais podem ser convertidas para uma forma de um circuito equivalente possa planejado como:

$$\text{de (1), } E_a - E_b = I_1X - I_2X(fc) \quad (3)$$

$$\text{de (2), } E_a - E_c = I_2X - I_1X(fc) \quad (4)$$

Subtraindo (2) de (1), temos:

$$E_b - E_c = -I_1X + I_2X(fc) + I_2X - I_1X(fc)$$

$$E_b - E_c = -I_1X(1+fc) + I_2X(1+fc) \quad (5)$$

Subtraindo I_1Xfc de e para (3)

$$E_a - E_b = I_1X - I_2X(fc) + (I_1Xfc - I_1Xfc)$$

$$E_a - E_b = I_1X(1+fc) + (I_1 + I_2)(-Xfc) \quad (6)$$

Subtraindo I_2Xfc de e para (4)

$$E_a - E_c = I_2X - I_1X(fc) + (I_2Xfc - I_2Xfc)$$

$$E_a - E_c = I_2X(1 + fc) + (I_1 + I_2)(-Xfc) \quad (7)$$

Então as equações (5) até (7) são

$$E_b - E_c = -I_1X(1+fc) + I_2X(1+fc) \quad (5)$$

$$E_a - E_b = I_1X(1+fc) + (I_1 + I_2)(-Xfc) \quad (6)$$

$$E_a - E_c = I_2X(1 + fc) + (I_1 + I_2)(-Xfc) \quad (7)$$

Estas expressões são equivalentes (satisfazem o modelo) descrito em (e) acima. Este circuito é definido por uma reatância independente X e um fator de acoplamento f_c .

O objetivo da atuação do reator duplex é prover uma reatância suficientemente grande para limitar a contribuição de curto circuito proveniente do sistema nas duas barras onde um dos dois módulos estarão instalados, e vice versa, garantindo ainda que a regulação do sistema (queda de tensão da barra do gerador para os dois painéis) situe-se em níveis aceitáveis. Os valores utilizados para reator nos cálculos realizados nos itens anteriores foram:

X (reatância de um dos enrolamentos isolado) = 0,60

f_a (fator de acoplamento entre os enrolamentos) = 0,4

O circuito equivalente do reator duplex é o seguinte:

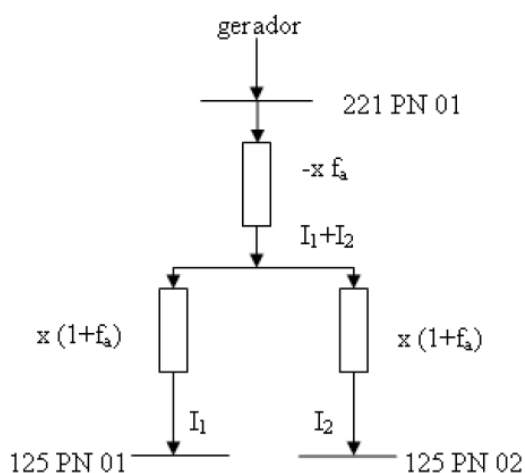


Figura 8 - Circuito equivalente do reator duplex

Na condição normal de operação do sistema, com o fluxo de potência distribuindo se de forma equilibrada para as barras 125 PN 01 e 125 PN 02, a impedância oferecida pelo reator é $X(1-f_a)$. Portanto, a queda de tensão entre os barramentos 221-PN 01 e 125-PN 01/02 será;

$$\Delta V = I_1 X(1-f_a) = I_2 X(1-f_a)$$

Considerando uma tensão nominal de 14,6 kV para o gerador (65,5 MVA), sua corrente nominal será de 2590 A. Isto é,

$$I1 + I2 = 2590 \text{ A}$$

Resulta então uma queda de tensão de:

$$\Delta V = I1 * X = I2 * X = 0,6(1-0,4) * (2590/2) = 466 \text{ V,}$$

Equivalente a uma regulação de $\Delta V = \frac{466}{\left(\frac{14600}{3}\right)} * 100 = 5,5\%$

Esse valor de regulação é muito bom, resultando numa tensão de 14,13kV nas barras 125-PN-01/02. Para uma faixa de operação do gerador entre 95% e 105% de sua tensão nominal (admitida como 14,6 kV), teremos uma tensão nas barras 125-PN-01/02 situando-se entre 13,5 a 14,8 kV.

Considerações sobre tolerância do fator de acoplamento do Reator Duplex:

A alteração da tolerância do reator de 0/+5% para -3/+5% não implica em variações significativas no nível de curto circuito, como podemos observar na comparação do caso simulado com tolerância de -3% e -0%.

$$Z=0,6 \Omega (-3\%) = 0,582 \Omega$$

$$fc=0,4 (-3\%) = 0,388$$

$$-X.fc = -0,388*0,582 = -0,225 \Omega$$

$$X(1+fc) = 0,582*(0,388+1) = 0,807 \Omega .$$

Tabela 3 – Valores esperados para curto circuito com reator duplex

CASO1						
Bus	Ip (A)	Ib ass (A)	I''k (A)	Ik (A)	Bus/Dev Volts	X/R
125-PN-01 (Z=0,6Ω, fc=0,4) (TOLERÂNCIA -0%)	64537	25582	25221	13946	13800	14,92
125-PN-01 (Z=0,582Ω, fc=0,388) (TOLERÂNCIA -3%)	65017	25768	25387	14096	13800	14,99

Na definição do valor da reatância do reator duplex, considerou-se que seu valor deveria ser tal que resultasse em um nível de curto circuito aceitável para os disjuntores, garantindo ainda um bom valor de regulação de tensão. A reatância do conjunto reator duplex mais gerador deve ser definida de forma a garantir as

condições mencionadas acima e, ainda, garantindo que a reatância do gerador seja um valor favorável sob o ponto de vista do projeto deste último.

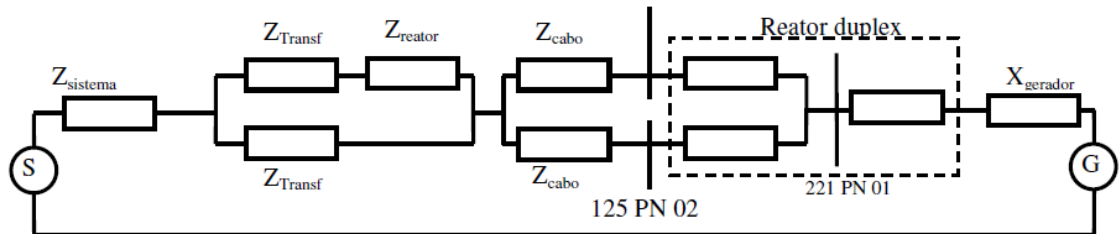


Figura 9 – Modelamento da reatância do conjunto reator duplex + gerador

O valor considerado para a reatância subtransitória do gerador nos cálculos realizados foi de 20% na base de 14,6 kV. Este é um bom valor para o projeto do turbo gerador, já que o valor típico de projeto para geradores desse tipo e porte, situa-se entre 15% e 25%, sendo conveniente evitar-se os valores mais altos por resultarem em projetos mais caros. Além disso, esse valor atende às condições de curto circuito e também, junto com os demais parâmetros definidos (resistências de aterramento, valor do reator duplex), resulta em níveis confortáveis de sobretensões para o sistema.

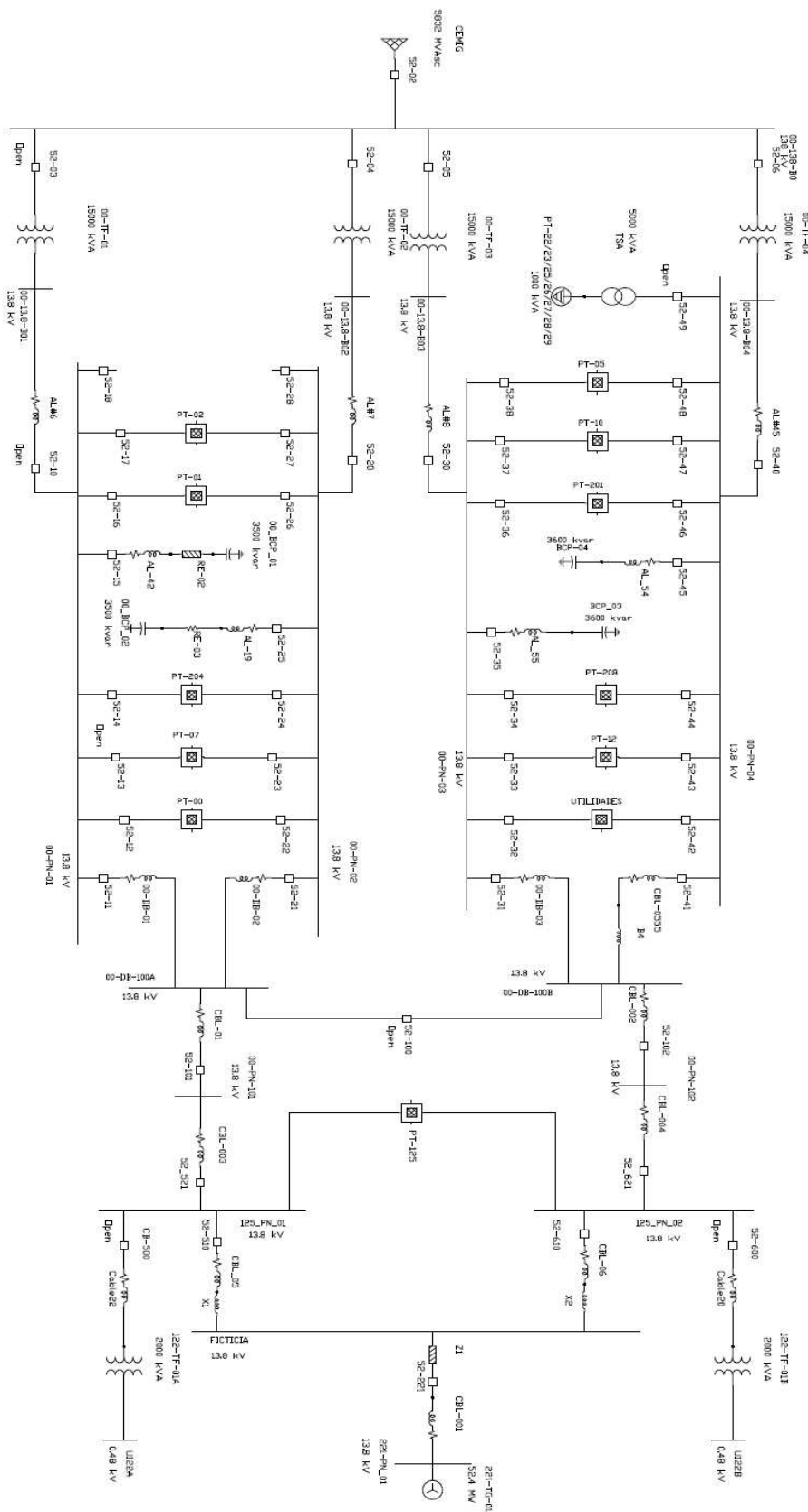
4 ESTUDO DOS CASOS

1. As condições simuladas e as tabelas abaixo mostram o curto circuito em cada barra que alimenta a planta da refinaria. Essa simulação é importante para definir a robustez necessária para cada equipamento instalado. Indicando as necessidades de troca, ou até mesmo instalar reatores nas barras para diminuir o nível de curto circuito da mesma.

O dimensionamento do curto circuito deve estar correto para eliminar uma falha. Na ocorrência de uma falta, um curto circuito trifásico ou fase terra, a primeira medida a ser executada é isolar a carga em falha ou até mesmo a barra. Essa medida só será bem sucedida se o equipamento, disjuntor, tiver capacidade de interrupção para corrente de pico e corrente simétrica de curto circuito. Caso contrário a abertura do disjuntor respectivo poderá causar explosão e perdas de equipamentos com parada do sistema.

Segue abaixo um diagrama identificando os disjuntores de entrada e disjuntores de distribuição. Esses disjuntores estão dimensionados para um curto circuito de 31,5kA em 13,8kV. Com o aumento de cargas e fontes de alimentação verifica-se o curto circuito em cada barra de 13,8kV, 4,16KV e 480V.

Figura 10 – Unifilar de Distribuição da Refinaria



A seguir seguem dados de 3 casos avaliados para o estudo de curto Circuito

Figura 11 – CASO 01 considerado no cálculo de curto circuito

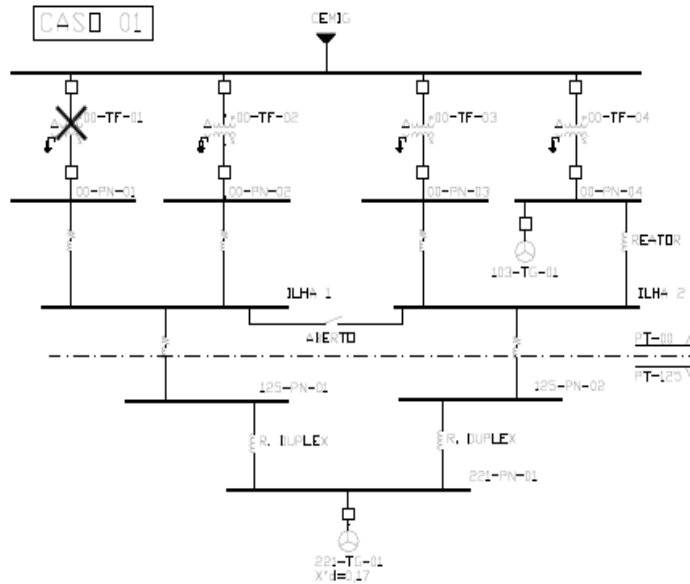


Tabela 4 – Níveis de curto circuito para o CASO 01

BARRA	TENSÃO (V)	NÍVEL DE CURTO CIRCUITO					
		I _p (kA)	I' _k (kA)	I _b Asym (kA)	I _k (kA)	I _G (A)	X/R
00-PN-01	13800	64619,0	26284,0	25630,0	13078,0	660,0	14,67
00-PN-02	13800	64624,0	26285,0	25631,0	13078,0	660,0	14,67
00-PN-03	13800	75235,0	29077,0	29762,0	19387,0	662,0	16,82
00-PN-04	13800	62491,0	24052,0	24730,0	16200,0	662,0	17,68
Fl-1	13800	64625,0	26285,0	25632,0	13078,0	660,0	14,67
00-PN-100	13800	75237,0	29077,0	29763,0	19388,0	662,0	16,82
01-13.8/A	13800	44649,0	20941,0	20941,0	12618,0	646,0	4,73
01-13.8/B	13800	46648,0	21069,0	21069,0	12601,0	646,0	5,51
02-PN-01A	13800	53762,0	22904,0	22910,0	13180,0	648,0	7,56
02-PN-01B	13800	54179,0	22994,0	23001,0	13179,0	648,0	7,73
121-13.8A	13800	26690,0	14632,0	14632,0	11612,0	634,0	2,54
121-13.8B	13800	25302,0	13446,0	13446,0	10425,0	634,0	2,64
123-13.8A	13800	29716,0	14216,0	14216,0	11434,0	633,0	2,46
123-13.8/B	13800	24499,0	13126,0	13126,0	10283,0	633,0	2,76
03-13.8/B	13800	32743,0	16733,0	16733,0	14296,0	642,0	2,18
03-13.8/A	13800	27928,0	16166,0	16166,0	12217,0	640,0	2,06
214-PN-02	13800	31485,0	16118,0	16118,0	13941,0	641,0	2,13
214-PN-01	13800	27026,0	16711,0	16711,0	11954,0	640,0	2,06

Figura 12 – CASO 02 considerado no cálculo de curto circuito

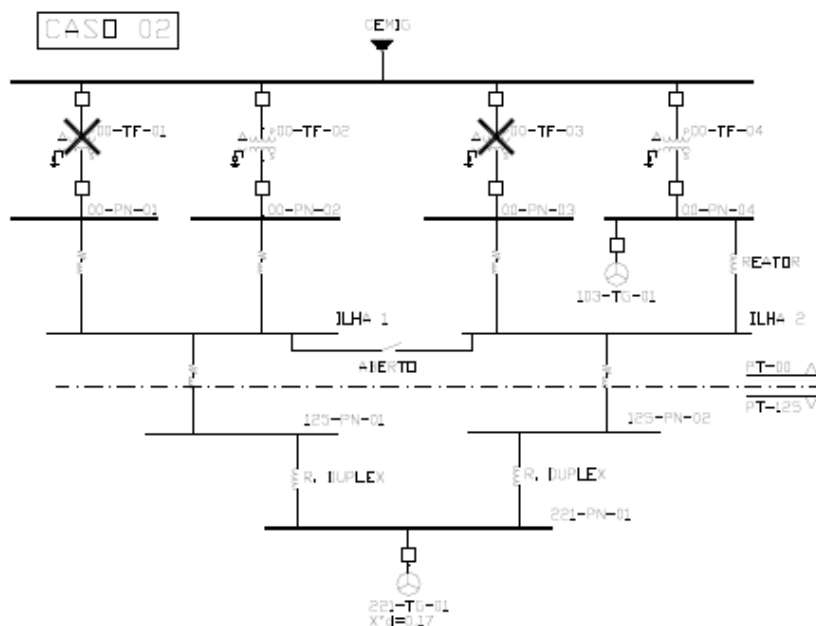


Tabela 5 – Níveis de curto circuito para o CASO 02

BARRA	TENSÃO (V)	NÍVEL DE CURTO CIRCUITO					
		I_p (A)	I''_k (A)	I_b Asym (A)	I_k (A)	I_G (A)	X/R
00-PN-01	13800	64564,0	25261,0	25608,0	13837,0	375,0	14,67
00-PN-02	13800	64569,0	25262,0	25609,0	13837,0	375,0	14,68
00-PN-03	13800	56952,0	21960,0	22532,0	12366,0	375,0	17,29
00-PN-04	13800	58382,0	22571,0	23095,0	13658,0	375,0	16,75
00-PN-100	13800	56957,0	21961,0	22534,0	12367,0	375,0	17,30
FI-1	13800	64571,0	25263,0	25610,0	13837,0	375,0	14,68
01-13.8/A	13800	44823,0	20926,0	20926,0	12405,0	373,0	4,73
01-13.8/B	13800	46620,0	21054,0	21054,0	12467,0	373,0	5,52
02-PN-01A	13800	53724,0	22886,0	22892,0	13055,0	374,0	7,56
02-PN-01B	13800	54142,0	22976,0	22983,0	13054,0	374,0	7,74
121-13.8A	13800	24128,0	12716,0	12716,0	8741,0	367,0	2,93
121-13.8B	13800	24654,0	13001,0	13001,0	9337,0	367,0	2,92
123-13.8A	13800	23279,0	12384,0	12384,0	8643,0	367,0	2,83
123-13.8/B	13800	23881,0	12699,0	12699,0	9224,0	367,0	2,83
214-PN-02	13800	27891,0	15288,0	15288,0	10014,0	370,0	2,55
214-PN-01	13800	26283,0	15120,0	15120,0	10571,0	370,0	2,13
03-13.8/B	13800	28872,0	15694,0	15694,0	10189,0	371,0	2,62
03-13.8/A	13800	27134,0	15539,0	15539,0	10773,0	370,0	2,17

Figura 13 – CASO 05 considerado no cálculo de curto circuito

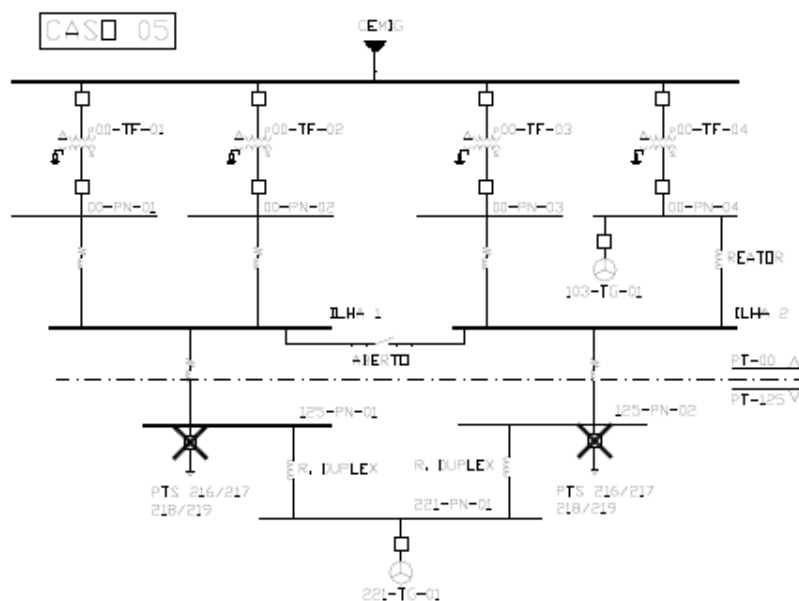


Tabela 6 – Níveis de curto circuito para o CASO 05

BARRA	TENSÃO (V)	NÍVEL DE CURTO CIRCUITO					
		I_p (A)	I''_k (A)	I_b Asym (A)	I_k (A)	I_G (A)	X/R
00-PN-01	13800	74915,0	29142,0	29659,0	20814,0	727,0	15,81
00-PN-02	13800	74914,0	29142,0	29658,0	20814,0	727,0	15,81
00-PN-03	13800	69945,0	28912,0	27882,0	19493,0	727,0	17,75
00-PN-04	13800	61326,0	23618,0	24267,0	16225,0	726,0	17,55
FI-1	13800	74918,0	29143,0	29660,0	20815,0	727,0	15,82
00-PN-100	13800	69947,0	28912,0	27883,0	19493,0	727,0	17,76
01-13.8/A	13800	49439,0	23465,0	23465,0	17676,0	719,0	4,40
01-13.8/B	13800	51738,0	23660,0	23660,0	17863,0	720,0	5,20
02-PN-01A	13800	60576,0	25995,0	25999,0	19074,0	723,0	7,23
02-PN-01B	13800	61045,0	26098,0	26103,0	19074,0	723,0	7,40
121-13.8A	13800	26044,0	14113,0	14113,0	11649,0	692,0	2,64
121-13.8B	13800	25125,0	13320,0	13320,0	10435,0	691,0	2,86
123-13.8A	13800	25103,0	13721,0	13721,0	11469,0	690,0	2,56
123-13.8/B	13800	24330,0	13005,0	13005,0	10292,0	689,0	2,78
03-13.8/B	13800	31747,0	17893,0	17893,0	14351,0	709,0	2,30
03-13.8/A	13800	27710,0	15988,0	15988,0	12230,0	705,0	2,11
214-PN-02	13800	30563,0	17333,0	17333,0	13993,0	707,0	2,25
214-PN-01	13800	26823,0	15543,0	15543,0	11967,0	704,0	2,08

2. Casos verificados no Estudo de Estabilidade

4.1 CASO 1

Em termos de arranjo do sistema compreende as duas fontes principais, a saber: A concessionária e o Gerador 221-TG-01 operando em paralelo.

O transformador 00-TF-01 está fora de operação, para atender ao requisito de curto circuito máximo nas barras, decorrente do fato do paralelismo dos dois transformadores alimentadores das Barras 00-PN-01 e 00-PN-02, resultar em corrente de curto circuito de interrupção superior ao nominal dos disjuntores.

Trata-se da condição operativa normal. A potência total da planta é de 53,309MW. A geração de cada uma das fontes é a seguinte:

Concessionária: 6,309MW;

221-TG-01: 42,0MW;

103-TG-01-201: 5,0MW.

O 22-TG-01 trabalha como controle de tensão na barra 221-PN-01 em 105% e com limitadores de acordo com curva de capacidade e com o regulador de velocidade atuando em “estatismo”. O grupo expensor 103-TG-01-201 opera com regulador de potencia no limitador e com possibilidade de geração de reativo para controle da tensão na barra 201-TG-01 de acordo com a curva de capacidade.

Os eventos analisados foram três:

Evento 1 – Curto circuito trifásico na concessionária, com tempo de eliminação da falta em 250ms e com restabelecimento da interligação. A finalidade é de verificar a capacidade da geração da planta permanecer operativa após uma falta na rede da concessionária;

Evento 2 – Curto circuito trifásico na concessionária, com eliminação da falta em 250ms, e com a perda da interligação, sendo todas as cargas da planta operando a partir da geração própria. No evento anterior foi possível verificar a capacidade de a geração local alimentar as cargas, nesse evento a verificação é de capacidade de manter o sincronismo entre os dois geradores e os motores síncronos em permanecer sincronizado com o sistema, isto é, permanecerem operativos;

Evento 3 – Abertura do disjuntor 52-610 e com redução da carga gerada pelo 221-TG-01, da condição anterior de 42MW até 20MW. A finalidade deste teste é de verificar a transição de corrente no reator duplex.

Característica do arranjo

A confiabilidade operativa desse arranjo é elevada, em termos de disponibilidade de fontes e de suportabilidade a contingências de tipo diferentes, até no mínimo a segunda. O reator duplex atua como filtro para o gerador 221-TG-01, pois reduz o impacto para o gerador das faltas e distúrbios do sistema, porém a capacidade do gerador restabelecer a tensão fica reduzida, mas pode ser compensada em parte por aumento do ajuste do ganho do regulador de tensão, porém permanece o longo tempo da excitatriz e após a eliminação do distúrbio ocorre à elevação de tensão para 115% por tempo em torno de 2s, valores aceitáveis e pela configuração praticamente inevitável.

A abertura do disjuntor 52-610, isolando a barra 125_PN_02 significa que a potência do gerador, em torno de 42MVA deve passar por somente um lado do reator duplex. Nessa condição a queda de tensão no reator foi a prevista, apesar de que no transitório ocorre nível de tensão mais elevado, chegando a cerca de 80% da tensão nominal de isolamento do mesmo. Para reduzir a corrente nesse ramo do reator foi simulada a diminuição gradativa da potência gerada pelo 221-TG-01.

4.2 CASO 2

Em termos de arranjo do sistema compreende as duas fontes principais, a saber: a concessionária e o gerador 221-TG-01 operando em paralelo.

Os transformadores 00-TF-02 e 00-TF-03 estão fora de operação. Portanto a interligação do gerador 221-TG-01 com o sistema ocorre com os dois transformadores. Trata-se da condição operativa com uma contingência.

A potência total da planta é de 53,310MW. A geração de cada uma das fontes é a seguinte:

Concessionária: 6,31MW;

221-TG-01: 42,0MW;

103-TG-01-201: 11,52MW ;

O 221-TG-01 trabalha como controle de tensão na barra 221-PN-01 em 105% e com limitadores de acordo com curva de capacidade e com o regulador de velocidade atuando em “estatismo”. O grupo expensor 103-TG-01-201 opera com regulador de potência no limitador e com possibilidade de geração de reativo para controle da tensão na barra 201-TG-01 de acordo com a curva de capacidade. Os eventos analisados foram dois:

Evento 4 – Curto circuito trifásico na barra U30A, conectada a barra 125-PN-01. Foram simulados tempos de eliminação de 250ms até 100ms, sendo apresentados os resultados de 150ms, tempo máximo para a eliminação da falta em que o sistema permanece estável. A finalidade é de verificar a capacidade da geração da planta e os motores síncronos permanecerem operativos após uma falta na barra de 13,8kV;

Evento 5 – Semelhante ao evento 4 somente com alteração da barra para a 125-PN-02. Semelhante ao evento 5 a estabilidade foi garantida para tempo de eliminação de faltas inferiores a 150ms. A finalidade é de verificar a capacidade da geração da planta e os motores síncronos permanecerem operativos após uma falta na barra de 13,8kV

Característica do arranjo

A confiabilidade operativa desse arranjo é média, em termos de disponibilidade de fontes e de suportabilidade a contingências de tipo diferentes, fica estável somente com a primeira e na segunda será necessário a rejeição de carga. O reator duplex atua como filtro para o gerador 22-TG-01, pois reduz o impacto para o gerador das faltas e distúrbios nas barras. O reator representa uma impedância entre o gerador e as cargas, dificultando o restabelecimento da tensão. Essa condição pode ser compensada, em parte, por aumento do ajuste do ganho do regulador de tensão, porém permanece o longo tempo da excitatriz. Resulta assim que após a eliminação do distúrbio ocorre a elevação de tensão até 115% por tempo em torno de 2s, valores aceitáveis e pela configuração praticamente inevitável.

Nesse arranjo a contingencia de perda da geração local, o 221-TG-01, significa a transferência de 42MW para os transformadores. A carga nos transformadores é de 25MVA para 00-TF-04 e de 32,6MVA para o 00-TF-01. Com essa corrente os transformadores são sobrecarregados. Caso o ajuste da unidade 51 atenda ao princípio de sobrecarga de 50% essas unidades não operam e a proteção seria das unidades de sobrecarga que apresentam tempo de operação elevada, pois a constante de tempo dos transformadores é de aproximadamente 20minutos. Nessa ocorrência a solução será de emitir sinal para o operador para que o mesmo tome as medidas necessárias, entre outras, a de possível ligar outros transformadores, se for possível, ou de reduzir a carga de acordo com programa pré-estabelecido. O tempo para a tomada de providencia depende da carga anterior do transformador e a melhor maneira será a do operador é de certificar que todo o sistema de resfriamento esteja ligado e ficar de sobreaviso para atender o alarme de sobrecarga do transformador.

4.3 CASO 2A

Esse arranjo significa que o 221-TG-01 está fora de operação e somente o gerador interno, o 210-TG-01-201 está operativo fornecendo os 5,0MW. A fonte principal para a planta é a concessionária que fornece 48,393MW.

Os quatro transformadores de entrada da concessionária estão em operação e assim com elevada confiabilidade operativa.

Nesse arranjo não foi feito simulação tendo em vista que se trata de alimentação do Sistema Elétrico de grande porte, sem restrição operativa.

4.4 CASO 3

Nessa condição a fonte para as cargas internas são os geradores internos, o 221-TG-01 e o 103-TG-01-201. A concessionária está fora de operação.

Os transformadores de entrada da concessionária estão fora de operação.

Trata-se da condição operativa em contingência.

Concessionária: 0,0MW;

221-TG-01: 48,337MW

103-TG-01-201: 5,0MW.

O 221-TG-01 trabalha como “Swing”, com ajuste de tensão em 105% na barra 221-PN-01, com limitadores de acordo com curva de capacidade e o regulador de velocidade atuando em “estatismo”. A potência solicitada ultrapassou os 45MW de capacidade da turbina, mesmo com o resfriador de ar. O grupo 103-TG-01-201 opera com regulador de potencia no limitador e com possibilidade de geração de reativo para controle da tensão na barra 201-TG-01 de acordo com a curva de capacidade.

Os eventos analisados foram três:

Evento 6 – Curto circuito trifásico na barra U30B, conectada a 125-PN-02, com tempo de eliminação de falta de 150ms. Os motores síncronos 210-MK-02A e 210-MK-02B perdem o sincronismo aproximadamente 90ms após o evento; O sistema foi capaz de restabelecer sendo que devido a configuração, com reator duplex que aumenta a impedância entre o gerador e as cargas.

Evento 7– Partida do motor síncrono 310-MK-02 de 3800kW, com partida direta no 13,8kV, barra 125-PN-01. O regulador de tensão do gerador entra em ação e restabelece a tensão fornecendo reativo até o limite estipulado na curva de capacidade. Será de capital importância que o regulador esteja ajustado nessa condição como “Swing” e com ajuste de tensão, e os limitadores de reativo ajustado para valor até a capacidade nominal do gerador.

Evento 8 – Partida do motor assíncrono 03-MK-01B de 5825kW, com partida direta na barra de 13,8kV, 02-PN-01B. O regulador de tensão do gerador entra em ação e restabelece a tensão fornecendo reativo até o limite estipulado na curva de capacidade. Será de capital importância que o regulador esteja ajustado nessa condição como “Swing” e com ajuste de tensão, e os limitadores de reativo ajustado para valor até a capacidade nominal do gerador.

A confiabilidade operativa desse arranjo está dependente do conjunto gerador turbina 221-TG-01. Por se tratar de uma condição de emergência a carga total

deveria ser reduzida para possibilitar certa folga para os geradores da planta. A definição do valor faz parte de outro estudo que é o de rejeição de cargas. Porém como base, a folga de 20%, estando a turbina sem restrições operativas é o valor mais que adequado. Portanto o valor adequado de carga para o gerador 221-TG-01 será de 34 a 36MW. Essa reserva deve considerar o modo de operação do resfriador, pois se esse entra somente com a turbina em torno de 42MW, o limite operativo seria de 30 a 32MW.

4.5 EVENTO 1 DO CASO 1

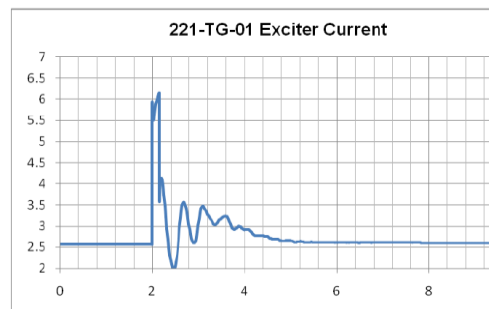
O evento é um curto circuito trifásico nos terminais da Concessionária na SE de 138kV, com tempo de remoção de 150ms. Os geradores da planta sentiram a falta, mas permaneceram estáveis.

**Figura 14 – Ângulo de potência
221-TG-01**



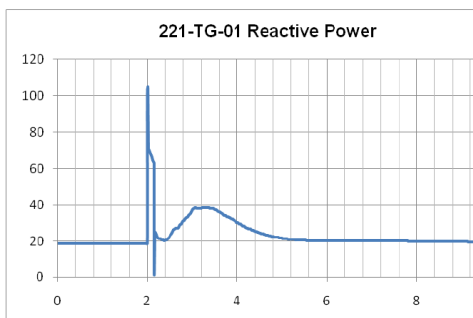
Representa o ângulo de carga do gerador em graus elétricos. Os valores são adequados para a aplicação e apresenta folga elevada

**Figura 15 – Corrente de excitação
221-TG-01**



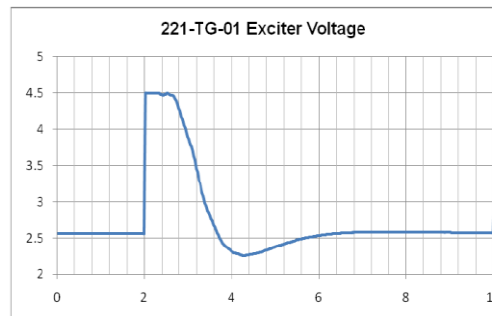
Representa a corrente de excitação do gerador em pu, relativo a corrente na condição de tensão nominal. Os valores estão muito perto da corrente de teto ajustada. Pelo fato da excitação ser independente da tensão dos terminais do gerador, não sofre redução devido à falta

Figura 16 – Potência reativa 221-TG-01



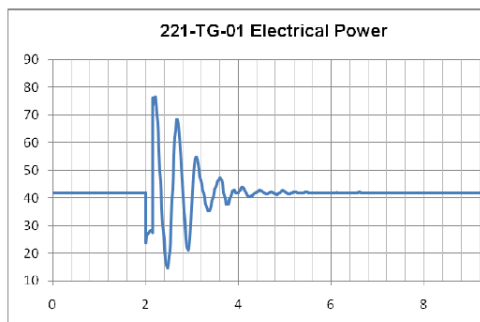
Representa a potência reativa em MVAr fornecida pelo gerador. O efeito do curto circuito provocou solicitação de reativo durante cerca de 2 segundos. O pico de reativo após a eliminação da falta foi perto de 40MVAr para atender o requisito das cargas.

**Figura 17 – Tensão de excitação
221-TG-01**



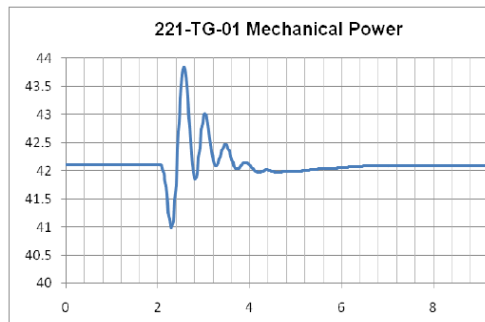
Representa a tensão de excitação em pu, atingindo a tensão de teto durante aproximadamente 600ms

Figura 18 – Potência elétrica 221-TG-01



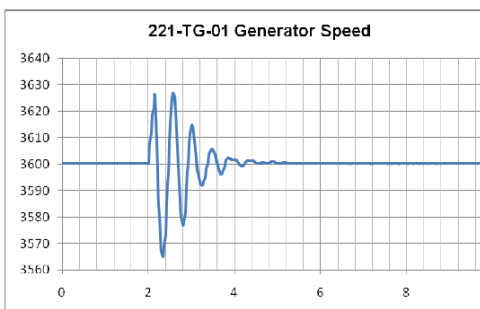
Representa o ângulo de carga do gerador em graus elétricos. Os valores são adequados para a aplicação e apresenta folga elevada

Figura 19 – Potência mecânica 221-TG-01



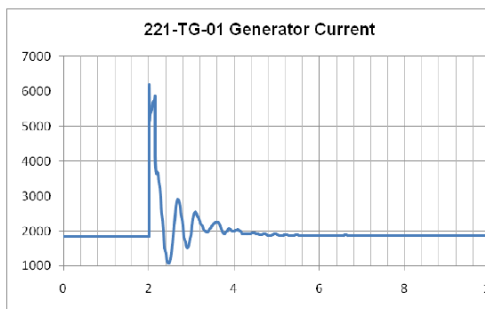
Representa a potência fornecida pela turbina. Para efeito de estudos foram adotados valores praticamente no limite.

Figura 20 – Velocidade do gerador 221-TG-01



Representa a rotação do gerador em RPM considerando a velocidade síncrona e não a velocidade do grupo. A oscilação da frequência foi de 2% e, portanto sem restrição para as cargas. A velocidade após os transitórios retornou a nominal devido à operação em paralelo com o sistema

Figura 21 – Corrente do gerador 221-TG-01



Representa a corrente em Amperes fornecida pelo gerador

Figura 22 – Ângulo Absoluto de potência 103-TG-01

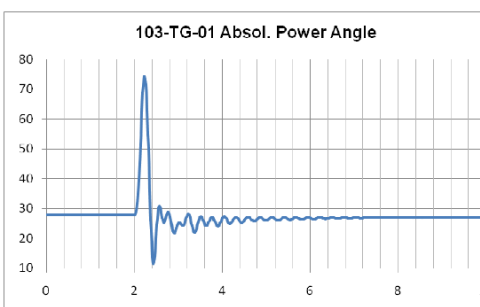
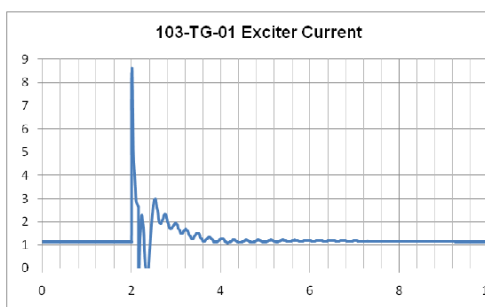


Figura 23 – Corrente de excitação 103-TG-01



01
Figura 24 – Potência reativa 103-TG-

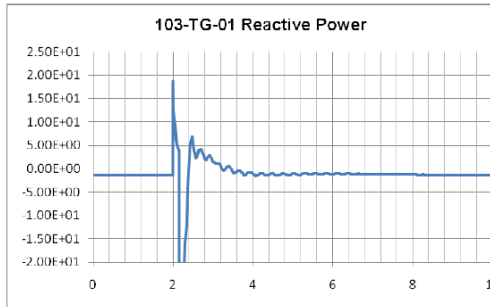
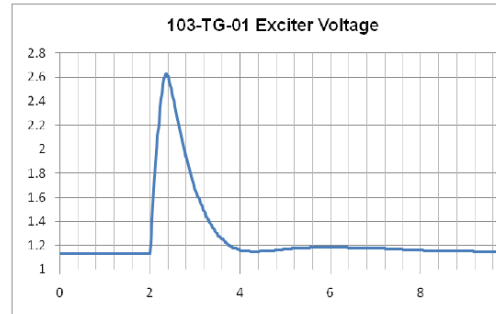
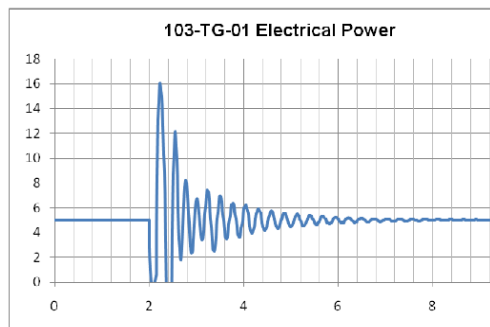


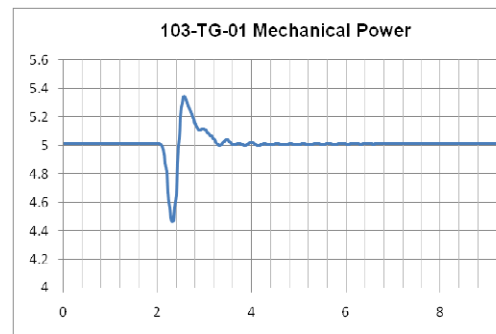
Figura 25 – Tensão de excitação
103-TG-01



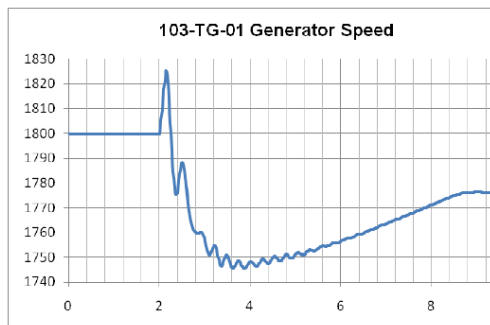
TG-01
Figura 26 – Potência elétrica 103-



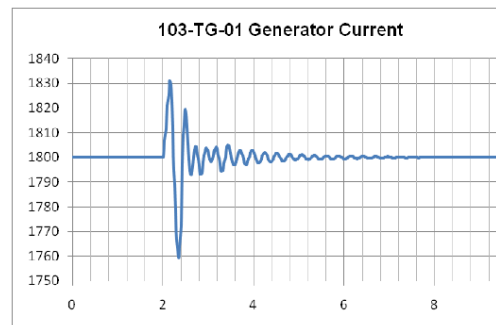
TG-01
Figura 27 – Potência mecânica 103-



103-TG-01
Figura 28 – Velocidade do Gerador

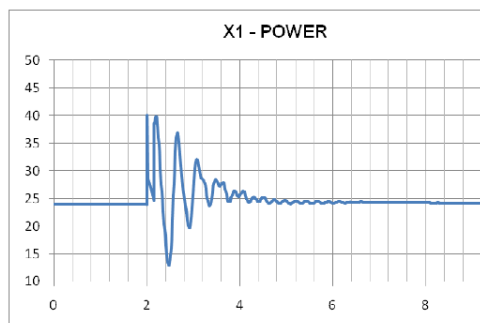


103-TG-01
Figura 29 – Corrente do gerador



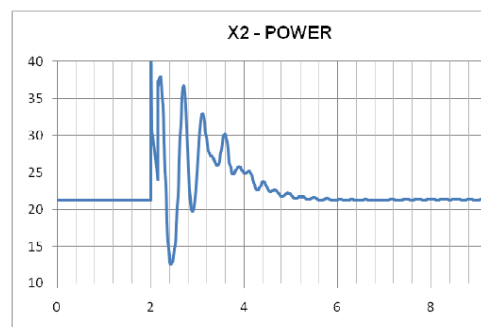
Reator Duplex

Figura 30 – Potência X1



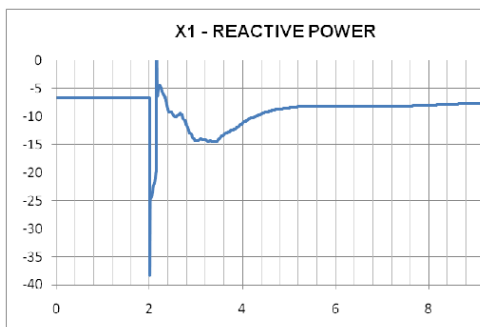
O gráfico representa a potência em MVA transferido pelo setor X1 do reator duplex. A potência permaneceu em 23,8MVA porém com picos de até 40MW

Figura 31 – Potência X2



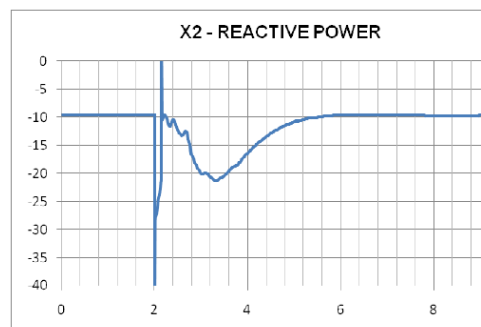
O gráfico representa a potência em MVA transferido pelo setor X2 do reator duplex. A potência permaneceu em 22MVA com picos de até 40MVA.

Figura 32 – Potência reativa X1



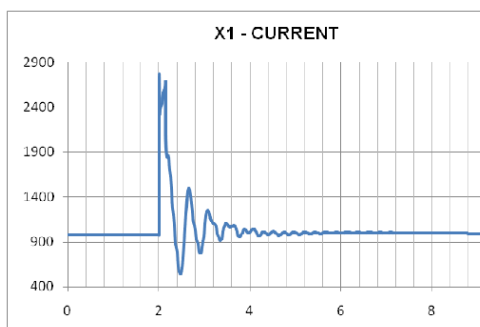
O gráfico representa a potência em MVar transferido pelo setor X1 do reator duplex

Figura 33 – Potência reativa X2



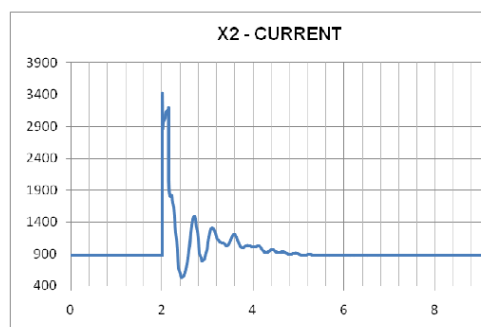
O gráfico representa a potência em MVar transferido pelo setor X2 do reator duplex

Figura 34 – Corrente X1



O gráfico representa a potência em MVar transferido pelo setor X2 do reator duplex

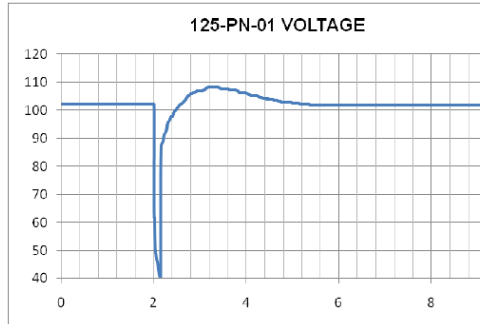
Figura 35 – Corrente X2



O gráfico representa a corrente circulante pelo setor X2 do reator duplex. Permaneceu em 900A, porém com picos de até 3200A. Essas elevações bruscas de corrente provocam sobretensões entre os dois ramos e entre as espiras do mesmo ramo

Tensão e corrente nas barras durante transitório

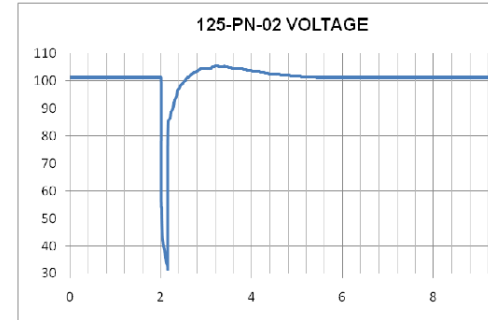
Figura 36 – Tensão 125-PN-01



Representa a tensão na barra 125-PN-01.

Durante o transitório de perda da concessionária a queda de tensão foi da ordem de 40%, porém sem danos para os equipamentos, quer sejam os eletrônicos que atendem a ITIC e aos motores

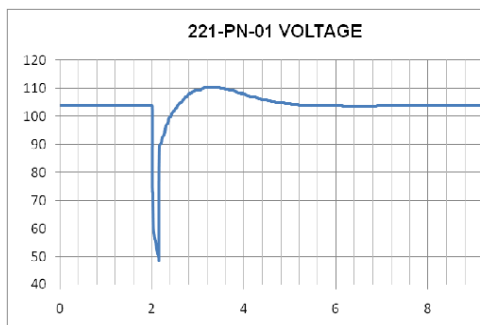
Figura 37 – Tensão 125-PN-02



Representa a tensão na barra 125-PN-02.

Durante o transitório de perda da concessionária a queda de tensão foi da ordem de 32%, porém sem danos para os equipamentos, quer sejam os eletrônicos que atendem a ITIC e aos motores. A maior queda foi devido ao fato de que para essa barra existem dois transformadores entre o gerador e o ponto de curto circuito.

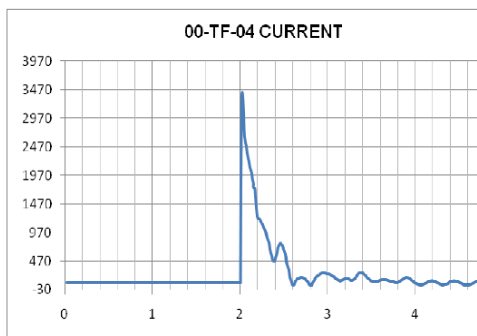
Figura 38 – Tensão 221-PN-01



Representa a tensão na barra 221-PN-01, isto é, a tensão nos terminais do gerador 221-TG-01. A tensão base é 14,6kV, assim o valor de 98% representa 103,6. Durante o transitório de falta na concessionária a queda de tensão foi da ordem de 50% da falta foi na ordem de 10%, adequado para os equipamentos

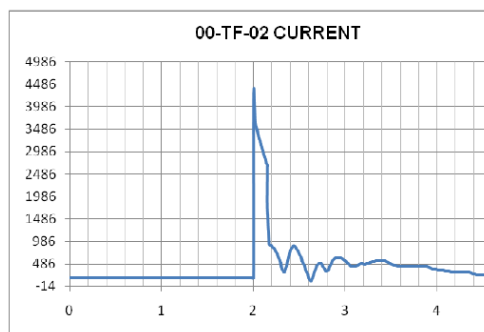
Corrente nos transformadores durante o Transitório

Figura 39 – Corrente 00-TF-04



Representa a corrente passante pelo transformador 00-TF-04 em A,

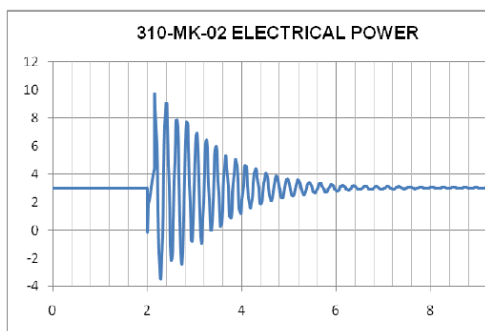
Figura 40 – Corrente 00-TF-02



Representa a corrente passante pelo transformador 00-TF-02 em A, foi maior que a dos transformadores 00-TF-03 e 00-TF-04 pelo fato de que somente um transformador está entre o gerador 221-TG-01 e o ponto de falta

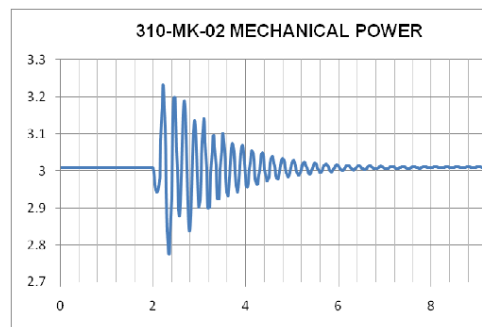
Os motores síncronos são os mais sensíveis na ocorrência de eventos pelo fato da perda de torque. A variação de ângulo de carga provoca elevada oscilação que podem ser amortecidas ou não amortecidas que provocam a perda de estabilidade e finalizando com o desligamento. O amortecimento é muito elevado pelo fato da elevada impedância entre os terminais do gerador e o ponto de falta.

Figura 41 – Potência elétrica 310-MK-02



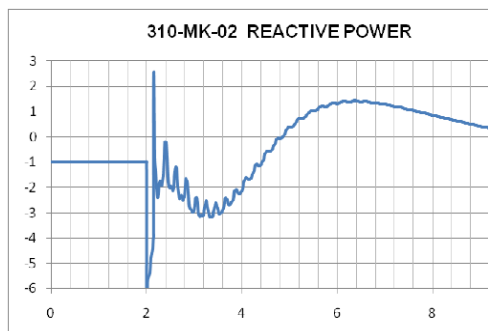
Representa a potência ativa, em MW, solicitada pelo motor. As oscilações são amortecidas, e ocorrem devido ao tipo do motor que é síncrono

Figura 42 – Potência mecânica 310-MK-02



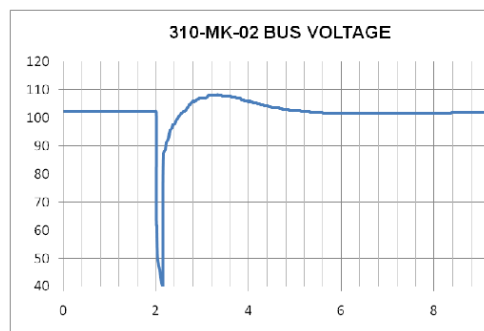
Representa a potência ativa, em MW, solicitada pela carga do motor durante os eventos.

Figura 43 – Potência reativa 310-MK-02



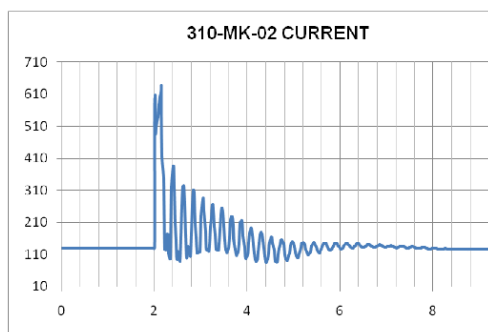
Representa a potência reativa, em kVAr, fornecida pelo motor. No primeiro instante fornece reativo a falta, porém com a eliminação da falta o fluxo inverte e entra em dupla oscilação uma da resposta do sistema e outra o regulador

Figura 44 – Tensão na barra do 310-MK-02



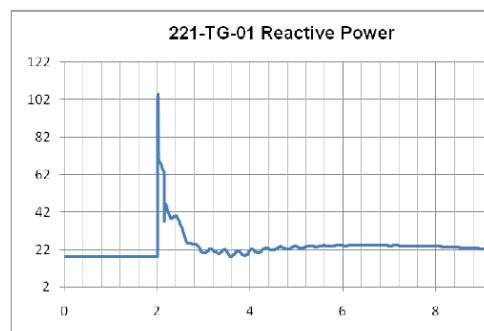
Representa a tensão no barramento de alimentação do motor

Figura 45 – Corrente do 310-MK-02



Representa a corrente solicitada pelo motor durante os eventos. As oscilações de corrente são devidas as oscilações de potência ativa. Fato interessante é que a corrente tende a reduzir logo após os primeiros ciclos, porém o regulador de tensão, por ser de alimentação independente, restabelece a corrente

Figura 46 – Potência reativa 221-TG-01



A potencia reativa foi elevada nos primeiros ciclos e após apresenta o decréscimo devido a impedância do gerador. A potencia reativa fornecida antes da falta praticamente permaneceu após os transitórios

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi realizada uma modificação no sistema elétrico, com a instalação de novo gerador e novas cargas motóricas, causaram um aumento do nível de curto circuito

A solução apresentada para limitar o nível de curto circuito em várias barras, dependendo do cenário operacional presente seria a inclusão de reator limitador de corrente de curto circuito.

Recomenda-se para um melhor cenário de operação do sistema a inclusão do reator limitador de curto circuito na ilha 1.

Dentre as soluções proposta a mais viável seria a implementação de reator duplex, apesar de ser mais caro que transformadores de alta impedância, a substituição de transformadores causaria custos de implementação, de produção e estratégias de substituição sem interrupção da produção. Assim a implantação do novo sistema e do reator duplex para limitação do nível de curto-circuito foi analisado com a simulação em programas como o ETAP e PTW. A escolha da solução de implantação do reator levou em conta análises técnicas, porém também análises financeiras que foram realizadas pelo cliente final. Análises estas que não estão apresentadas neste trabalho.

No estudo de fluxo de potência foi verificado que a permanência do reator duplex no sistema mesmo na ausência do gerador proporcionaria uma melhor regulação de tensão.

A princípio o estudo de estabilidade nos mostra que o ilhamento no caso de falta na linha da concessionária permite a permanência do sistema através do gerador, não causando instabilidade no gerador caso a falta seja removida até 100mS.

A operação do sistema sem o turbo gerador 221-TG-01, somente com os disjuntores 52-510 e 52-610 abertos, para evitar paralelismo da rede, entre painéis 125-PN-01 e 125-PN-02 via o reator 125-RE-01.

Na PT-00, ilha 01, somente um transformador, 00-TF-01 ou 00-TF-02, poderá estar ligado quando o turbo gerador 221-TG-01 estiver operando, isto porque o paralelismo destes resulta em níveis de curto circuito acima dos especificados para os painéis de 13,8 kV na PT-00/PT-125 barras 00-PN-01, 00-PN-02, 00-PN-101 e 125-PN-01. Isto se deve a não existência do reator de limitação de curto circuito

Em função do acréscimo de potência no sistema: Carteira de Gasolina e Cogeração, o TIE 00-52-100 deve estar sempre aberto, isto devido a limitação do nível de curto circuito nas subestações de área.

6 BIBLIOGRAFIA

[1] Paul S. Hamer, “Application of the Duplex Reactor- An Unusual and Forgotten Technique to Reduce Short Circuit Duty” IEEE Trans. Vol 42, No 2, March/April, 2006;

[2] E.G.Merrick, “The Duplex Reactor and Its Application”. General Electric Review, September, 1944;

[3] “Calculation of A-c Short Circuit Duty”, Industrial Power Systems Data Book, General Electric, Dec. 4, 1961;

[4] “Industrial Power Systems Handbook”, D. L. Beeman, Ed. New York, McGraw-Hill, Nov. 18, 1958;

[5] Richard F. Dudley; Michael Sharp; Antonio Castanheira; Behdad B. Biglar “Reactors” Electric Power Engineering Handbook-Second Edition-2007;

[6] IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems - IEEE Std 551-2006;

[7] IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis - IEEE Std 399-1997;

[8] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants - IEEE Std 141-1993;

[9] IEEE - Std. 242 - Recommended Practice For Protection And Coordination Of Industrial And Commercial Power Systems;

[10] IEEE 522 – 2004 - IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating Current Electric Machines;

[11] IEEE 519 Std – 1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems;

- [12] IEEE Std C37.011-1994 - IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis;
- [13] IEEE Std 399-1997 - IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis;
- [14] IEEE/ANSI C37.06-2000 - AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis — Preferred Ratings and Related Required Capabilities;
- [15] IEEE Std C62.21-2003 - IEEE Guide for Application of Surge Voltage Protective Equipment on AC Rotating Machinery 1000V and Greater;
- [16] ANSI/IEEE C37.96 – 1988 – IEEE Guide for AC Motor Protection;
- [17] ANSI/IEEE C37.91 – 1985 – IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers;
- [18] ANSI/IEEE C37.04-1979 - IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis;
- [19] Norma ANSI C37-010 de 1999, “Aplication Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis”;
- [20] Norma IEC909 de 1988, “Short-circuit Current Calculation in Three-Phase A.C. Systems”;
- [21] Norma NBR 5356 de 1993, “Transformadores de Potência”;
- [22] Norma técnica: ANSI C57.16 (1996);
- [23] ETAP 7.0 – User Guide – Tutorial;
- [24] ETAP – Chapter 22 – Transient Stability Analysis.