

ESTUDOS ELÉTRICOS PARA UM SISTEMA INDUSTRIAL DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO *OFFSHORE*

Leandro Peçanha Isidoro

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Walter Issamu Suemitsu
(Orientador)

Eng. Carlos Carreiro Cavaliere
(Orientador externo)

Prof. Sergio Sami Haazan

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2006

Índice

Apresentação.....	01
1. Introdução.....	03
1.1. Quadro atual da produção de petróleo X demanda.....	03
1.2. Detalhes de um FPSO.....	05
2. Dimensionamento e Detalhamento do Sistema Elétrico.....	07
2.1. Lista de Equipamentos Elétricos.....	07
2.2. Análise de Cargas.....	07
2.3. Dimensionamento dos transformadores.....	16
2.4. Dimensionamento dos geradores.....	17
2.5. Características principais do sistema.....	19
3. Filosofia de Operação de Plataforma e Condições de Operação.....	25
3.1. Filosofia de operação da plataforma.....	25
3.2. Condições de operação.....	28
4. Estudos de Fluxo de Potência e Curto-Circuito	
4.1. Fundamentação Teórica do Estudo de Fluxo de Potência.....	30
4.2. Modelagem do sistema no <i>software</i>	34
4.3. Fundamentação Teórica do Estudo de Curto-Circuito.....	35
5. Análise dos Resultados Obtidos na Simulação.....	44
5.1. Parametrização do diagrama unifilar no <i>software</i>	44
5.2. Estudo de curto-circuito para a condição 1 - quatro geradores principais conectados ao sistema.....	45
5.3. Condição 1 empregando o RLC.....	52
5.4. Estudo de fluxo de potência para a condição 1 - quatro geradores principais conectados ao sistema.....	57
5.5. Estudo de fluxo de potência para a condição 2 - três geradores principais conectados ao sistema.....	64
5.6. Estudo de fluxo de potência para a condição 3 – operação de emergência.....	67
6. Conclusões.....	69

6.1. Geradores.....	71
6.2. Transformadores.....	72
6.3. Painéis elétricos.....	72
Referências.....	74

Apresentação

O objetivo deste trabalho é aplicar em um projeto elétrico industrial parte dos conhecimentos adquiridos durante os anos de estudo na faculdade de Engenharia Elétrica.

O foco principal é dimensionar e detalhar os principais equipamentos que compõem o sistema elétrico de uma plataforma de produção de petróleo. Este projeto inclui a análise das cargas, o dimensionamento do sistema elétrico e os estudos de Fluxo de Potência e de Curto-Circuito.

O Capítulo 1 apresenta de forma introdutória o panorama nacional atual da produção de petróleo comparativamente com a demanda, além das projeções das empresas de petróleo para a necessidade mundial por petróleo e os meios para se alcançar o nível de produção exigido. Além disto, este capítulo apresenta o tipo de plataforma de produção utilizado como exemplo neste trabalho, o FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*).

Em seguida, no Capítulo 2, é apresentado o dimensionamento do sistema elétrico, compreendendo os procedimentos para configurar os principais equipamentos da planta industrial. Desta forma, como passo inicial, foi realizada uma análise de cargas visando dimensionar as principais características do sistema elétrico, tais como a configuração dos painéis, dos geradores e transformadores, tendo como ponto de partida uma lista de equipamentos, que relaciona todos os equipamentos elétricos do sistema.

Feita a análise de cargas, também denominada balanço elétrico, seguiu-se o detalhamento do sistema propriamente dito, descrevendo os detalhes da instalação, abordando os temas: geração (principal e emergência), características dos painéis e aterramento dos equipamentos.

O Capítulo 3 trata da filosofia de operação da plataforma assim como as condições de operação do sistema elétrico. Neste ponto é abordada a questão da redundância da alimentação, que garante a continuidade de operação e maior segurança. A filosofia de operação é muito importante para a realização dos estudos elétricos, pois cada configuração leva a diferentes resultados.

O capítulo 4 descreve os estudos de Fluxo de Potência e Curto-Circuito, englobando a teoria que compreende estes estudos incluindo a formulação matemática pertinente a cada estudo.

O capítulo seguinte relaciona os principais resultados obtidos na simulação realizada no *software* DlgSILENT *PowerFactory* versão 13.0, de acordo com as condições de operação apresentadas no capítulo 3, possibilitando realizar a especificação dos principais equipamentos do sistema.

Por fim, as conclusões pertinentes a este trabalho encontram-se no capítulo 6, em que é feita uma análise geral dos resultados obtidos, e são finalizadas as principais especificações dos componentes do sistema elétrico.

Capítulo 1: Introdução

1.1. Quadro atual da produção de petróleo X demanda

Da criação da Petrobras, passando pela exploração em alto-mar, com a descoberta em 1969 do Campo de Guaricema (SE), até 1974, quando foi descoberto o primeiro campo de Garoupa, na Bacia de Campos (RJ), a produção subiu para 178 mil barris por dia, cerca de 29% do consumo do país. Dia após dia, a Bacia de Campos tornava-se a mais importante província petrolífera brasileira. Em 1984, a produção era de 500 mil barris por dia e representava 45% das necessidades nacionais.

A partir de 1984, com as descobertas dos campos gigantes Albacora e Marlim, nas águas profundas da Bacia de Campos, e a descoberta de Roncador em 1996, a Companhia mudou de patamar, chegando em 1998 a 1 milhão de barris por dia, cerca de 58% do consumo nacional e atingindo em 2002 a produção de 1,5 milhão de barris por dia, ou seja, 85% das necessidades do mercado brasileiro.

Atualmente, a empresa tem ampliado seus investimentos para extração e produção de petróleo em águas cada vez mais profundas. Para tanto, utilizam-se de métodos cada vez mais modernos para alcançar este objetivo. O objetivo da produção diária de petróleo projetada para 2010 é de 2,3 milhões de barris por dia (bpd) em face à demanda projetada de 2 milhões de bpd. Recentemente, no início de 2006, a marca da auto-suficiência foi atingida pela plataforma P-50, com a produção de petróleo chegando a 1,8 milhão de bpd.

O mapa abaixo (figura 1.1) ajuda a ilustrar os principais reservatórios descobertos nos períodos de 1984 a 2003, o que indica que, conforme os planos de avaliação, o futuro da produção de petróleo está no mar, em águas profundas e ultra-profundas.

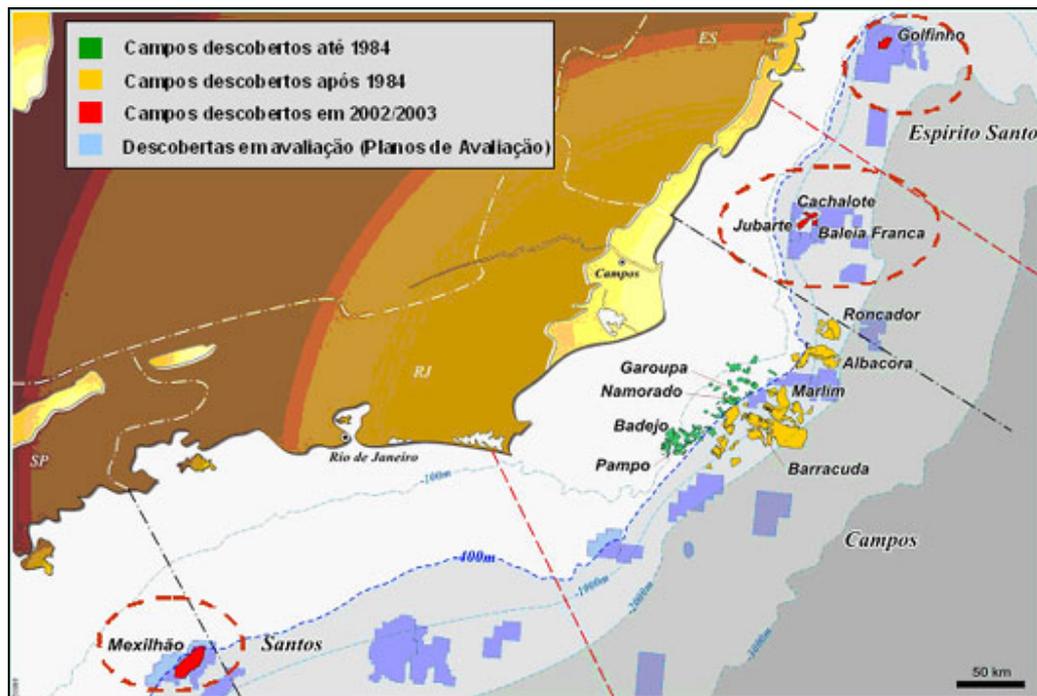


Figura 1.1: Campos descobertos com data.

Na figura pode-se observar as bacias de Santos, Campos e Espírito Santo. Essas bacias são definidas pelas linhas intermediárias que definem os limites dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo.

No Brasil, as reservas de petróleo e/ou gás da Petrobras estão distribuídas da seguinte forma: 14% em terra firme e 86% em águas rasas, profundas e ultra-profundas. Do total das reservas marítimas, cerca de 65% encontram-se em profundidade superior a 400m.

Como o futuro da exploração de petróleo está no mar, principalmente em águas profundas e ultra-profundas, as empresas de petróleo investem cada vez mais em plataformas de exploração e produção adaptadas sobre o casco de navios, com capacidade de operação em condições adversas do mar, e prospecção sob lâmina d'água de milhares de metros. Atualmente, a Petrobrás está desenvolvendo um projeto para produzir a mais de três mil metros de profundidade.

Neste ponto entram as plataformas de produção, subdividindo-se em alguns tipos tais como:

- Plataformas semi-submersíveis (SS)

- FPSO's (*Floating Production Storage and Offloading*)
- Fixas ou Jaqueta (*Jacket*)
- TLP (*TensionLeg Plataforma*)

Além das plataformas de produção existem as plataformas destinadas somente ao armazenamento e tratamento do óleo, denominadas FSO's (*Floating Storage and Offloading*). O transporte do óleo é feito por navios petroleiros.

1.2. Detalhes de um FPSO

Os FPSOs são navios com capacidade para realizar o tratamento básico do petróleo, armazená-lo o petróleo e prover a transferência do petróleo e/ou gás natural. No convés do navio, é instalada uma planta de processo para separar e tratar o óleo produzido pelos poços. Neste processo o petróleo é separado da água, do gás e do sal. O petróleo é então armazenado nos tanques do próprio navio, sendo transferido para um navio aliviador de tempos em tempos (procedimento de descarregamento, comumente denominado *Offloading*).

O navio aliviador é um petroleiro que atraca na popa ou proa do FPSO para receber petróleo que foi armazenado em seus tanques e transportá-lo para terra. O gás comprimido é enviado para terra através de gasodutos e/ou re-injetado no reservatório, além de ser aproveitado para a geração de energia elétrica por turbogeradores. Os maiores FPSOs atualmente projetados têm sua capacidade de processo em torno de 200 mil barris de petróleo por dia, com produção associada de gás de aproximadamente 6 milhões de metros cúbicos por dia.

O processamento é importante para o posterior armazenamento, pois o óleo extraído não é puro, este contém quantidades variáveis de água, gás, sal e outras impurezas. Armazenar o óleo não tratado significa perda de dinheiro, pois a capacidade de armazenamento não estará sendo utilizada de forma eficiente. Daí a importância dos diversos equipamentos para separar o que realmente se deseja armazenar (óleo e gás) e o que se deseja descartar.

A questão do armazenamento é importante principalmente para áreas afastadas da costa, pois além de dificultar o escoamento através de dutos (quando existem), determina a frequência de descarregamento do óleo (*offloading*) através dos navios aliviadores.

O FPSO se conecta ao reservatório de produção através de cabos elétricos, cabos de sinais de controle e *raisers*, que são tubos flexíveis para escoamento do óleo do reservatório para a plataforma.

Após a extração do óleo, seguem as fases do processamento do óleo bruto, que visam separar os componentes do material nas suas diversas fases (óleo, água e gás), utilizando diversos equipamentos específicos para cada finalidade. Em seguida o óleo é armazenado, o gás é escoado ou reaproveitado e a água é devolvida ao mar após os devidos tratamentos.

Além dos equipamentos voltados para a produção do óleo, existem os equipamentos necessários aos outros serviços da plataforma: Telecomunicações, Segurança, Ventilação e Ar Condicionado (VAC) e Instrumentação.

Uma grande quantidade dos equipamentos da plataforma necessita de alimentação e aí entra a área Elétrica, que deve fornecer a infra-estrutura necessária ao perfeito funcionamento da planta industrial, assim como das acomodações.

A unidade de produção alvo deste trabalho teve todos os seus sistemas dimensionados para uma produção diária de duzentos mil barris de óleo por dia e seis milhões de metros cúbicos de gás.

Capítulo 2: Dimensionamento e Detalhamento do Sistema Elétrico

2.1. Lista de Equipamentos Elétricos

O ponto inicial para o dimensionamento e detalhamento do sistema elétrico é conhecer as cargas que devem ser alimentadas. Neste momento surge a questão da lista de equipamentos, ou lista de cargas.

Inicialmente é feita uma lista composta por todos os equipamentos da plataforma. Todas as áreas envolvidas no projeto (Processo, Segurança, Instrumentação, Ventilação e Ar Condicionado, Mecânica, Estrutura e Arquitetura) desenvolvem uma lista de equipamentos específica, que então é encaminhada à Elétrica para que a infra-estrutura possa ser oferecida. Obviamente, a lista de equipamentos que é recebida pela Elétrica compreende somente os equipamentos que necessitam de alimentação elétrica.

Relacionada com a Lista de Equipamentos está a Análise de Cargas, ou balanço elétrico. A Lista de Equipamentos fornece as informações referentes à potência mecânica requerida, ciclo de trabalho e fator de intermitência, ou diversidade. Estes fatores serão melhor explicados nos próximos itens.

2.2. Análise de Cargas

A análise de cargas é o estudo que tem por finalidade principal dimensionar a geração de energia da plataforma, assim como os principais equipamentos tais como painéis e transformadores e confirmar a demanda de carga estimada para o dimensionamento prévio dos geradores.

Inicialmente, as cargas são classificadas de acordo com suas funções como:

- Cargas normais
- Cargas essenciais
- Cargas essenciais críticas

As cargas normais são as cargas alimentadas pela geração principal e que devem permanecer desenergizadas caso a geração principal esteja desligada. As

cargas essenciais são normalmente alimentadas pela geração principal, mas passam a ser alimentadas pelo sistema de emergência em caso de falha da geração principal. Já as cargas essenciais críticas permanecem alimentadas por baterias após falha sucessiva dos sistemas de geração principal e de emergência.

Em seguida separam-se as cargas quanto ao nível de tensão de operação, em função da potência de cada carga. Neste projeto, a tabela 2.2.1 foi adotada como padrão. Este procedimento é usado para determinar as características dos painéis elétricos que alimentam tais cargas.

Tabela 2.2.1: padrão para determinar a tensão de operação das cargas

Tensão de operação (Volts)	Tensão recomendada para motores e cargas (Volts)	Potência da carga (kW)
13.800	13.200	$P \geq 1200$
4.160	4.000	$150 < P < 1200$
480	440	$P \leq 150$

É conveniente ressaltar que essa divisão de nível de tensão pela potência nominal é uma referência e não uma regra e devem ser analisadas as condições de operação e a utilidade em se empregar uma carga em um nível de tensão diferente do indicado na tabela 2.2.1. Por exemplo, uma bomba de incêndio ou de lastro, mesmo com potência nominal superior a 150kW deve ser conectada ao barramento de cargas essenciais, alimentado pelo gerador em 480V. Outro fator que pode impedir o uso da tabela é a impossibilidade do fabricante fornecer o equipamento com determinada tensão nominal, como acontece, por exemplo, com os guindastes, com potência nominal de 200kW, que deveriam operar em 4400V mas operam em 440V.

Após separar as cargas quanto ao nível de tensão, pôde-se alocá-las nos devidos painéis, conforme suas funções e características. A tabela 2.2.2 abaixo apresenta a distribuição das cargas nos principais painéis da plataforma:

Tabela 2.2.2: Distribuição das cargas

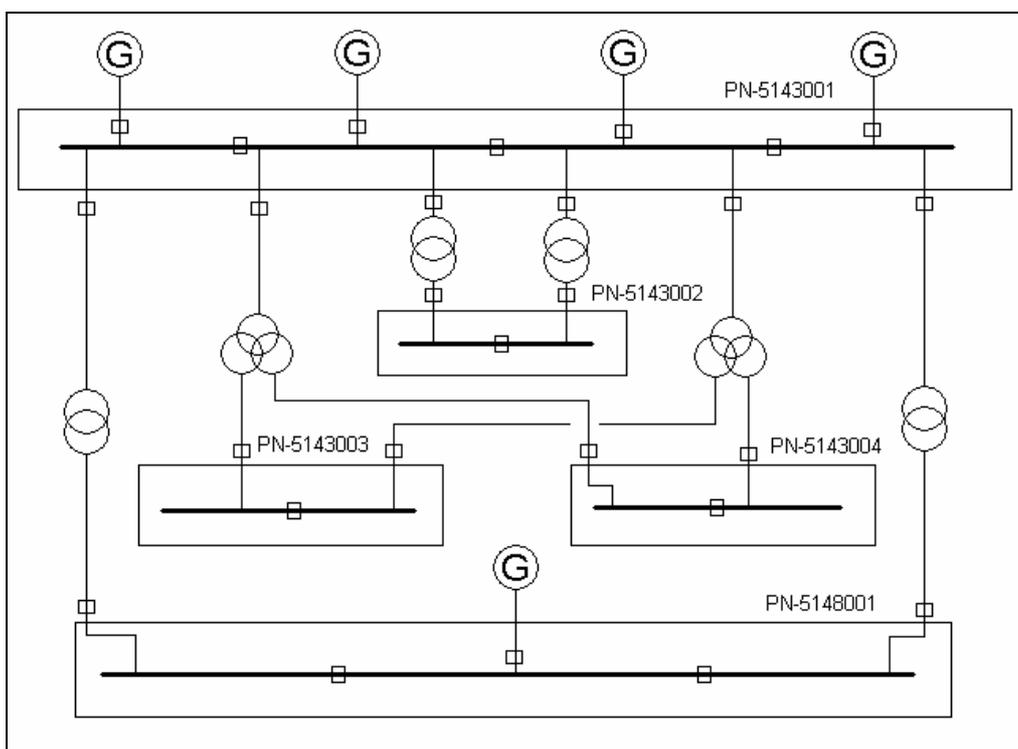
PN-5143001 – CDC principal – 13,8kV		
CARGA	POTÊNCIA NOMINAL	DESCRIÇÃO
TF-5143001A/B	12,5 MVA	Transformador alimentador PN-5143002
TF-5143002A/B	4 MVA	Transformador alimentador PN-5143003/4
TF-5148001A/B	1,85 MVA	Transformador alimentador PN-5148001
M-C-UC-1231001A/C	16000 kW	Compressor de gás
M-B-1212002A /F	1485 kW	Bomba de óleo de transferência
M-B-1251002A/C	5000 kW	Bomba de injeção de água
M-C-UC-1225001	1230 kW	Amplificador do compressor (<i>booster</i>)
PN-5143002 – CCM de produção – 4,16kV		
CARGA	POTÊNCIA NOMINAL	DESCRIÇÃO
M-B-5124001A/D	530 kW	Bomba de circulação de água
M-B-5124002A/C	185 kW	Bomba de circulação de água (<i>booster</i>)
M-B-5111001A/D	1000 kW	Bomba de captação de água do mar
M-B-5111003A/B	900 kW	Bomba de injeção de água do mar
TF-CF-UC-1231001A/B	500 kW	VSD para acionamento do compressor
M-B-1235002A/B	260kW	Bomba impulsora
M-B-UT-Z-1251001A/F	670 kW	Bomba de remoção de sulfato
M-B-Z-1251001-01A/B	260kW	Bomba de limpeza química
PN-5143003 – CDC de produção – 480V		
CARGA	POTÊNCIA NOMINAL	DESCRIÇÃO
PN-5143005	155 kW *	CCM de produção – 480V
PN-5143006	150 kW *	CCM de produção – 480V
M-B-1212001A/F	130 kW	Bomba impulsora de óleo cru
M-B-1251001A/C	110 kW	Bomba impulsora de injeção
AQ-Z-1251001A/B	252kW	Aquecedor do sistema de limpeza
PN-5143004 – CDC de utilidades – 480V		
CARGA	POTÊNCIA NOMINAL	DESCRIÇÃO
PN-5143007	120 kW *	CCM de utilidades – 480V
PN-5143008	31 kW *	CCM de utilidades – 480V
AQ-V-5115002A/B	70 kW *	Resistor de aquecimento
PN-UR-5252001A/C	250 kW	Unidade de resfriamento de água
UPS-5265002	138 kW *	UPS para cargas normais – 220V
M-C-UC-5143001A	185 kW	Compressor de ar para serviço
PN-UE-1251001	237 kW *	Painel da unidade eletrolítica
GD-5266001A/B	400 kW	Guindaste
GN-5268001	420 kW	Guincho
GN-5268002A/D	60 kW	Guincho
PN-5148001 – CDC de cargas essenciais – 480V		
CARGA	POTÊNCIA NOMINAL	DESCRIÇÃO
PN-5148002	135 kW*	CCM de cargas essenciais – 480V

PN-5148003	207 kW*	CCM de cargas essenciais – 480V
PN-5148004	38 kW*	CCM de cargas essenciais – 480V
PN-5148005	37 kW*	CCM de cargas essenciais – 480V
PN-5143024A	133 kW*	CDC para serviços de lastro da plataforma
PN-5143024B	100 kW*	CDC para serviços de lastro da plataforma
PN-TF-5149001	68 kW*	Transformador para iluminação de emergência
PN-TF-5149002	68 kW*	Transformador para iluminação de emergência
PN-TF-5149003A/B	48 kW*	Transformador para iluminação de emergência
PN-TF-5264001A/B	68 kW*	Transformador para serviços de Telecomunicações
UPS-5265001A	222 kW*	UPS para cargas essenciais
CB-5263001A/B	118 kW*	Carregador de Bateria para iluminação
PN-EL-5266001A/D	7 kW	Elevador
M-B-5111002A/B	90 kW	Bomba de captação de água do mar

* a potência utilizada é estimada e não a nominal, pois se trata de carga não-motriz, como por exemplo, painéis elétricos. Estes valores foram estimados para poder realizar os estudos de maneira mais realista possível, levando em consideração os valores práticos usados em projetos.

A figura 2.1 mostra de forma simplificada a disposição dos painéis, assim como as respectivas ligações.

Figura 2.1: esquema de ligação dos painéis.



A análise de cargas do sistema elétrico leva em consideração os seguintes fatores:

- Fator de Carga (FC): este fator é definido como a razão da demanda média pela demanda máxima ocorrida no mesmo intervalo de tempo especificado.
- Fator de intermitência (FI): é o fator que expressa as características do ciclo de trabalho de uma carga. Uma carga com fator de intermitência igual à unidade, por exemplo, fica funcionando todo o tempo. Caso o fator seja igual a meio, a carga funciona metade do tempo medido.

Os cálculos realizados são baseados nas informações de potência requerida, passadas através da lista de equipamentos. As cargas elétricas se distribuem entre cargas motrizes e não-motrizes.

Ao analisar cargas motrizes, deve-se ter em mãos a potência mecânica (requerida no eixo) que deve ser fornecida pelo equipamento, o chamado bkW . A partir do bkW é feita uma conversão para obtenção de potência nominal da carga, obedecendo à norma API-RP-610, que estabelece:

$$\text{Se } bkW < 16,5 \rightarrow kW = 1,25 \times bkW$$

$$\text{Se } 16,5 \leq bkW < 50,5 \rightarrow kW = 1,15 \times bkW$$

$$\text{Se } bkW \geq 50,5 \rightarrow kW = 1,10 \times bkW$$

A partir do valor obtido pela conversão (kW) deve-se escolher uma carga com potência nominal próxima à calculada. Para as cargas não-motrizes este procedimento não se aplica, considerando-se somente a potência nominal do equipamento. Desta forma, os valores apresentados pela tabela 2.2.2 são os valores nominais mais próximos, após ser aplicada a norma acima. Na planilha de cálculo de análise de cargas, cujos resultados são apresentados na tabela 2.2.3 abaixo, pode ser encontrado o valor de BkW para todas as cargas motrizes.

Na planilha de cálculo devem ser inseridas ainda as informações de fator de potência (fp) e rendimento (n). Os cálculos realizados, tanto para demanda normal quanto essencial, são os que seguem:

- Para potência ativa demandada

$$Pd = \frac{bkW \times FC \times FI}{n} \text{ (Equação 1)}$$

- Para potência reativa demandada

$$Qd = Pd \times \tan(a \cos(fp)) \text{ (Equação 2)}$$

PN-5143003 - 480V - CDC de produção - Barra A											
TAG do equipamento	N/E	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal		Demanda Essencial	
								Pd (kW)	Qd (kVAr)	Pd (kW)	Qd (kVAr)
PN-5143005	N							154,69	102,28		
M-B-1212001A	N	110,00	121,00	0,87	0,90	1,00	1,00	121,68	69,61		
M-B-1212001C	N	110,00	121,00	0,87	0,90	1,00	1,00	121,68	69,61		
M-B-1212001E											
M-B-1251001A	N	89,70	98,67	0,87	0,90	1,00	1,00	99,67	57,81		
M-B-1251001C	N	89,70	98,67	0,87	0,90	1,00	1,00	99,67	57,81		
AQ-Z-1251001A	N	227,30	250,03	0,88	0,92	1,00	1,00	247,07	136,03		
Total								844,45	493,16	0,00	0,00

PN-5143003 - 480V - CDC de produção - Barra B											
TAG do equipamento	N/E	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal		Demanda Essencial	
								Pd (kW)	Qd (kVAr)	Pd (kW)	Qd (kVAr)
PN-5143006	N							149,47	95,69		
M-B-1212001B	N	110,00	121,00	0,87	0,90	1,00	1,00	121,68	69,61		
M-B-1212001D	N	110,00	121,00	0,87	0,90	1,00	1,00	121,68	69,61		
M-B-1212001F											
M-B-1251001B	N	89,70	98,67	0,87	0,90	1,00	1,00	99,67	57,81		
AQ-Z-1251001B											
Total								492,50	292,73	0,00	0,00

PN-5143004 - 480V - CDC de utilidades - Barra A											
TAG do equipamento	N/E	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal		Demanda Essencial	
								Pd (kW)	Qd (kVAr)	Pd (kW)	Qd (kVAr)
PN-5143007	N							120,86	78,41		
AQ-V-5115002A	N	63,70	70,07	1,00	0,92	1,00	1,00	69,24	0,00		
PN-UR-5252001A	N	230,00	253,00	0,88	0,92	1,00	1,00	250,00	137,65		
PN-UR-5252001C											
UPS-5265002	N							138,40	85,80		
GD-5266001A	N	365,00	401,50	0,87	0,93	1,00	0,20	78,49	43,85		
GN-5268001	N	382,00	420,20	0,87	0,93	1,00	0,20	82,15	45,90		
GN-5268002A	N	55,00	60,50	0,88	0,89	1,00	0,20	12,32	6,82		
GN-5268002C											
Total								751,46	398,42	0,00	0,00

PN-5143004 - 480V - CDC de utilidades - Barra B											
TAG do equipamento	N/E	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal		Demanda Essencial	
								Pd (kW)	Qd (kVAr)	Pd (kW)	Qd (kVAr)
PN-5143008	N							31,23	21,41		
AQ-V-5115002B											
PN-UR-5252001B	N	230,00	253,00	0,88	0,92	1,00	1,00	250,00	137,65		
M-C-UC-5134001A	N	147,00	161,70	0,86	0,90	1,00	0,40	65,19	37,99		
PN-UE-1251001	N							237,15	130,34		
GD-5266001B											
GN-5268002B											
GN-5268002D											
Total								583,57	327,38	0,00	0,00

Tabela 2.2.3: Planilha de análise de cargas (continua...)

PN-5148001 - 480V - CDC para cargas essenciais - Barra A											
TAG do equipamento	N/E	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal		Demanda Essencial	
								Pd (kW)	Qd (kVAr)	Pd (kW)	Qd (kVAr)
PN-5148002	E									135,43	83,55
PN-5148004	E									38,30	28,90
PN-5143024A	E									133,06	76,53
M-B-5111002A	E	71,00	78,10	0,86	0,90	1,00	0,30			23,67	13,92
PN-TF-5149001	E									68,00	51,00
PN-TF-5149003A	E									48,00	36,00
PN-TF-5264001A	E									68,00	51,00
UPS-5265001A	E									221,50	137,30
CB-5263001A											
PN-EL-5266001A	E	64,00	70,40	0,88	0,89	1,00	0,10			7,17	3,97
PN-EL-5266001C											
Total								0,00	0,00	743,12	482,16

PN-5148001 - 480V - CDC para cargas essenciais - Barra B											
TAG do equipamento	N/E	BkW	kW nominal	fp	n	FC	FI	Demanda Normal		Demanda Essencial	
								Pd (kW)	Qd (kVAr)	Pd (kW)	Qd (kVAr)
PN-5148003	E									206,68	127,87
PN-5148005	E									37,08	25,42
PN-5143024B	E									99,73	57,89
PN-TF-5149002	E									68,00	51,00
PN-TF-5149003B											
PN-TF-5264001B											
CB-5263001A	E									117,60	72,88
PN-EL-5266001B	E	64,00	70,40	0,88	0,89	1,00	0,10			7,17	3,97
PN-EL-5266001D											
M-B-5111002B	E	71,00	78,10	0,86	0,90	1,00	0,30			23,67	13,92
Total								0,00	0,00	559,92	352,94

Abaixo seguem os principais resultados obtidos do estudo de análise de cargas. Observando as quatro últimas colunas da Tabela 2.2.4 vê-se a distinção entre demanda normal e essencial. Isto se deve à divisão entre cargas normais (N) e essenciais (E), conforme descrito no início deste item. Na planilha de análise de cargas (Tabela 2.2.3), segunda coluna, existe a descrição “N/E”, que indica o tipo de carga. Logo, pode-se determinar se a carga é normal ou essencial por simples análise da tabela acima.

Tabela 2.2.4: Resumo da energia demandada pelos painéis.

TAG	Demanda Normal				Demanda Essencial			
	kW	kVAr	KVA	fp	kW	kVAr	KVA	fp
PN-5143001	56620,28	30515,10	64319,73	0,880	1303,05	835,11	1547,69	0,842
PN-5143002A	5442,37	3257,80	6342,92	0,858				
PN-5143002B	4354,23	2650,26	5097,37	0,854				
PN-5143003A	844,45	493,16	977,91	0,864				
PN-5143003B	492,50	292,73	572,93	0,860				
PN-5143004A	751,46	398,42	850,55	0,884				
PN-5143004B	583,57	327,38	669,13	0,872				
PN-5148001A					743,12	482,16	885,84	0,839
PN-5148001B					559,92	352,94	661,88	0,846

A Tabela 2.2.4 apresenta o resumo da energia demandada por todos os painéis, incluindo a demanda de cada barramento exceto do painel principal, que mesmo tendo o seu barramento dividido em quatro apresenta a potência demandada como um único barramento. Na tabela, os dados de potência ativa e reativa foram obtidos diretamente da planilha de análise de cargas (Tabela 2.2.3). Os dados de potência aparente e fator de potência foram obtidos das equações básicas de circuitos trifásicos [1]:

$$kVA = \sqrt{(kW)^2 + (kVAr)^2} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$fp = \frac{kW}{kVA} \quad \text{(Equação 4)}$$

A tabela anterior mostra a demanda dos painéis ligados ao painel principal, como pode ser constatado também pela análise da tabela 2.2.4. Para tanto, faz-se necessário o dimensionamento dos transformadores que alimentarão estes painéis.

2.3. Dimensionamento dos transformadores

A Tabela 2.3.1 abaixo mostra o dimensionamento dos transformadores que interligam o painel principal aos demais painéis.

Tabela 2.3.1: demanda total dos painéis usada no dimensionamento dos transformadores.

	kW	kVAr	KVA	fp	TRAFO	
PN-5143002	9796,60	5908,06	11440,22	0,856	12500 kVA	TF-5143001A/B
PN-5143003	1336,95	785,89	1550,83	0,862		
PN-5143004	1335,03	725,80	1519,57	0,879		
PN-5143003/4	2671,98	1511,69	3069,97	0,870	4000 kVA	TF-5143002A/B
PN-5148001	1303,05	835,11	1547,69	0,842	1850 kVA	TF-5148001A/B

Do lado esquerdo da Tabela 2.3.1 está o painel em questão e as quatro primeiras colunas mostram o total de energia demandada, obtida através da soma da demanda das barras A e B do respectivo painel, assim como o fator de

potência. A quinta coluna mostra a potência nominal mínima do transformador que será necessária para atender a demanda do respectivo equipamento, considerando a demanda dos painéis conectados.

Cabe ressaltar que os transformadores TF-5143002A e TF-5143002B, de 4MVA, alimentam os painéis PN-5143003 e PN-5143004 simultaneamente, sendo, portanto transformadores de três enrolamentos, com capacidade para suprir a demanda dos dois painéis. Logo, a demanda dos dois painéis foi somada para dimensionar o transformador. As vantagens da adoção deste tipo de transformador está detalhada no capítulo 3, item 3.1.

Outro ponto importante a ser levado em consideração no dimensionamento dos transformadores, é que está sendo considerada a possibilidade de ventilação forçada, o que aumenta a capacidade de potência do equipamento. Para evitar que o transformador trabalhe em sobrecarga, usa-se a ventilação forçada a fim de se elevar a capacidade de potência do transformador (cerca de 30%) e prolongar sua vida útil. Na prática, é comum encomendar o transformador com toda a infraestrutura da ventilação forçada, exceto o próprio ventilador. Caso haja a necessidade de uso do transformador em sobrecarga (por aumento da planta industrial, por exemplo) pode-se adquirir o ventilador separadamente.

2.4. Dimensionamento dos geradores

2.4.1. Geradores principais

A tabela 2.4.1.1 abaixo mostra a demanda total da plataforma, explicitando a demanda normal, essencial e total, incluindo ainda uma margem para as perdas nos painéis e cabos elétricos por efeito Joule (I^2R). A perda adotada foi de 3%.

RESUMO DAS CARGAS

Carga	kW	kW+3%	kVAr	kVA	fp
Normal	56620,28	58318,89	30515,10	65819,93	0,886
Essencial	1303,05	1342,14	835,11	1580,739	0,824
Total + 3% de perdas	57923,33	59661,03	31350,20	67396,39	0,859

Tabela 2.4.1.1: Total de energia demandada.

A perda de 3% foi considerada somente sobre a energia ativa, logo o total de energia ativa sem as perdas é de 56620kW. A perda de 3% sobre este total de potência ativa vale aproximadamente 1700kW. Os valores de potência aparente e fator de potência foram obtidos da mesma forma que anteriormente, pelas equações 1 e 2.

A tabela 2.4.1.2 apresenta o balanço entre energia gerada e demandada, considerando a geração formada por três geradores sendo considerada ainda uma folga de aproximadamente 35%.

Balanço da Geração	
31250	Cada gerador - kVA
3	quantidade de geradores ligados
93750	kVA total gerado
67396	Demanda da plataforma - kVA
26354	folga - kVA

Tabela 2.4.1.2: Balanço da geração.

Assim sendo, foi adotada a opção por quatro turbogeradores (acionamento por turbina a gás), com potência nominal de 31250kVA, tensão nominal de 13800V, fator de potência 0,8. Desta forma, pode-se concluir que a geração é suficiente para atender a demanda da plataforma, existindo ainda uma folga de geração para qualquer tipo de operação não prevista ou futuras ampliações da planta industrial.

2.4.2. Gerador de emergência

A demanda de energia essencial, ou seja, o total de energia consumida pelas cargas essenciais e essenciais críticas, é de aproximadamente 1580kVA, como pode-se constatar na Tabela 2.4.1.1. Para tanto, foi adotado um gerador com potência nominal de 2000kVA, tensão nominal de 480V, fator de potência 0,8, acionado por motor diesel. Este acionamento foi escolhido porque caso ocorra algum problema (o que caracteriza a entrada do gerador de emergência), o fornecimento de gás pode vir a ser prejudicado. Se fosse escolhida uma turbina a

gás, o gerador de emergência não funcionaria neste caso. Já o acionamento com motor a diesel pode ser garantido por estoque deste combustível.

Da mesma forma que para a geração principal, a geração de emergência apresenta uma folga, de aproximadamente 26% (face à demanda de 1580kVA e a potência nominal do gerador de 2000kVA) para atender a futuras ampliações ou condições não previstas.

2.5. Características principais do sistema

De posse dos resultados obtidos anteriormente, já se pode detalhar o sistema, descrevendo suas principais características. O diagrama unifilar (Anexo I) representa de forma clara a disposição dos principais equipamentos deste sistema elétrico, e dá a base para uma melhor compreensão dos assuntos abordados daqui para a frente.

2.5.1. Geração principal:

A partir do item 2.4.1, foi adotada a opção por quatro geradores de 31250kVA, gerando em 13,8kV, fator de potência 0,8, 60Hz, sendo que três ficam operando e um fica sempre como reserva.

2.5.2. Geração de emergência:

A partir do item 2.4.2, o gerador adotado para suprir a demanda de energia essencial tem a potência nominal de 2000kVA, em 480V, fator de potência 0,8, 60Hz.

2.5.3. Características dos painéis:

Todos os painéis são dotados de disjuntores de barra, conhecidos como *tie circuit breakers*, ou simplesmente, disjuntores *tie*. Em cada painel, a entrada de energia fica em uma barra, separada da adjacente pelo disjuntor *tie*, formando assim as barras A, B, C, etc. Essa configuração é útil para manobra, pois não é necessário tirar todo o painel de operação para realizar manutenção, além de reduzir o nível de curto do painel.

O painel principal, PN-5143001, é um Centro de Distribuição de Cargas (CDC), conectado aos quatro geradores principais em 13,8kV.

Este painel alimenta os demais painéis da plataforma, além de cargas motrizes de elevada potência (com destaque para os três compressores de gás, sendo dois operando e um reserva, com potência nominal de 16MW).

Alimentado pelo PN-5143001, tem-se o PN-5143002, que é um Centro de Controle de Motores (CCM) operando em 4,16kV. O painel é alimentado através dos transformadores TF-5143001A e TF-5143001B, cada um com potência nominal de 12,5MVA. O barramento do painel é dividido em duas seções, sendo que o disjuntor *tie* do barramento fica aberto (N.A) em condições normais de operação e cada seção do barramento é alimentada separadamente por cada transformador. Este painel alimenta grandes motores e VSD's (*Variable Speed Drives*) utilizados para a partida dos compressores de gás.

A alimentação dos painéis PN-5143003 e PN-5143004 também parte do PN-5143001, sendo o primeiro um CDC alimentador das cargas de produção e o outro um CDC que alimenta as cargas de utilidades da embarcação. Ambos os painéis operam em 480V e são alimentados por dois transformadores de três enrolamentos – TF-5143002A e TF-5143002B – com potência nominal de 4MVA. Semelhantemente ao PN-5143002, cada painel tem seu barramento dividido em dois pelo disjuntor *tie*, formando as barras A e B. O secundário e o terciário do TF-5143002A alimentam as barras A dos painéis PN-5143003 e PN-5143004, assim como o secundário e o terciário do TF-5143002B alimentam a barra B de cada painel. Esta configuração dá maior flexibilidade de manutenção e operação, além de economizar material e espaço, pois utiliza dois transformadores ao invés de quatro, e duas gavetas no painel principal, ao invés de quatro.

O painel PN-5148001 é o painel de cargas essenciais, comumente chamado de painel de emergência, por ser dotado de geração de emergência, e também é alimentado pelo painel PN-5143001 através dos transformadores TF-5148001A e TF-5148001B, de 2MVA, com tensão nominal de 480V. O painel apresenta o barramento dividido em três seções, uma para cada entrada de energia proveniente dos transformadores e do gerador. O gerador de emergência deve entrar em operação somente em caso de ausência da geração principal,

alimentando as cargas críticas do sistema, tais como: painéis de iluminação, UPS do sistema de controle, bombas de lastro e carregadores de bateria.

Os painéis descritos acima são os principais da plataforma e ditam o comportamento e as características do sistema elétrico. O diagrama unifilar do sistema elétrico (Anexo I), assim como a figura 2.1 ilustram de forma clara as informações apresentadas acima.

2.5.4. Aterramento: O sistema deve ser aterrado na fonte de energia [1]. Neste projeto, todas as fontes de energia são aterradas através de impedâncias, especificamente através de resistores, e as cargas são isoladas. É conveniente denominar como fonte de energia os equipamentos que produzem energia (geradores) e os transformadores (que são ligados em delta-estrela aterrado).

Dependendo do tipo de ligação e do aterramento dos transformadores, criam-se sistemas de aterramento, como mostrados na figura 2.5.4.1

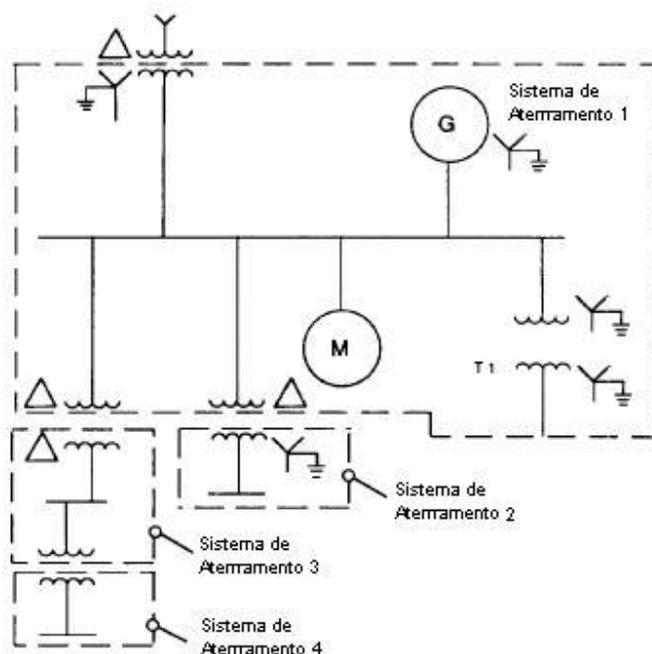


Figura 2.5.4.1: Aterramento de Sistemas

Pela figura 2.5.4.1 vemos que o tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores e o aterramento determinam os limites dos sistemas de aterramento. Os diferentes tipos de ligação determinam os diagramas de seqüência zero. Somente a ligação estrela-estrela com aterramento em ambos os lados (sistema 1 da figura, transformador T1) fornece continuidade para componentes de seqüência zero. Para as outras ligações, não há fluxo de componentes de seqüência zero entre os enrolamentos dos transformadores, pois as mesmas circulam no delta (ligações delta-delta, delta-estrela, delta-estrela aterrado) ou simplesmente não circulam (ligação estrela-estrela, estrela-estrela com um neutro aterrado).

2.5.4.1. Aterramento das cargas: Neste projeto, todas as cargas estão isoladas e, portanto, não há circulação de corrente entre o ponto de neutro da carga e o ponto de aterramento do gerador/transformador. Na realidade, existe o acoplamento à terra através das capacitâncias do sistema, sendo a corrente de retorno pelo neutro do transformador/gerador muito pequena, podendo ser desprezada.

Os sistemas isolados apresentam duas vantagens principais:

- Em caso de falta para a terra a corrente será pequena e há continuidade do serviço sem a necessidade da parada imediata do equipamento.
- Menor custo, pois não há gastos adicionais com aterramento dos equipamentos.

2.5.4.2. Aterramento dos geradores: Os geradores da plataforma são aterrados através de alta resistência. A função do resistor é de limitar o valor da corrente de falta para a terra a limites seguros, além de fazer com que a tensão fase-terra durante uma falta seja equivalente à tensão fase-terra de um sistema isolado [2]. O aterramento através de alta impedância não deve ser monitorado por dispositivos de proteção com atuação automática sobre o gerador e sim por dispositivos com atuação retardada, que alertem ao

operador sobre condições anormais de operação antes de atuarem sobre o sistema [3].

Para se determinar o valor do resistor de aterramento, basta aplicar as equações básicas de circuitos trifásicos com representação monofásica, onde se conhece a tensão do gerador (fase-neutro - V_{fn}) e a corrente a ser fixada (I_f). Para os geradores principais tem-se:

$$V_{fn} = \frac{13800}{\sqrt{3}}; I_f = 12A \text{ (Equação 5)}$$

Logo, o valor do resistor deve ser:

$$R = \frac{V_{fn}}{I_f} = \frac{13800}{\sqrt{3} \times 12} = 664\Omega. \text{ (Equação 6)}$$

Deste modo assegura-se que o valor máximo da corrente de falta que passará pelo neutro do gerador será de 12A e a tensão fase-neutro permanecerá equivalente à tensão fase-neutro de um sistema isolado.

De forma análoga, o mesmo procedimento é aplicado para determinar o valor do resistor de aterramento do gerador de emergência, onde

$$V_{fn} = \frac{480}{\sqrt{3}}; I_f = 2A, \text{ (Equação 7)}$$

que leva a:

$$R = \frac{V_{fn}}{I_f} = \frac{480}{\sqrt{3} \times 2} = 138,5\Omega. \text{ (Equação 8)}$$

2.5.4.3. Aterramento dos transformadores: Da mesma forma que os geradores, os transformadores também são aterrados por meio de alta resistência nos enrolamentos secundários e terciários. O valor para o resistor de aterramento de cada transformador pode ser encontrado da mesma maneira que para os resistores de aterramento dos geradores, ou seja, fixando-se um valor máximo para a corrente de falta e aplicando as equações básicas de circuitos. A tabela 2.5.4.3.1 apresenta os valores dos resistores de aterramentos dos transformadores que compõem o sistema elétrico.

Transformador	Tensão (V)	I(A)	Resistor (Ω)
TF-5143001A/B	13800-4160	5	480,4
TF-5143002A/B	13800-480	2	138,5
TF-5148001A/B	13800-480	2	138,5

Tabela 2.5.4.3.1: Resistores de aterramento dos transformadores

O emprego de resistores de aterramento nos geradores e transformadores fornece segurança de operação e proteção aos equipamentos, pois os resistores limitam os valores das correntes de falta a valores seguros, exceto para falta trifásica.

Capítulo 3: Filosofia de Operação da Plataforma e Condições de Operação

3.1. Filosofia de operação da plataforma

Recapitulando, a geração principal da plataforma é composta por quatro geradores de 31250kVA, gerando a uma tensão nominal de 13,8kV, fator de potência 0,8 e frequência de operação de 60Hz. O acionamento dos geradores é feito por turbinas a gás e o aterramento é feito através de resistores. Os geradores têm os seguintes nomes de identificação (ou TAG's): GE-5147001A, GE-5147001B, GE-5147001C e GE-5147001D e alimentam o Centro de Distribuição de Cargas (CDC) principal da planta industrial, o PN-5143001, que supre a demanda normal de toda a plataforma. Em operação normal três geradores ficam operando e um fica como reserva.

A geração de emergência é composta pelo GE-5148001, de 2MVA, em 480V, fator de potência 0,8 e frequência de operação de 60Hz, aterrado através de resistor. O gerador é ligado ao painel de cargas essenciais PN-5148001 e alimenta as cargas que não podem ficar com a alimentação de energia interrompida. Em condições normais de operação, a geração de emergência fica desligada e a energia é suprida ao painel PN-5148001 pelo PN-5143001, através dos transformadores TF-5148001A/B. Em caso de perda da geração principal, a geração de emergência deve atuar automaticamente, garantida através de intertravamentos.

Faz parte da filosofia de operação a redundância da alimentação de todos os equipamentos relevantes à produção e operação da plataforma. Desta forma, todos os painéis apresentam mais de uma fonte de energia. Por exemplo: o PN-5143002, alimentado pelo PN-5143001, recebe energia através de dois transformadores abaixadores de 13,8kV para 4,16kV. Neste, e em todos os painéis, cada entrada de energia fica em uma seção do barramento, formada a partir da divisão do barramento principal por disjuntores *tie*. Neste caso, como dois transformadores entregam energia ao painel, o barramento é dividido em duas

seções separadas por um disjuntor *tie*. Exceto para o painel principal (PN-5143001), os disjuntores *tie*, ficam normalmente abertos e cada seção é alimentada por uma fonte de energia.

No PN-5143002 cada transformador alimenta uma seção do painel – barras A e B. Para o caso de falha em algum transformador, o outro deve ser dimensionado de forma que seja possível o suprimento de energia de todo o painel através de um transformador, como visto no dimensionamento dos transformadores, item 2.3.

Este tipo de ligação recebe o nome de “L aberto” e é conveniente por facilitar a manutenção e por reduzir o nível de curto do painel. A figura 3.1.1 ilustra este tipo de ligação e os modos de operação. Na figura 3.1.1.a os dois transformadores alimentam cada seção do barramento do painel, caracterizando a operação normal. Na figura 3.1.1.b o disjuntor *tie* é fechado e o disjuntor alimentador da barra A é aberto, de modo que todo o painel é suprido pelo transformador TF-5143001B, caracterizando uma operação de transferência de cargas (de um transformador a outro). O mesmo é válido para o caso em que o disjuntor alimentador da barra B é aberto e o da barra A é fechado.

Um intertravamento deve ser provido a fim de evitar que o *tie* e os disjuntores alimentadores do painel estejam fechados ao mesmo tempo, exceto quando o paralelismo for momentâneo (transferência de cargas) e estiver assegurado pela proteção (relé de sincronismo, número 25 pelo IEEE Std C37.2-1996) quanto ao sincronismo entre as fases dos transformadores.

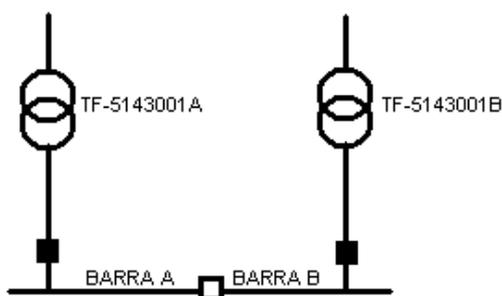


Figura 3.1.1.a

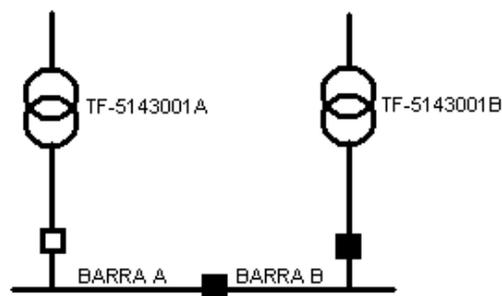


Figura 3.1.1.b

Os CDC's de produção e utilidades, respectivamente PN-5143003 e PN-5143004, operam em 480V e são alimentados por transformadores de três enrolamentos, TF-5143002A e TF-5143002B. Neste caso o TF-5143002A alimenta a barra "A" destes painéis e o outro transformador alimenta a barra "B" dos mesmos painéis. A adoção de transformadores de três enrolamentos propicia economia de material (são usados dois transformadores, disjuntores e alimentadores ao invés de quatro) e de espaço no painel principal (são utilizadas apenas duas gavetas ao invés de quatro). Cada transformador tem que suprir sem problemas a demanda dos dois painéis em caso de falha do outro transformador. A figura 3.1.2 representa esta ligação.

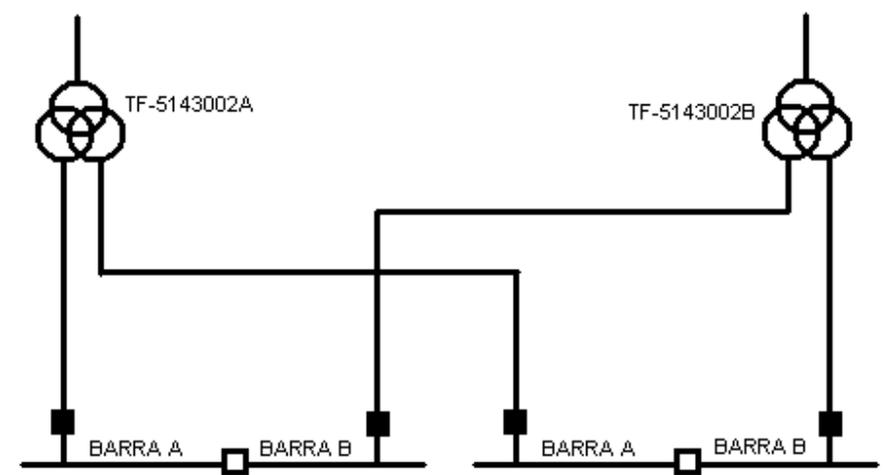


Figura 3.1.2: esquema de ligação utilizando transformadores de três enrolamentos

O painel de emergência apresenta uma filosofia de operação um pouco diferente dos outros painéis. O gerador GE-5148001 alimenta a barra C do painel PN-5148001 e nas barras A e B entra a alimentação proveniente do PN-5143001 através dos transformadores TF-5148001A e TF-5148001B, respectivamente. Como há três entradas de energia, há três seções de barramento, sendo que os disjuntores *tie* que ligam as barras A e B à barra C ficam normalmente abertos (uma vez que à barra C somente está conectado o gerador) e os transformadores alimentam as barras A e B do painel. No caso da entrada da geração de emergência, os disjuntores *tie* se fecham e os disjuntores dos transformadores se

abrem, cortando a ligação entre o painel principal e o de emergência. As figuras 3.1.3 e 3.1.4 abaixo representam os esquemas de operação.

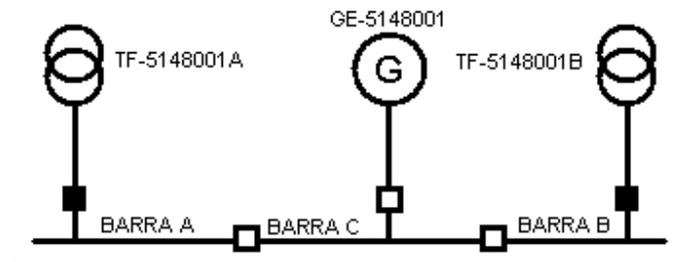


Figura 3.1.3: Operação normal

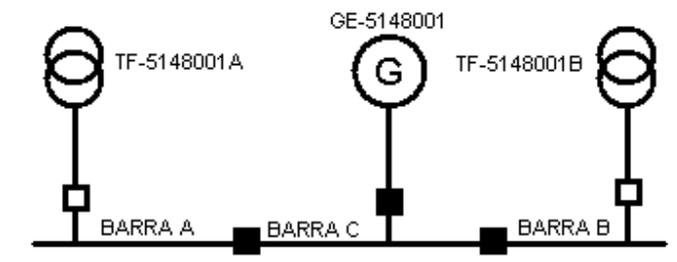


Figura 3.1.4: operação de emergência

3.2. Condições de operação

A plataforma pode apresentar diferentes condições de operação, definidas pela quantidade de geradores alimentando a planta:

- **Condição 1:** Caracterizada pelos quatro geradores conectados ao painel principal. Por um período momentâneo a planta é alimentada pelos quatro geradores principais, para transferência de carga entre os geradores, uma vez que em condições normais de operação três geradores ficam conectados enquanto um fica como reserva.
- **Condição 2:** representa a operação normal da plataforma com três geradores alimentando a planta e um como reserva. Normalmente, o

gerador que não está conectado ao sistema (em *standby* ou em manutenção) passa por uma série de procedimentos para assegurar o seu correto funcionamento.

- **Condição 3:** Condição de emergência. Caso a geração principal seja desligada, o gerador de emergência deve suprir energia às cargas essenciais do sistema.

Em resumo:

Condição 1	Operação normal	Três geradores
Condição 2	Transferência de carga	Quatro geradores
Condição 3	Emergência	Gerador de emergência

Tabela 3.2.1: resumo das condições de operação

Capítulo 4: Estudos de Fluxo de Potência e Curto-circuito

O estudo do fluxo de potência compreende o cálculo do fluxo de energia ativa e reativa nos elementos da rede e da magnitude e defasagem das tensões nos barramentos sob condições normais de operação, para um dado nível de carregamento do sistema e uma condição de geração especificada [4].

O estudo de fluxo de potência é essencial para uma contínua avaliação do sistema elétrico nas fases de planejamento, operação e ampliação, além de ser parte integrante de outros estudos que venham a ser realizados sobre um sistema, tais como:

- Curto-circuito: calcula as tensões pré-falta das barras;
- Estabilidade: calcula as condições iniciais e a solução da rede em cada passo de integração;
- Confiabilidade: serve para simular operações do sistema em casos de falha;

4.1. Fundamentação Teórica do Estudo de Fluxo de Potência

Um sistema de distribuição pode ser representado por parâmetros de impedância ou por parâmetros de admitância [4]. Nos estudos de fluxo de potência é mais conveniente se tratar um sistema em termos de admitância, pois as equações se tornam mais simples e os cálculos muito mais rápidos.

A representação das equações nodais do circuito por meio de admitâncias é aplicada através do princípio entre equivalência de fonte de corrente e fonte de tensão. Uma fonte de tensão em série com uma impedância (admitância) é equivalente a uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância (admitância). Sabe-se que $Y=1/Z$, ou seja, que a admitância é o inverso da impedância.

As figuras a seguir representam os diagramas para um circuito simples composto por três barras, todas ligadas entre si. A figura 4.1.1 mostra o diagrama unifilar de um determinado sistema. A figura 4.1.2 mostra o mesmo sistema empregando fontes de tensão em série com as impedâncias internas,

representando as máquinas, e as impedâncias do circuito. Já na figura 4.1.3 pode-se ver o mesmo sistema expresso pelo equivalente citado acima, em que as fontes de tensão em série com impedâncias são transformadas em fontes de corrente em paralelo com admitâncias.

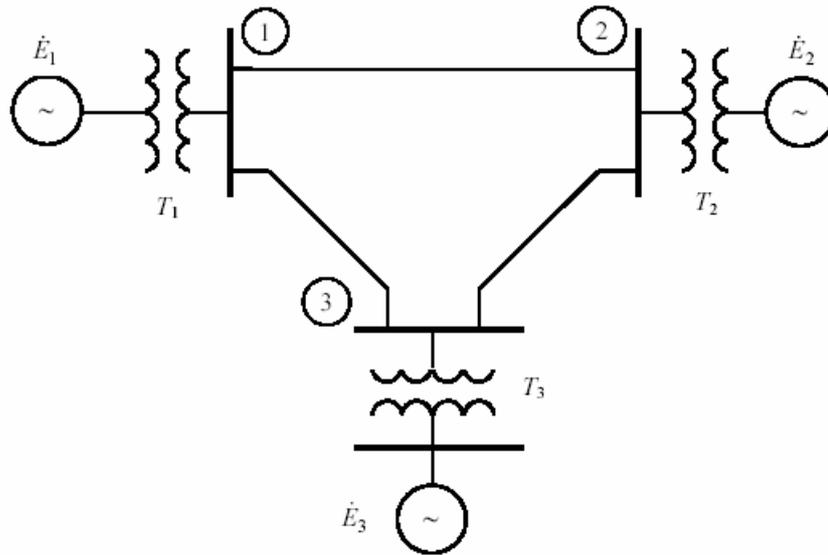


Figura 4.1.1: Diagrama unifilar de um sistema simples.

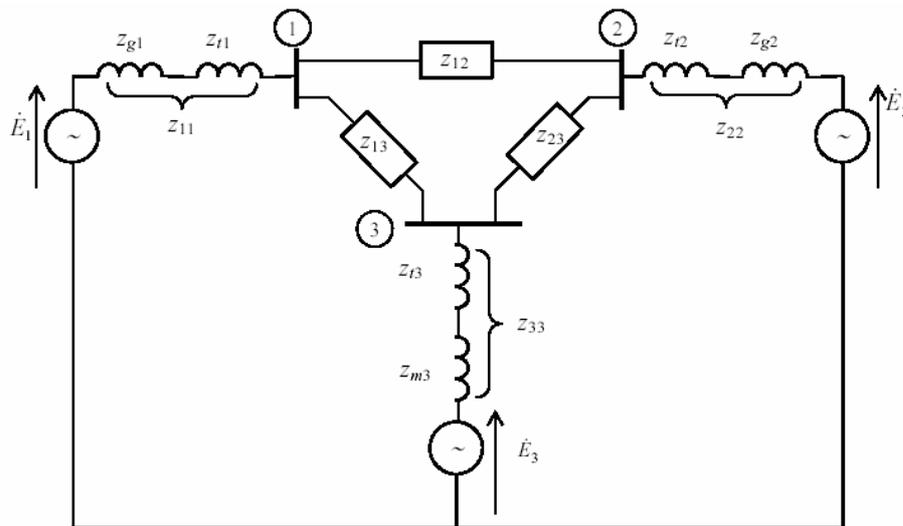


Figura 4.1.2: Diagrama em termos de fonte de tensão em série com impedâncias.

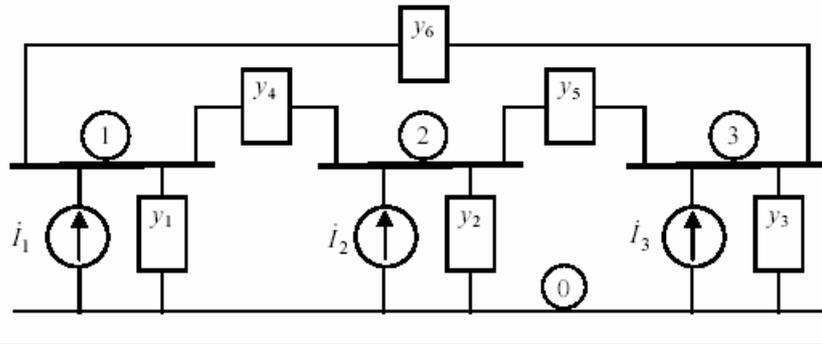


Figura 4.1.3: Diagrama em termos de fonte de corrente em paralelo com admitâncias.

Os diagramas apresentados nas figuras 4.1.2 e 4.1.3 permitem elaborar um sistema de equações matriciais. Desenvolvendo o sistema descrito pelas figuras chega-se a:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{z_{11}} = \frac{\dot{E}_1}{z_{g1} + z_{l1}}, \quad y_1 = \frac{1}{z_{11}} = \frac{1}{z_{g1} + z_{l1}}, \quad (\text{Equações 9 e 10})$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{z_{22}} = \frac{\dot{E}_2}{z_{g2} + z_{l2}}, \quad y_2 = \frac{1}{z_{22}} = \frac{1}{z_{g2} + z_{l2}}, \quad (\text{Equações 11 e 12})$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_3}{z_{33}} = \frac{\dot{E}_3}{z_{m3} + z_{l3}}, \quad y_3 = \frac{1}{z_{33}} = \frac{1}{z_{m3} + z_{l3}}, \quad (\text{Equações 13 e 14})$$

$$y_4 = \frac{1}{z_{12}}, \quad y_5 = \frac{1}{z_{23}}, \quad y_6 = \frac{1}{z_{13}}, \quad (\text{Equações 15, 16 e 17})$$

Desta forma podem-se obter as equações nodais do circuito:

$$\dot{I}_1 = y_4 \times (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) + y_6 \times (\dot{V}_1 - \dot{V}_3) + y_1 \times (\dot{V}_1 - \dot{V}_0), \quad (\text{Equação 18})$$

$$\dot{I}_2 = y_5 \times (\dot{V}_2 - \dot{V}_3) + y_4 \times (\dot{V}_2 - \dot{V}_1) + y_2 \times (\dot{V}_2 - \dot{V}_0), \quad (\text{Equação 19})$$

$$\dot{I}_3 = y_5 \times (\dot{V}_3 - \dot{V}_2) + y_6 \times (\dot{V}_3 - \dot{V}_1) + y_3 \times (\dot{V}_3 - \dot{V}_0). \quad (\text{Equação 20})$$

Adequando as equações à forma matricial, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + y_4 + y_6 & -y_4 & -y_6 \\ -y_4 & y_2 + y_4 + y_5 & -y_5 \\ -y_6 & -y_5 & y_3 + y_5 + y_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{Equação 21})$$

Este sistema matricial pode ser expresso na forma $\dot{I} = Y_{BARRA} \times \dot{V}$, sendo \dot{I} o vetor injeção de corrente na rede por fontes independentes, \dot{V} o vetor de tensão das barras em relação à barra de referência e Y_{BARRA} a matriz de admitância de barra, ou nodal.

Com relação à matriz de admitância nodal, os termos da diagonal principal representam a admitância própria de curto-circuito da barra em questão, denotada pelo índice correspondente da matriz, e os termos fora da diagonal principal a admitância de transferência de curto-circuito entre as barras expressas pelos índices. Desta forma, por exemplo, o termo Y_{11} representa a admitância própria de curto-circuito da barra 1, enquanto o termo Y_{23} representa a admitância de transferência de curto-circuito entre as barras 2 e 3.

O sistema matricial poderia também ser descrito em termos da matriz de impedâncias, porém sua construção é mais complicada e suas características são menos atraentes no tratamento do fluxo de potência. A matriz de admitância de barra é facilmente construída por inspeção do circuito e é caracteristicamente esparsa, dando agilidade aos cálculos por possuir vários elementos nulos.

Neste estudo o sistema é considerado estático, o que significa que a rede pode ser representada por um conjunto de equações e inequações algébricas. Para tal, deve-se considerar que as variações de tempo são lentas, a fim de que se possa desprezar os efeitos transitórios, definindo o sistema em regime permanente. Se

os transitórios fossem considerados, uma modelagem dinâmica, utilizando equações diferenciais e algébricas, deveria ser empregada.

Para a maioria das aplicações de fluxo de potência os efeitos causados por desequilíbrios dos sistemas são considerados de pouca importância para os resultados. Assim, considera-se que o sistema trabalha perfeitamente balanceado e uma modelagem de rede monofásica e de seqüência positiva pode ser aplicada.

4.2. Modelagem do sistema no *software*

Atualmente os computadores atingiram alto grau de processamento e diversos programas foram criados com a finalidade de executar estes estudos. Neste projeto foi utilizado o software DlgSILENT *PowerFactory* versão 13.0.

Na modelagem da rede a ser analisada, a aproximação clássica de fluxo de potência, que define as características particulares de cada barra (PQ,PV,V θ), não é empregada. No software, os controles de tensão, freqüência, balanço elétrico, etc., são realizados por elementos de controle que podem regular geradores, motores e cargas. As configurações clássicas são empregadas em outros elementos do sistema, como é o caso dos geradores, em que podem ser empregadas as seguintes condições de controle:

- Controle de fator de potência: potências ativa e reativa constantes \rightarrow PQ
- Tensão e potência ativa constantes \rightarrow PV
- Controle secundário (de freqüência) \rightarrow V θ

Pela aproximação clássica, a barra *swing* tem a função de suprir as perdas do sistema ao final das iterações, além de ser a referência de tensão para todos os elementos do sistema [1]. No entanto, o software controla a geração de potência ativa **dos geradores** tornando a aproximação mais realística, uma vez que a função de suprir as perdas do sistema é exercida pelos geradores e não pela barra de referência.

Outro tipo de controle empregado pelo software sobre os geradores e a barra de referência faz com que o princípio da barra $V\theta$ ser a barra de referência angular seja atingido. O software força os geradores a contribuírem igualmente com a potência reativa necessária para manter a tensão em 1 pu de tensão e ângulo zero de defasagem.

4.3. Fundamentação Teórica do Estudo de Curto-Circuito

Os estudos de curto-circuito são muito importantes na fase de dimensionamento do sistema elétrico. Após definidos os painéis e as cargas a serem alimentadas, deve ser feita uma análise de curto-circuito para se determinar características essenciais destes equipamentos, tais como:

- Nível de curto-circuito: é o valor de corrente suportável pelos barramentos, disjuntores, chaves, etc. em função da corrente de curto-circuito sustentada. Em outras palavras, caso ocorra o curto mais severo, os equipamentos têm que suportar durante um determinado período (neste projeto considera-se 1 segundo) uma corrente de magnitude menor ou igual à do nível de curto. Adiante, será feita uma explanação mais detalhada sobre este assunto.
- Capacidade de condução de corrente: como será visto adiante, é o maior valor da corrente de curto-circuito, em função da componente assimétrica, ou CC. Esta corrente tem valor de pico bem maior que a corrente de curto sustentada e os equipamentos devem suportar os esforços resultantes da sua ocorrência, porém em um intervalo de tempo muito menor que o referente à corrente de curto sustentada.
- Capacidade térmica em função da magnitude das correntes de curto-circuito e do tempo de atuação das mesmas.
- Seleção e ajuste dos elementos de proteção do sistema.
- Estimativa das dimensões do aterramento
- Determinação das características estruturais dos equipamentos, que devem suportar os estresses mecânicos decorrentes das faltas.

4.3.1 Fundamentação Teórica do Estudo de Curto-Circuito

Quando ocorre uma falta em um sistema elétrico, o valor da corrente de falta depende das forças eletromotrizes das máquinas que o compõem, suas impedâncias e as impedâncias entre os componentes do sistema [6]. Em sistemas de distribuição, os elementos que contribuem para o total da corrente de curto-circuito são as máquinas rotativas: as máquinas síncronas - geradores, motores e compensadores - e os motores de indução.

Os geradores são acionados por uma fonte primária de movimento, tais como turbinas (como é o acionamento dos geradores principais deste projeto) e motores diesel (caso do gerador de emergência). Quando um curto-circuito ocorre em um sistema alimentado por um gerador, ele continua a produzir tensão, pois a sua excitação de campo é mantida por meio de baterias e o acionador continua a girar o eixo do gerador com velocidade considerável, próxima da nominal. Esta tensão produz uma corrente de curto-circuito que flui do gerador em direção à falta. Esta corrente de curto é limitada apenas pela impedância do gerador e pela impedância entre os terminais do gerador e o ponto da falta.

Os motores síncronos, por terem aspectos construtivos substancialmente como os dos geradores, produzem corrente de curto em casos de falta. Em operação normal, os motores absorvem da rede tensão e corrente alternadas. Quando há a ocorrência da falta e o motor deixa de ser alimentado, a inércia do eixo do motor faz com que seja produzida tensão nos enrolamentos da armadura, assim como acontece com os geradores. Desta forma, os motores síncronos atuam como geradores, entregando corrente de curto-circuito por alguns ciclos após a falta e a magnitude desta corrente depende da potência do motor, do nível de tensão, da impedância da máquina e do sistema entre os terminais do motor e o ponto da falta.

Os motores de indução também contribuem para o total da corrente de curto-circuito. A diferença da contribuição deste tipo de máquina para as máquinas síncronas está no seu aspecto construtivo. Nos motores de indução não há excitação de campo por corrente contínua, pois o fluxo magnético do rotor é

gerado por indução, como ocorre em um transformador. Quando ocorre um curto-circuito no sistema e o motor deixa de ser alimentado, o fluxo induzido no rotor não pode desaparecer instantaneamente. Esse fluxo que permanece circulando no rotor age produzindo tensão nos enrolamentos do estator até que o eixo da máquina pare completamente, ou o fluxo decaia a zero. A corrente de curto-circuito proveniente da contribuição do motor de indução decai muito mais rapidamente que a corrente produzida pelas máquinas síncronas devido à excitação de campo das máquinas síncronas ser constante e a excitação de campo dos motores de indução desaparecer alguns ciclos após o corte de alimentação pela rede.

A reatância das máquinas rotativas não é constante como a de transformadores e cabos, mas é complexa e variável com o tempo [6]. O valor da corrente de curto-circuito logo após a ocorrência da falta (de pico) e o da corrente de curto-circuito sustentada diferem consideravelmente em função das reatâncias das máquinas síncronas e motores de indução. A corrente de falta inicia com um valor alto e decai a um valor estacionário depois de decorrido certo tempo da ocorrência da falta. Como esta variação da magnitude da corrente é rápida e a excitação de campo e a velocidade do rotor permanecem praticamente constantes, a redução do valor da corrente só pode ser explicada pela mudança da reatância aparente da máquina.

Existem três valores típicos de reatâncias das máquinas rotativas, que caracterizam cada estado da máquina de acordo com o tempo decorrido após a falta:

- Reatância subtransitória de eixo direto X_d'' , que é o valor da reatância do estator logo do início da falta. É a responsável pelo maior valor da corrente de curto.
- Reatância transitória de eixo direto X_d' , que é a reatância aparente inicial do estator e atua normalmente 0,5 segundos ou mais depois da falta.
- Reatância síncrona X_d , que determina o valor da corrente de em estado estacionário e seu valor não interessa nos cálculos de curto-circuito.

O valor da corrente de falta depende consideravelmente dos valores das reatâncias das máquinas. A equação abaixo dá o valor da corrente de curto-circuito trifásico nos terminais de um gerador:

$$I'' = \frac{Eg''}{jXd''} \text{ (Equação 22)}$$

onde

I'' : corrente de falta trifásica.

Eg'' : tensão interna do gerador no momento da falta.

Xd'' : reatância transitória de eixo direto.

A corrente de curto-circuito tem normalmente forma de onda semelhante à mostrada na figura 4.3.3.1. Esta onda apresenta uma característica assimétrica nos ciclos iniciais e decai a uma forma simétrica, daí é comum nos estudos de curto-circuito serem apresentados os valores de corrente de curto simétrica e assimétrica.

O fato da onda apresentar uma componente assimétrica está relacionado à razão entre a reatância e a resistência – X/R – do circuito e ao momento de aplicação do curto-circuito. Em sistemas industriais a resistência de um circuito é desprezível em relação à reatância e a corrente de curto-circuito fica atrasada em relação à tensão em aproximadamente 90° . Caso a falta ocorra no pico de tensão gerada, a corrente iniciará seu ciclo do zero, pois estará defasada em 90° e se manterá simétrica em relação ao eixo dos zeros (figura 4.3.3.2). Caso a falta ocorra no instante em que a tensão tem valor nulo, a corrente vai ser essencialmente assimétrica (figura 4.3.3.3), pois mesmo partindo do zero ela necessitará manter a defasagem, por isso ficará acima do eixo dos zeros. Estes dois casos mostram os extremos que podem ocorrer com a corrente de curto, dependendo principalmente do momento de ocorrência da falta.

Nos casos onde a falta ocorre nos instantes em que a onda de tensão está entre o zero e o pico, haverá um *offset* da corrente, e o total dependerá do ponto da onda de tensão onde ocorrerá a aplicação da falta.

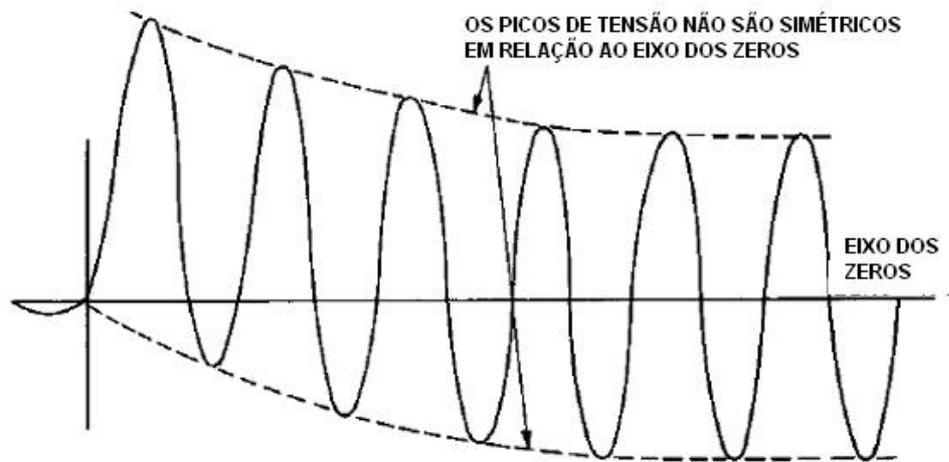


Figura 4.3.3.1: forma de onda da corrente de curto-circuito

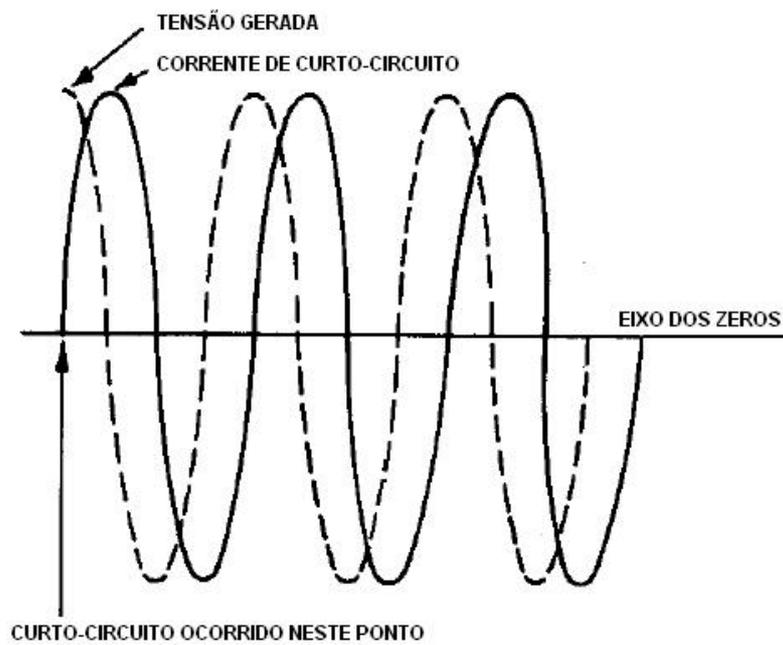


Figura 4.3.3.2: curto-circuito essencialmente simétrico

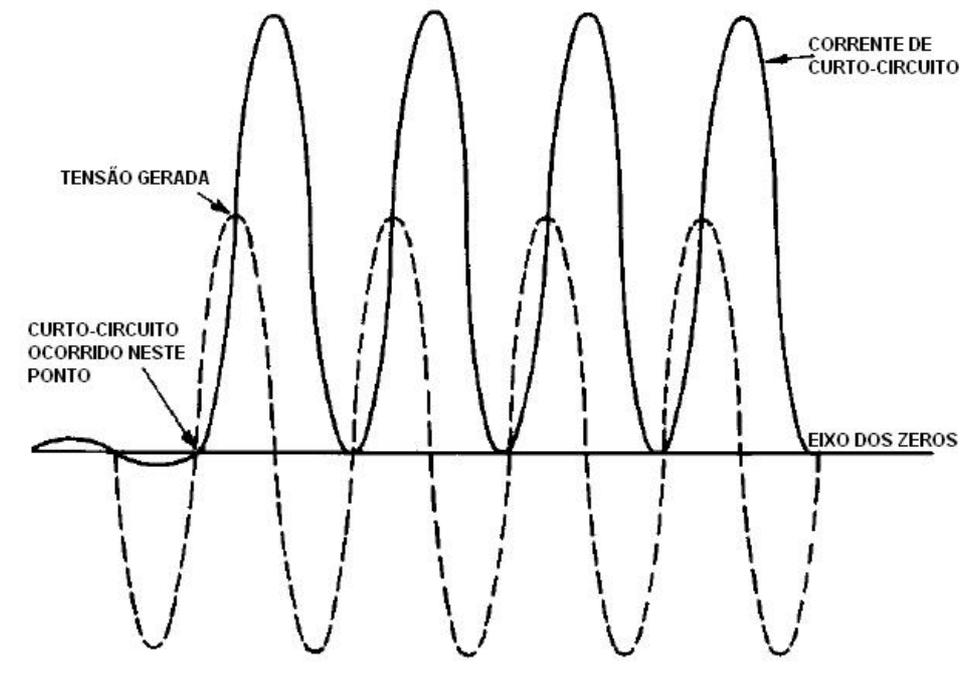


Figura 4.3.3.3: Curto-circuito essencialmente assimétrico.

A modelagem da corrente de curto-circuito é dividida em duas componentes para facilitar os cálculos: uma componente simétrica alternada (ac) e uma componente contínua (dc). A soma destas componentes dá o valor da corrente de falta em qualquer instante.

O valor da componente dc depende do momento da aplicação da falta, conforme descrito anteriormente. Quando a falta ocorre no pico de tensão, a corrente de curto-circuito tem a forma apresentada na figura 4.3.3.2. Se a falta ocorre no zero de tensão, a forma de onda é igual a da figura 4.3.3.3. Quando a falta ocorre em qualquer ponto exceto os dois citados acima, a componente dc tem o mesmo valor inicial da corrente simétrica, porém com sinal trocado, para satisfazer a condição de corrente de curto-circuito partindo do zero. A componente decai a zero, pois como não há fonte de energia dc no sistema, a mesma não se mantém e é eliminada por efeito Joule (I^2R) sobre a resistência do circuito.

A forma de onda completa da corrente de curto-circuito pode ser vista na figura 4.3.3.4, que mostra os valores relevantes da onda:

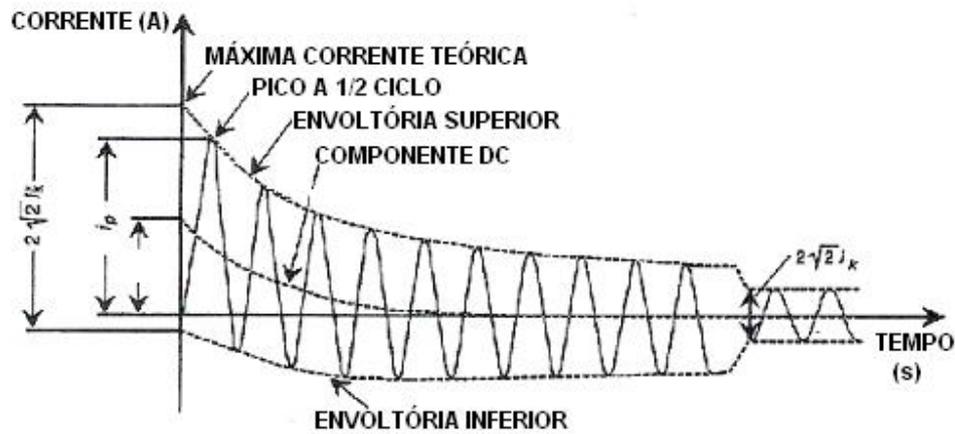


Figura 4.3.3.4: Componentes da corrente de curto-circuito.

Onde

$$i_p = I''_k \sqrt{2} + dc \text{ offset}$$

(Equação 23)

dc offset:

$$i_{dc} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi(R/X)t}$$

(Equação 24)

- I''_k Corrente inicial simétrica de falta trifásica;
- i_p Corrente de Pico assimétrica;
- i_{dc} Componente de decaimento dc da corrente de falta;
- I_k Corrente de falta em estado permanente;

A contribuição para a corrente de curto-circuito das máquinas rotativas e da concessionária (não é o caso deste projeto, em que toda a energia necessária é gerada na planta e não há ligação com qualquer fornecimento externo) é somada a fim de formar a corrente de curto-circuito total. A figura 4.3.3.5 mostra as formas de onda da corrente de curto-circuito formadas individualmente a partir de cada tipo de máquina, mantidas as mesmas escalas, que dão idéia do comportamento das mesmas comparativamente. Pode-se observar que as máquinas síncronas

são as principais responsáveis pelo valor da corrente de curto simétrica, pois a contribuição dos motores de indução decai rapidamente a zero e só contribui efetivamente para a corrente inicial assimétrica. O último gráfico mostra a corrente de curto-circuito total, que é a soma das contribuições dos três gráficos imediatamente acima.

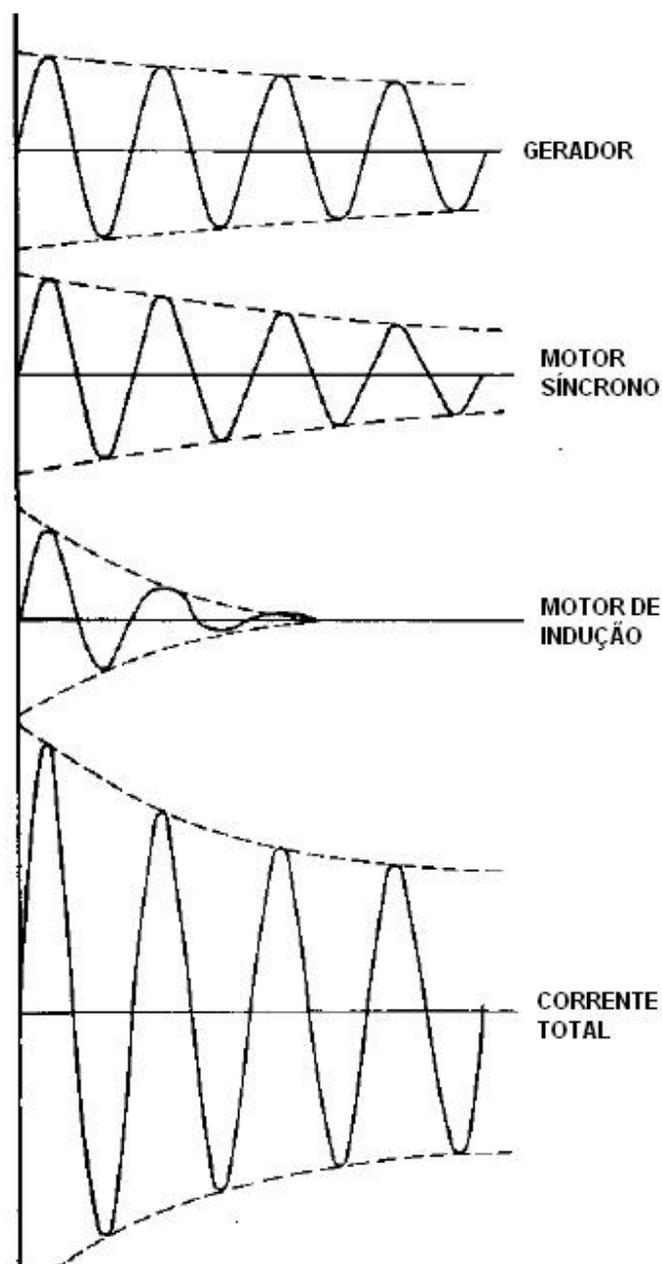


Figura 4.3.3.5: Contribuições das máquinas e corrente total.

Estes gráficos representam **somente** a componente simétrica. A figura 4.3.3.6 mostra esta corrente total com a adição da componente dc.

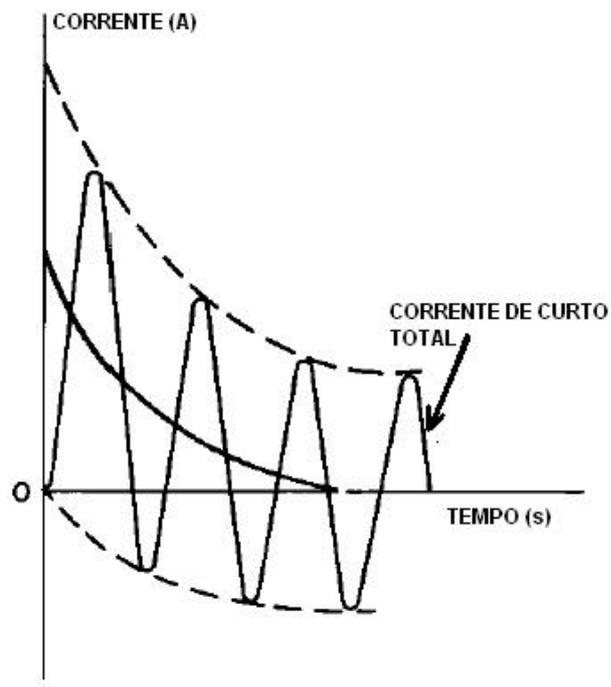


Figura 4.3.3.6: Corrente de curto-circuito total

Capítulo 5: Análise dos Resultados Obtidos na Simulação

Conforme mencionado no item 3.2, existem três condições de operação distintas, sobre as quais deseja-se fazer um estudo do comportamento dos equipamentos, para dimensionar corretamente o sistema elétrico deste projeto. Os resultados dos estudos de curto-circuito e fluxo de potência serão apresentados de forma associada, para cada configuração de operação, visando facilitar a compreensão dos mesmos.

A primeira configuração representa a situação de transferência de carga entre geradores. Em condições normais de operação, três geradores alimentam toda a planta e um fica como reserva. É comum a realização de manutenção nos geradores, e portanto, faz-se necessário que durante a operação da planta haja a entrada do gerador reserva para a saída de um dos geradores em funcionamento. Para tanto, os quatro geradores atuam em paralelo por alguns instantes para então poder ser efetuada a retirada de um gerador retornando à condição normal de operação.

5.1. Parametrização do diagrama unifilar no *software*

Para inserir os valores das cargas no programa de simulação, o primeiro passo foi dividir as cargas entre motrizes e não-motrizes. Isto é de suma importância para a correta simulação principalmente para o estudo de curto-circuito, no qual as cargas motrizes têm importante contribuição sobre o valor da corrente de curto-circuito, como foi visto no item 4.3.

A tabela 5.1.1 abaixo mostra as cargas equivalentes, já divididas entre as duas categorias, a partir da planilha de análise de cargas apresentada na tabela 2.2.3. A primeira coluna mostra o painel a que estão conectadas estas cargas.

Painel	Carga motórica (kW)	Carga motórica (kVAr)	Carga não-motórica (kW)	Carga não-motórica (kVAr)
PN-5143002A	5442,3	3257,7	500	0
PN-5143002B	4871,2	2944,6	500	0
PN-5143003A	442,70	254,85	388,55	229,19
PN-5143003B	343,03	197,04	145,61	92,91
PN-5143004A	172,96	96,56	561,23	286,39
PN-5143004B	65,19	37,99	503,49	280,06
PN-5148001A	23,67	13,92	696,26	451,19
PN-5148001B	23,67	13,92	521,98	328,89

Tabela 5.1.1 : cargas equivalentes por painel.

É importante salientar que as cargas do painel principal **não** foram agrupadas por serem de elevada potência. Além de se conhecer o comportamento isolado de cada uma destas cargas, é conveniente deixá-las explícitas no programa para futuras análises, como por exemplo, um estudo de queda de tensão no barramento do painel principal na partida de alguma dessas cargas.

5.2. Estudo de curto-circuito para a condição 1 - quatro geradores principais conectados ao sistema

Com os dados devidamente inseridos no sistema e o diagrama unifilar montado, como pode ser visto no anexo II.

A condição 1 retrata uma configuração de operação momentânea, caracterizada pela entrada do gerador que estava como reserva para a posterior saída de um dos três geradores que estavam conectados ao sistema. É importante começar principalmente pelo estudo de curto-circuito, pois é a configuração que resultará em maiores valores para as correntes de curto-circuito.

Neste projeto foram considerados como limites para as correntes de curto-circuito sustentada e de pico, os valores de 40kA e 100kA, respectivamente.

Assim, ao rodar a simulação de curto-circuito para o pior caso, será analisado se os equipamentos atenderão a estes limites de segurança.

Os fabricantes são capazes de produzir barramentos que suportam maiores valores para correntes de curto-circuito sustentada e corrente de pico, podendo oferecê-los conforme a necessidade do cliente. Porém, adotar um sistema com níveis de curto maiores que 40KA torna-se perigoso, pois tamanha é a energia envolvida na ocasião de uma falta, além de encarecer consideravelmente a produção do painel. No entanto, a adoção destes limites de segurança está mais relacionada com a segurança do que propriamente com o custo dos painéis.

A tabela 5.2.1 abaixo mostra os valores da corrente de curto-circuito trifásica sustentada e de pico obtidos na simulação de curto-circuito trifásico para esta configuração.

Painel	I''_k (KA)	i_p (KA)
PN-5143001	41,54	105,01
PN-5143002A	25,72	66,81
PN-5143002B	25,16	65,13
PN-5143003A	31,06	76,74
PN-5143003B	30,27	74,78
PN-5143004A	34,55	85,35
PN-5143004B	28,85	71,27
PN-5148001A	30,00	78,87
PN-5148001B	30,00	78,87

Tabela 5.2.1: principais resultados da simulação de curto-circuito trifásico.

A segunda coluna da tabela, I''_k , mostra os valores de corrente de curto-circuito sustentada, ou simétrica, em kA. A terceira coluna, i_p , mostra os valores para a corrente de pico, também em kA. Os equipamentos do sistema devem suportar sem sofrer danos os dois valores de corrente citados, mas salientando que essas correntes devem ser suportadas por tempos determinados.

A corrente de pico atua sobre o equipamento por um período de tempo extremamente pequeno, como visto no item 4.3, da ordem de meio-ciclo de onda. Já a corrente sustentada se mantém por um período de tempo muito maior que meio-ciclo e deve ser eliminada do sistema pelos equipamentos de proteção em determinado tempo (um segundo no máximo).

Em termos de proteção, existem disjuntores capazes de interromper uma corrente de falta em até um ciclo, como o caso dos disjuntores a ar comprimido [9]. O valor de corrente que o disjuntor deve ser capaz de interromper caracteriza sua capacidade de interrupção e é determinada pela corrente de curto-circuito sustentada. Já a capacidade de condução do disjuntor é determinada pela corrente de pico, sendo desta forma a maior corrente que o disjuntor suportará sem por em risco seu funcionamento.

No caso dos painéis, o fabricante deve assegurar que o barramento será capaz de suportar os esforços mecânicos e térmicos decorrentes da passagem da corrente de falta. Assim, é comum ao especificar um painel, definir o valor da corrente de pico máxima e o de corrente de curto-circuito sustentada durante um segundo. Obviamente, estes valores devem ser maiores que os obtidos nas simulações de curto-circuito, de forma que assegurem a integridade dos equipamentos.

Voltando à tabela 5.2.1, pode-se analisar que, exceto pelo painel principal, a corrente de curto-circuito simétrica trifásica sempre se mantém abaixo dos 40KA, assim como a corrente de pico se mantém abaixo dos 100kA. O painel principal apresenta valores para as duas correntes um pouco acima dos limites estabelecidos .

A solução encontrada para contornar este problema foi a adoção de um reator limitador de corrente, ligado entre os barramentos do painel, visando aumentar a reatância do circuito para diminuir o valor da corrente de curto-circuito trifásica.

5.2.1. Determinação do valor do Reator Limitador de Corrente

O reator limitador de corrente (RLC) é usado para aumentar a impedância do circuito, diminuindo assim o valor da corrente de curto-circuito. A partir da idéia de se adotar o reator em série, entre as barras C e D do painel principal (PN-5143001), o novo nível de curto estipulado foi de 30kA. Já que será adotado o uso do RLC, não fica lógico usá-lo para limitar o valor da corrente sustentada a 40kA, uma vez que os valores obtidos estão próximos a este valor (41,54kA de acordo com a tabela 5.2.1). Como este é um valor limite é conveniente adotar um nível mais conservador, além do que permitir margens para futuras ampliações do sistema, com conseqüente aumento do nível de curto e da corrente de pico.

Para o cálculo do valor do reator aplicou-se o Método das Potências [8], que emprega os cálculos em função das potências de curto-circuito, ao invés dos valores em pu.

O sistema pode ser simplificado de acordo com a figura 5.2.1.1 abaixo:

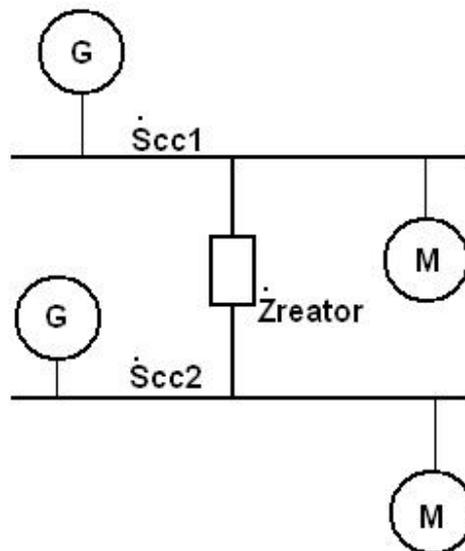


Figura 5.2.1.1: Sistema equivalente para determinar o valor do RLC.

Onde

S_{cc1}: potência de curto-circuito das barras A e C

S_{cc2}: idem para as barras B e D

Zreator: impedância do reator

G: equivalente da geração para as respectivas barras

M: equivalente para as cargas motrizes das respectivas barras

Os valores individuais das potências de curto-circuito foram retirados diretamente dos resultados da simulação, como pode ser encontrado no anexo III, efetuando-se a soma das contribuições das máquinas rotativas. A tabela 5.2.1.1 mostra os valores das potências de curto-circuito das máquinas separadas pelos barramentos. Considera-se para este cálculo as barras A e C como uma única barra (pois o disjuntore *tie* entre as barras está fechado), assim como as barras B e D, pois o reator separa as barras C e D.

PN-5143001A/C	Scc1 (kVA)
TF-5143001A	31916,62
TF-5143002A	7512,71
M-B-1212002A	9996,94
M-B-1251002A	31087,46
M-C-UC-1231001A	102681,11
GE-5147001A	143253,46
TF-5148001A	531,93
M-B-1212002C	9996,94
GE-5173001C	143253,46
Total	480230,63
PN-5143001B/D	Scc2 (kVA)
TF-5143001B	29143,95
TF-5143002B	3182,22
M-B-1212002B	9996,94
M-B-1251002B	31087,46
M-C-UC-1225001	8587,21
M-C-UC-1231001B	102681,11
GE-5147001B	143253,46

TF-5148001B	531,93
M-B-1212002D	9996,94
M-B-1251002C	31087,46
GE-5147001D	143253,46
Total	512802,14

Tabela 5.2.1.1: Potência de curto-circuito das máquinas.

Analisando a tabela 5.2.1.1 pode-se concluir que a contribuição das barras B e D para a corrente de curto-circuito (S_{cc2}) é maior que a das barras A e C (S_{cc1}). Calculando as correntes de curto-circuito trifásica simétrica para as barras em questão, com o disjuntor *tie* entre as barras C e D, aberto obtém-se:

$$I''_{AC} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{480,23MVA}{\sqrt{3} \times 13800} = 20,09kA \quad (\text{Equação 25})$$

$$I''_{BD} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{512,8MVA}{\sqrt{3} \times 13800} = 21,45kA \quad (\text{Equação 26})$$

Como o limite de corrente de curto no barramento deve ser 30kA, a contribuição das barras B e D para um curto-circuito trifásico ocorrido nas barras A ou C deve ser de 9,91kA ($=30-21,45kA$) como mostrado na figura 5.2.2.2. Este nível de curto equivale a uma potência de 236,87MVA ($S = \sqrt{3} \times V \times I$), que é a potência máxima que o reator deve permitir que seja transferida das barras B e D para as barras A e C.

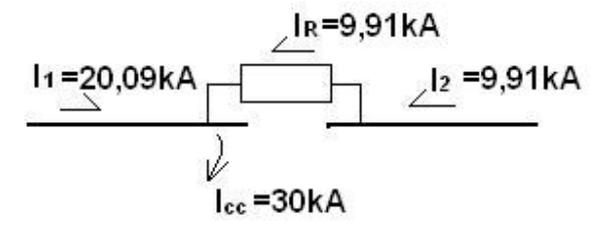


Figura 5.2.1.2: Correntes

Sendo

$$I_R = I_2 \quad (\text{Equação 27})$$

$$I_{cc} = I_1 + I_R = 30kA \quad (\text{Equação 28})$$

Se o curto ocorrer na barra B ou D, a contribuição da corrente de falta será das barras A e C e o raciocínio análogo deve ser empregado. Como a potência de curto das barras B e D (Scc2) é maior que a potência de curto das barras A e C (Scc1), é mais conveniente dimensionar o reator em função da contribuição da corrente de falta vinda das barras B e D, que obviamente será a maior. Modificando um pouco a figura 5.2.1.1 chega-se à figura 5.2.1.3, que representa o exposto anteriormente, explicitando o ponto de aplicação da falta como um novo barramento com potência de curto especificada em 236,87MVA (9,91kA).

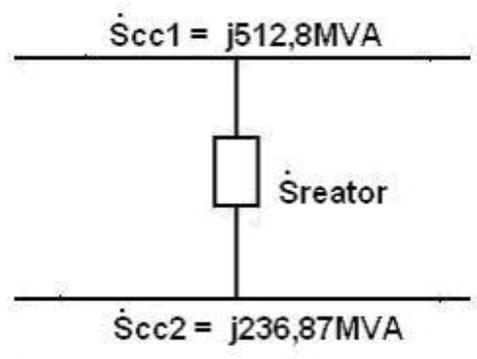


Figura 5.2.1.3: Sistema simplificado.

Na figura acima, os termos Scc1 e Scc2 não se relacionam mais à potência de curto definidas anteriormente. A partir deste ponto, o termo Scc1 deve ser entendido como a maior potência de curto entre as duas calculadas, no caso 512,8MVA das barras B e D, e o termo Scc2 como o valor fixado após o cálculo, ou seja, 236,87MVA.

De acordo com o Método das Potências:

$$\frac{1}{Scc_1} + \frac{1}{Sreator} = \frac{1}{Scc_2} \quad (\text{Equação 29})$$

$$\frac{1}{Scc_1} + \frac{1}{\frac{E^2}{Z^*}} = \frac{1}{Scc_2} \quad (\text{Equação 30})$$

$$\frac{1}{\frac{E^2}{Z^*}} = \frac{1}{Scc_2} - \frac{1}{Scc_1} \quad (\text{Equação 31})$$

$$Z^* = E^2 \left(\frac{1}{Scc_2} - \frac{1}{Scc_1} \right) \quad (\text{Equação 32})$$

onde

$$\begin{aligned} Scc_1 &= j512,8MVA \\ Scc_2 &= j236,87MVA \\ E &= 13,8kV \end{aligned}$$

que resulta em

$$\begin{aligned} Z^* &= (13,8)^2 \left(\frac{1}{j236,87} - \frac{1}{j512,8} \right) \\ Z^* &= -j0,433\Omega \quad (\text{Equação 33}) \\ Z &= j0,433\Omega \end{aligned}$$

Em posse do valor teórico do reator, considerou-se um valor de projeto de 460mΩ para realizar as simulações.

5.3. Condição 1 empregando o RLC

Executando a simulação de curto-circuito no sistema com o RLC inserido entre as barras C e D do painel principal, foram obtidos os resultados contidos no anexo III. Os principais resultados estão apresentados na tabela 5.3.1 abaixo.

Painel	I''_k (KA)	i_p (KA)
PN-5143001A/C	30,18	77,84
PN-5143001B/D	31,23	80,29
PN-5143002A	24,57	63,92
PN-5143002B	24,15	62,58
PN-5143003A	30,82	76,19
PN-5143003B	30,05	74,29
PN-5143004A	34,30	84,79
PN-5143004B	28,63	70,78
PN-5148001A	29,72	78,15
PN-5148001B	29,75	78,23

Tabela 5.3.1: Estudo de curto-circuito com o RLC para condição 1.

Com a inserção do reator, o painel principal fica “dividido” entre dois barramentos, pois a corrente de curto-circuito trifásica vinda das barras B e D é limitada.

Todos os valores obtidos estão dentro dos limites estabelecidos anteriormente (30kA para corrente sustentada e 100kA para corrente de pico) e devem ser usados para o dimensionamento de todos os equipamentos do sistema, uma vez que esta configuração representa o pior caso em termos de curto-circuito.

Comparando as tabelas 5.2.1 e 5.3.1 pode-se ver que os valores de corrente de falta simétrica e de pico diminuiram, mas a mudança mais sensível é em relação ao painel principal (PN-5143001), pois as cargas conectadas a este painel são de elevada potência.

Painel	I''_k (KA)	i_p (KA)	Painel	I''_k (KA)	i_p (KA)
PN-5143001	41,54	105,01	PN-5143001A/C	30,18	77,84
PN-5143002A	25,72	66,81	PN-5143001B/D	31,23	80,29
PN-5143002B	25,16	65,13	PN-5143002A	24,57	63,92
PN-5143003A	31,06	76,74	PN-5143002B	24,15	62,58
PN-5143003B	30,27	74,78	PN-5143003A	30,82	76,19

PN-5143004A	34,55	85,35	PN-5143003B	30,05	74,29
PN-5143004B	28,85	71,27	PN-5143004A	34,30	84,79
PN-5148001A	30,00	78,87	PN-5143004B	28,63	70,78
PN-5148001B	30,00	78,87	PN-5148001A	29,72	78,15
			PN-5148001B	29,75	78,23

Tabela 5.3.4: comparativo entre os resultados do estudo de curto sem e com o RLC.

Além destas cargas, os geradores influenciam significativamente sobre os resultados, porém sem influenciar muito sobre o resultado nos outros painéis. A tabela 5.3.5 abaixo mostra os valores individuais da corrente de falta simétrica para os geradores, assim como para cada carga do painel principal. Estes valores são independentes da configuração do sistema, sendo portanto valores intrínsecos aos equipamentos. Analisando os valores da tabela, vê-se claramente que a maior contribuição para a corrente de falta é dos geradores, de aproximadamente 6kA.

As demais cargas não estão expressas na tabela devido à parametrização citada no item 5.1, onde para cada barramento do painel foram atribuídas duas cargas equivalentes divididas entre motrizes e não-motrizes. Além disso, as cargas que foram agrupadas em cargas equivalentes não têm potências elevadas assim como as do painel principal, o que torna a análise individual pouco produtiva em termos da dinâmica do sistema como um todo.

Carga	I''_k (KA)
GE-5147001A	5,99
GE-5147001B	5,99
GE-5147001C	5,99
GE-5147001D	5,99
M-B-1212002A	0,42
M-B-1212002B	0,42
M-B-1212002C	0,42
M-B-1212002D	0,42
M-B-1251002A	1,3
M-B-1251002B	1,3

M-B-1251002C	1,3
M-C-UC-1225001	0,36
M-C-UC-1231001A	4,3
M-C-UC-1231001B	4,3
TF-5143001A	1,34
TF-5143001B	1,22
TF-5143002A	0,31
TF-5143002B	0,13
TF-5148001A	0,02
TF-5148001B	0,02

Tabela 5.3.5: valores individuais de corrente de falta simétrica.

Ainda sobre os resultados obtidos no estudo de curto, a tabela 5.3.6 a seguir apresenta os valores da corrente de pico para os geradores e para as cargas do painel principal, semelhantemente ao que foi feito na tabela anterior. Porém, nesta tabela, são apresentados os resultados obtidos antes e depois da inclusão do reator.

Carga	I_p Antes (KA)	I_p Depois (KA)
GE-5147001A	15,15	15,46
GE-5147001B	15,15	15,46
GE-5147001C	15,15	15,46
GE-5147001D	15,15	15,46
M-B-1212002A	1,06	1,08
M-B-1212002B	1,06	1,08
M-B-1212002C	1,06	1,08
M-B-1212002D	1,06	1,08
M-B-1251002A	3,29	3,35
M-B-1251002B	3,29	3,35
M-B-1251002C	3,29	3,35
M-C-UC-1225001	0,91	0,92

M-C-UC-1231001A	10,86	11,08
M-C-UC-1231001B	10,86	11,08
TF-5143001A	3,38	3,44
TF-5143001B	3,08	3,13
TF-5143002A	0,79	0,81
TF-5143002B	0,34	0,34
TF-5148001A	0,06	0,06
TF-5148001B	0,06	0,06

Tabela 5.3.6: valores individuais de corrente de pico antes e depois do RLC.

Por inspeção pode-se ver que o valor da corrente de pico individual aumentou. Isto pode ser explicado pela introdução do RLC, que alterou o sistema introduzindo uma defasagem angular na tensão das barras B e D, como será visto no item 5.4.

Como foi visto no item 4.3, a corrente de curto-circuito, que se divide em duas componentes (simétrica e contínua), é determinada em função do instante de aplicação da falta em relação à onda de tensão. Como o instante de aplicação da falta não foi alterado, só resta afirmar que o causador do aumento da corrente de pico é o reator.

Em vista disto, deve-se dimensionar os equipamentos levando em consideração apenas o valor da corrente simétrica obtida na simulação. Para determinar a corrente de pico, a fim de especificar a capacidade de condução dos equipamentos, deve-se lançar mão do máximo valor teórico. A figura 5.3.1 a seguir é idêntica à figura 4.3.3.4 apresentada anteriormente. A corrente de curto-circuito tem o valor máximo teórico igual a duas vezes o valor da corrente simétrica eficaz.

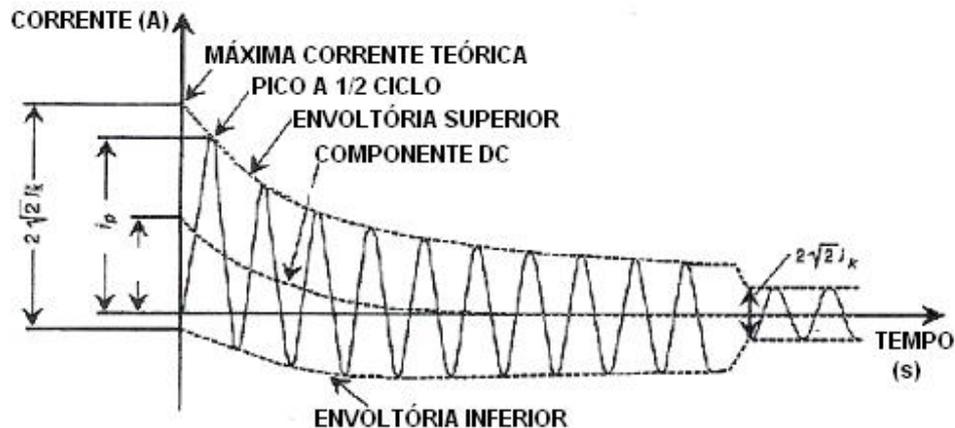


Figura 5.3.1: Valores da corrente de curto-circuito.

Desta forma, pode-se concluir que a introdução do reator, sendo mantido o mesmo tempo de aplicação da falta, se mostrou desfavorável para análise da corrente de pico, devendo-se usar preferencialmente o valor teórico, em função do valor da corrente de curto-circuito simétrica (nível de curto) obtida na simulação. Na realidade, como ficou evidente para este caso, nunca se deve usar o valor de corrente de pico obtido em programas de simulação e sim o máximo valor teórico.

No item 5.2.1 foi introduzido o novo nível de curto desejado para o painel principal em 30kA a fim de se especificar o painel com nível de curto de 40kA e capacidade de condução de 100kA. Aplicando o exposto anteriormente sobre o valor do nível de curto estipulado (30kA), o valor da capacidade de condução será: $2 \times 40\text{kA} = 80\text{kA}$. O valor de 100kA adotado anteriormente se dá em função dos fabricantes em produzir os equipamentos com determinada capacidade de condução de corrente. Apesar do valor obtido de 80kA ser menor que os 100kA adotado, é o valor que muitos fabricantes adotam como padrão e que será utilizado na especificação deste painel.

Todos os resultados apresentados podem ser encontrados na forma completa, incluindo os diagramas unifilares e a saída do *software*, no anexo III.

5.4. Estudo de fluxo de potência para a condição 1 - quatro geradores principais conectados ao sistema

Teoricamente o estudo de fluxo de potência deveria ser realizado antes do estudo de curto-circuito. Porém, como já dito anteriormente, a finalidade de

simular primeiro o curto-circuito decorre de se incluir ou não no sistema elementos como os reatores limitadores de corrente. Como será visto a seguir, a adoção do RLC traz mudanças significativas sobre o sistema, tanto fisicamente (inclusão do RLC) quanto matematicamente.

As alterações no sistema foram estudadas sob o ponto de vista do fluxo de potência e curto-circuito. Também é comum de se realizar estudos de estabilidade, harmônicos e queda de tensão na partida de motores, entre outros. Por isso é importante ter em mente o que será apresentado neste projeto. Deve-se partir da premissa de que já foram realizados os estudos de fluxo de potência e de curto-circuito para o sistema sem a inclusão do RLC. Com a inclusão não se torna útil apresentar os resultados se o sistema não representa o sistema final.

Portanto, os resultados desta configuração específica (quatro geradores conectados, **sem** o RLC) não serão apresentados. A simulação a ser apresentada foi feita sobre o sistema com o reator já incluído.

Aproveitando a mesma configuração utilizada para o estudo de curto-circuito, foi simulado um estudo de fluxo de potência, onde ocorre a operação do sistema sendo alimentado pelos quatro geradores. A tabela 5.4.1 mostra os valores de tensão nos barramentos em módulo e defasagem angular.

Painel	Tensão nominal (kV)	Tensão obtida (kV)	Tensão obtida (pu)	Ângulo (graus)
PN-5143001A/C	13,8	13,8	1	0
PN-5143001B/D	13,8	13,8	1	-0,31
PN-5143002A	4,16	4,07	0,98	-32,16
PN-5143002B	4,16	4,07	0,98	-32,27
PN-5143003A	0,48	0,47	0,97	-32,13
PN-5143003B	0,48	0,47	0,98	-31,55
PN-5143004A	0,48	0,47	0,98	-31,88
PN-5143004B	0,48	0,47	0,98	-31,77
PN-5148001A	0,48	0,47	0,98	-31,78
PN-5148001B	0,48	0,47	0,98	-31,66

Tabela 5.4.1: Tensões nos barramentos para operação de transferência de carga.

As duas primeiras colunas referem-se aos painéis, sendo a primeira o TAG do equipamento e a segunda a tensão nominal do mesmo. As colunas seguintes são provenientes da simulação de fluxo de potência. Os diagramas unifilares, assim como a saída do programa, podem ser encontrados no anexo II.

A primeira observação que pode ser feita sobre estes resultados recai sobre a tensão de operação dos equipamentos. Vemos que a tensão de operação sugerida na tabela 2.2.1, do item 2.2 (análise de cargas) é coerente, tendo em vista que nenhum valor obtido ficou abaixo do recomendado.

Outra observação importante sobre a tabela acima é sobre a defasagem existente na tensão das barras B e D do painel principal em relação às barras A e C. Esta defasagem se deve à introdução do reator. O fato da defasagem se apresentar nas barras B e D se explica pela maior quantidade de cargas conectadas à estas barras do que em relação às barras A e C, caracterizando o sentido de corrente em direção às barras B e D.

Quando foi abordado o dimensionamento do reator, no item 5.2.1, foi visto que a potência de curto das barras B e D era maior que a das barras A e C. Isto se deve ao fato de mais cargas motrizes estarem conectadas às barras B e D. Porém quando se fala em fluxo de potência, não se deve observar apenas as cargas motrizes, uma vez que as cargas não-motrizes consomem energia e afetam diretamente sobre os resultados. Assim sendo, a tabela 5.4.2 a seguir retrata o somatório das potências conectadas às barras A e C e às barras B e D (é importante lembrar que as barras A e C, assim como as barras B e D, estão sendo tratadas como um único barramento pois os disjuntores *tie* encontram-se fechados entre as barras A e C e entre as barras B e D). Como a potência solicitada pelas barras B e D é maior ($S_2 > S_1$), o caminho da corrente sobre o reator será em direção a essas barras.

Barras A e C	P(kW)	Q(kW)	S₁(kVA)
TF-5143001A	5957,71	3564,27	
TF-5143002A	1573,27	945,32	
M-B-1212002A	1421,05	846,97	
M-B-1251002A	4596,89	2355,06	

M-C-UC-1231001A	11843	6067,38	
TF-5148001A	721,6	498,55	
M-B-1212002C	1421,05	846,97	
TOTAL	27534,57	15124,52	31415,02
Barras B e D	P(kW)	Q(kW)	S₂(kVA)
TF-5143001B	5383,82	3195,19	
TF-5143002B	1060,91	643,94	
M-B-1212002B	1421,05	846,97	
M-B-1251002B	4596,89	2355,06	
M-C-UC-1225001	1163	596	
M-C-UC-1231001B	11843	6067,38	
TF-5148001B	546,59	361,58	
M-B-1212002D	1421,05	846,97	
M-B-1251002C	4596,89	2355,06	
TOTAL	32033,2	17268,15	36391,14

Tabela 5.4.2: Somatória das potências em função do barramento.

A tabela 5.4.3 abaixo mostra o panorama da geração, incluindo os valores de potência ativa e reativa, fator de potência e carregamento para cada painel.

Gerador	P (kW)	Q (kVAr)	cos Ø	Carregamento
GE-5147001A	14891.94	8101.91	0.88	54.25%
GE-5147001B	14891.94	8101.90	0.88	54.25%
GE-5147001C	14891.94	8101.91	0.88	54.25%
GE-5147001D	14891.94	8101.90	0.88	54.25%

Tabela 5.4.3: Panorama da geração para operação de transferência de carga.

Inspeccionando a tabela, pode-se concluir primeiramente que os geradores suprem sem problemas a demanda de energia da plataforma, uma vez que o carregamento de todos os geradores é de 54,25%. Não é conveniente considerar estes valores como satisfatórios para operação normal, pois como já dito diversas vezes, esta configuração representa um período curto de tempo, em que a carga que estava distribuída entre três geradores passa a ser dividida entre quatro geradores. Isto se mostra coerente com o resultado obtido no item 2.4,

dimensionamento dos geradores, uma vez que o balanço de cargas foi realizado considerando uma operação normal composta por três geradores alimentando o sistema, em que foi empregada uma folga de aproximadamente 40%.

Sabendo que cada gerador tem potência nominal aparente de 31250kVA com fator de potência 0,8, tem-se para potência ativa e reativa os valores 25000kW e 18750kVAr, respectivamente. Assim, cada gerador apresenta uma folga de aproximadamente 10100kW (40%) e 10650kVAr (57%). Com uma folga desta proporção torna-se anti-econômico manter os quatro geradores funcionando simultaneamente além do tempo necessário para a transferência de cargas entre os geradores, observando pelo ponto de vista de consumo de combustível e do fator de potência, que se eleva à medida que a carga conectada ao gerador se aproxima da nominal.

De forma similar à tabela apresentada acima, a tabela 5.4.4 abaixo mostra o perfil dos transformadores ligados ao painel principal, incluindo os valores de potência ativa e reativa, fator de potência e carregamento para cada transformador.

Transformador	P (kW)	Q (kVAr)	cos Ø	Carregamento
TF-5143001A	5957,71	3564,27	0,86	55,40%
TF-5143001B	5383,82	3195,19	0,86	50,08%
TF-5143002A	1573,27	945,32	0,86	65,78%
TF-5143002B	1060,91	643,94	0,85	44,24%
TF-5148001A	721,60	498,55	0,82	54,68%
TF-5148001B	546,59	361,58	0,83	40,96%

Tabela 5.4.4: Panorama da geração para operação de transferência de carga.

Observando a tabela pode-se ver que, exceto pelos transformadores TF-5148001A e B, os outros estão no limite caso seja necessário que um transformador alimente um painel inteiro, como ilustrado pela figura 3.1.1.b. Porém, como os transformadores são dotados de ventilação forçada, sua potência nominal pode ser acrescida em cerca de 25%.

A tabela 5.4.5 abaixo fornece uma comparação à respeito da capacidade de cada transformador, com e sem ventilação forçada.

Transformador	Capacidade Nominal (kVA)	Capacidade com ventilação forçada (kVA)
TF-5143001A e B	12500	16250
TF-5143002A e B	4000	520
TF-5148001A e B	2000	-

Tabela 5.4.5: capacidade dos transformadores com ventilação forçada.

Assim, caso seja necessária a entrada de qualquer transformador em operação semelhante a da figura 3.1.1.b, a ventilação forçada pode ser acionada a fim de que o transformador possa suprir a demanda sem problemas.

É importante ressaltar que, visando o menor desgaste possível dos transformadores, neste projeto os transformadores não devem operar em sobrecarga em nenhum momento. Os fabricantes de transformadores dão uma folga para operação em sobrecarga, porém ressaltando que o uso nesta condição reduz a vida útil do equipamento. Desta forma, o uso da ventilação forçada é preferível à operação em sobrecarga.

Sendo realizado sobre a pior condição de operação, o estudo de curto-circuito assegura que o sistema estará bem dimensionado para as demais formas de operação que levem o sistema a apresentar situações menos exigentes que o pior caso estudado.

Como os dois casos seguintes representam o sistema alimentado por três geradores ou pelo gerador de emergência, pode-se afirmar que os valores de corrente de curto-circuito serão menores que os obtidos anteriormente, quando o sistema é alimentado pelos quatro geradores principais.

As tabelas a seguir mostram a corrente de operação de cada equipamento, separadamente por painel. Isto é de fundamental importância para se especificar a capacidade de condução nominal de corrente dos barramentos destes painéis, ou seja, um valor para o qual em operação normal nunca será ultrapassado, porém que em condições de sobrecarga poderá ocorrer.

PN-5143001A e C	I (kA)
GE-5147001A	0,71
GE-5147001C	0,71
soma	1,42
PN-5143001B e D	I (kA)
GE-5147001B	0,71
GE-5147001D	0,71
soma	1,42
Total do painel	2,84

Tabela 5.4.6: PN-5143001

PN-5143002A	I (kA)
TF-5143001A	0,96
PN-5143002B	I (kA)
TF-5143001B	0,87
Total do painel	1,83

Tabela 5.4.7: PN-5143002

PN-5143003A	I (kA)
TF-5143002A	1,19
PN-5143003B	I (kA)
TF-5143002B	0,69
Total do painel	1,88

Tabela 5.4.8: PN-5143003

PN-5143004A	I (kA)
TF-5143003A	1,02
PN-5143004B	I (kA)
TF-5143003B	0,8
Total do painel	1,82

Tabela 5.4.9: PN-5143004

PN-5148001A	I (kA)
TF-5148001A	1,05
PN-5148001B	I (kA)
TF-5148001B	0,79
Total do painel	1,84

Tabela 5.4.10: PN-5143008

Analisando a tabela, pode-se especificar a capacidade de condução nominal de cada barramento utilizando a linha “total do painel”, somando a corrente referente à cada entrada de energia. Desta forma pode-se finalmente chegar à tabela 5.4.11 que relaciona a especificação da capacidade nominal de cada barramento em relação ao respectivo painel.

Painel	In(A)
PN-5143001	3150
PN-5143002	2000
PN-5143003	2000
PN-5143004	2000
PN-5148001	2000

Tabela 5.4.11: Valores para especificação de corrente nominal dos barramentos.

5.5. Estudo de fluxo de potência para a condição 2 - três geradores principais conectados ao sistema

Partindo da mesma base utilizada para a realização dos estudos de curto-circuito e de fluxo de potência, o próximo passo foi caracterizar o sistema de acordo com a configuração 2, ou seja, três geradores conectados ao sistema.

Analisando o respectivo diagrama unifilar montado no programa (anexos II e III), vê-se que o gerador GE-5147001D foi desligado do sistema mediante abertura do disjuntor alimentador do painel.

Da mesma forma que no item 5.4, será apresentada a seguir a tabela que resume os valores de tensão, em módulo e defasagem, obtidos da simulação.

Painel	Tensão nominal (kV)	Tensão obtida (kV)	Tensão obtida (pu)	Ângulo (graus)
PN-5143001A/C	13,8	13,8	1	0
PN-5143001B/D	13,8	13,8	1	-1,69
PN-5143002A	4,16	4,07	0,98	-32,17
PN-5143002B	4,16	4,07	0,98	-33,64
PN-5143003A	0,48	0,47	0,97	-32,14
PN-5143003B	0,48	0,47	0,98	-32,93
PN-5143004A	0,48	0,47	0,98	-31,89
PN-5143004B	0,48	0,47	0,98	-33,14
PN-5148001A	0,48	0,47	0,98	-31,78
PN-5148001B	0,48	0,47	0,98	-33,03

Tabela 5.5.1: Tensões nos barramentos para condição 2.

A primeira observação a ser feita sobre os resultados está na defasagem de tensão apresentada pelas barras B e D de $1,69^\circ$ em atraso com relação à tensão das barras A e C. Isto é explicável pela ausência do gerador que estava conectado à barra D e agora não está mais pois, além da carga alimentada pelas barras B e D ser maior que a alimentada pelas barras A e C, a geração conectada às barras A e C é duas vezes maior do que a que está ligada às barras B e D. Em vista disto, é de se esperar um fluxo de corrente maior em direção às barras B e D, introduzindo uma defasagem maior que a existente no caso anterior que atribuiu uma defasagem de $0,31^\circ$.

Em termos de queda de tensão nos barramentos dos painéis, não se apreciou uma queda notável em relação à operação na condição 1. Quanto à defasagem da tensão, pode-se notar que também não apresentaram muita discrepância em relação ao obtido anteriormente.

A tabela 5.5.2 apresenta o panorama da geração, de forma semelhante à apresentada no item 5.4.

Gerador	P (kW)	Q (kVAr)	cos ϕ	Carregamento
GE-5147001A	19853,71	7859,65	0,93	68,33%
GE-5147001B	19854,17	17356,49	0,75	84,39%
GE-5147001C	19853,71	7532,17	0,93	67,95%
GE-5147001D	-	-	-	-

Tabela 5.5.2: Panorama da geração para operação na condição 2.

Analisando os resultados, vê-se que a saída do gerador GE-5147001D representou em um carregamento maior por parte do gerador GE-5147001B, que está conectado ao mesmo barramento (barras B e D).

Cada gerador tem potência nominal de 32150kVA, o que resulta em 25000kW e 18750kVAr, com um fator de potência 0,8. Observando a linha relativa ao gerador GE-5147001B, vê-se que o mesmo é forçado a fornecer quase o total possível de potência reativa ($18750 - 17356,49 = 1393,51$ kVAr).

Seria esperado que cada gerador contribuísse com parcelas semelhantes de potência reativa, assim como ocorre com a potência ativa, pois cada gerador apresenta parcelas de energia ativa semelhantes. Esta diferença se explica por um detalhe de configuração no programa que define o controle sobre a contribuição de energia reativa.

A introdução do reator no barramento principal faz com que o programa veja o painel principal como tendo dois barramentos ao invés de um só. O controle empregado, denominado controle secundário, faz com que os barramentos do painel principal sejam obrigados a apresentar tensão com módulo unitário em pu. Por isso, o gerador conectado às barras B e D tem de suprir toda a energia reativa necessária para manter a tensão em 1 pu, assim como os geradores conectados às barras C e D. Uma maneira para contornar a situação seria forçar os geradores a contribuir com parcelas iguais de energia reativa, ou seja:

$$(7860+17356+7532) / 3 = \mathbf{10916kVAr.} \text{ (Equação 34)}$$

Infelizmente, essa opção se mostrou ineficaz mediante o controle executado, fazendo com que as barras B e D apresentassem tensão menor que a unidade, em pu. Desta forma, o estudo prosseguiu usando a configuração anterior, ou seja, utilizando o controle secundário. Portanto, o estudo será conduzido com este problema, onde deve ser considerada uma contribuição de potência reativa da ordem de 10MVAR para cada gerador ao invés dos valores apresentados na tabela 5.5.2.

O panorama dos transformadores é apresentado na tabela 5.5.3, da mesma forma que foi apresentado no item 5.4.

Transformador	P (kW)	Q (kVAr)	cos Ø	Carregamento
TF-5143001A	5957,82	3565,78	0,86	55,53%
TF-5143001B	5383,86	3195,20	0,86	50,08%
TF-5143002A	1569,60	943,09	0,86	65,82%
TF-5143002B	1060,91	643,95	0,85	44,24%
TF-5148001A	718,95	496,53	0,82	54,60%

TF-5148001B	546,59	361,58	0,83	40,96%
-------------	--------	--------	------	--------

Tabela 5.5.3: Panorama dos transformadores.

Pode-se concluir, como era esperado, o panorama dos transformadores não apresentou significantes diferenças. Isto se dá pelo fato de que a única alteração feita no sistema foi a retirada de uma dos geradores. As alterações notadas podem ser atribuídas ao processo de cálculo, que por apresentar iterações matemáticas pode introduzir um pequeno erro. Para se ter uma idéia de quão desprezível é este erro, a maior alteração em termos de carregamento dos transformadores é de 0,13%, em relação ao transformador TF-5143001A (antes de 55,40%).

5.6. Estudo de fluxo de potência para a condição 3 – operação de emergência

A outra condição de operação considera somente o painel de emergência (PN-5148001) alimentado pelo gerador de emergência e fornecendo energia às cargas essenciais. Para tanto todos os disjuntores que não fazem parte desta configuração foram abertos, permanecendo fechados somente os disjuntores *tie* do barramento do PN-5148001, o disjuntor alimentador do painel (proveniente do gerador) e os disjuntores que alimentam as cargas.

As tabelas 5.6.1 e 5.6.2 apresentam os valores de tensão nos barramentos e o panorama da geração, respectivamente.

Painel	Tensão nominal (kV)	Tensão obtida (kV)	Tensão obtida (pu)	Ângulo (graus)
PN-5148001A/B/C	0,48	0,48	1	0

Tabela 5.6.1: Tensões nos barramentos para operação de emergência.

Como só este painel é retratado no estudo, não há nenhum tipo de comparação em relação a queda de tensão em relação aos outros painéis.

Gerador	P (kW)	Q (kVAr)	cos Ø	Carregamento
GE-5148001	1303,02	834,98	0,84	83,65%

Tabela 5.6.2: Panorama da geração para operação de emergência.

Com respeito ao panorama da geração de emergência, pode-se comprovar que o dimensionamento feito no capítulo 2 atende plenamente à exigência das cargas essenciais.

O gerador tem potência nominal de 2MVA, resultando em 1600kW de potência ativa e 1200kVAr, com fator de potência 0,8. Assim sendo, existe uma folga de aproximadamente 300kW e 800kVAr para eventuais ampliações da planta industrial ou para operações não previstas, como previsto no balanço de cargas, capítulo 2, em que era dimensionada com uma folga de aproximadamente 26%.

$$\sqrt{1303^2 + 835^2} = 1548kVAr = 77,4\% \text{ (Equação 35)}$$

Esta demanda representa 77,4% da capacidade nominal do gerador, deixando desta forma uma folga de 22,6%, o que é bastante aceitável em função do planejado no capítulo 2.

Capítulo 6: Conclusões

O trabalho desenvolvido teve por finalidade efetuar os estudos elétricos para um sistema industrial de uma unidade de produção *offshore*, desenvolvendo os procedimentos que assegurem a operação da plataforma assim como a segurança do pessoal envolvido na produção, além de especificar os principais componentes do sistema.

O software DlgSILENT *PowerFactory* versão 13.0 mostrou-se uma ferramenta eficiente para a simulação dos estudos de curto-circuito e fluxo de potência, apresentando resultados rápidos e precisos, gerando ainda relatórios detalhados para análise do engenheiro responsável.

Quanto ao estudo de curto-circuito, pode-se concluir que a introdução do Reator Limitador de Corrente (RLC) diminuiu efetivamente o nível de curto, tanto do painel principal quanto dos outros painéis ligados a ele. Em termos de custo, é mais vantajosa a introdução do RLC do que a opção pela produção do painel com um nível de curto-circuito maior do que 40kA. Porém, a adoção do RLC visando diminuir o nível de curto-circuito está mais voltada para a segurança do pessoal de operação do que para o custo financeiro, tendo em vista a quantidade de energia envolvida em casos de falha para níveis de curto-circuito de ordem maior que 40kA

A condição de operação de transferência de cargas (com os quatro geradores conectados ao painel principal) foi determinante para dimensionar os equipamentos quantos aos níveis de curto-circuito da planta industrial e definir os padrões para os quais os painéis devem ser construídos. A tabela 6.1 apresenta o nível de curto para cada painel (os níveis de curto-circuito que os painéis devem ser fabricados).

Painel	I_k'' (kA)	i_p (kA)
PN-5143001	40	100
PN-5143002	31,5	82
PN-5143003	40	100
PN-5143004	40	100
PN-5148001	40	100

Tabela 6.1: Níveis de curto para os painéis.

Onde

I_k'' – corrente de curto-circuito trifásica simétrica

i_p – corrente de curto-circuito trifásica de pico

A condição de operação empregada é a mais rígida, consistindo nos quatro geradores ligados para a transferência de cargas. Vale salientar que esta condição não é a predominante e que ocorre durante um curto espaço de tempo. Assim sendo, assegura-se que os equipamentos do sistema elétrico estão bem dimensionados quanto ao nível de curto, uma vez que a probabilidade de ocorrência de um curto trifásico (que já é pequena) durante a operação de transferência de cargas é menor que a probabilidade de ocorrência durante a condição de operação normal.

Quanto ao estudo de fluxo de potência conclui-se que o modo de operação normal, comparado com o modo de operação de transferência de cargas, é o modo ideal em termos de aproveitamento dos geradores. Para operação normal os geradores se aproximam da potência nominal, resultando em maiores rendimento e fator de potência, ou seja, a taxa de geração é maior, além do fato do menor consumo de combustível, pois no modo normal são três turbinas funcionando e no modo de transferência são quatro.

Apesar do problema apresentado no item 5.5, em que o controle empregado sobre a contribuição de potência reativa faz com que um gerador fique muito mais carregado que os outros dois, o *software* se mostrou bastante confiável, apresentando resultados bastante coerentes com a teoria e com os estudos anteriores. O problema relatado não foi percebido antes, no estudo de

fluxo de potência para a condição 1 (em que os quatro geradores estão conectados ao sistema), pois a geração era equivalente em ambos os barramentos e a contribuição de potência ativa e reativa deveria ser realmente muito próxima. Com a retirada de um dos geradores das barras B e D a geração das barras A e C ficou muito maior que a das barras B e D introduzindo este problema. Por um lado, isto foi muito bom para mostrar este detalhe do programa de forma que seria necessário o ajuste do modelo de controle de cargas.

A operação da plataforma no modo normal garante o suprimento de energia a todas as cargas da plataforma, apresentando ainda uma reserva de energia significativa. Isto é importante tanto para operações não previstas quanto para futuras ampliações da planta industrial. Comparando os resultados dos estudos de fluxo de potência (capítulo 5) com o estudo de análise de cargas (capítulo 2) observa-se que os geradores suprem 68958kVA ($21352,8 + 26371,1 + 21234,5$), e o previsto pela análise de cargas é de 67396kVA. Esta diferença é desprezível frente ao tamanho da geração e pode ser atribuída às condições de simulação. Dentre os dois resultados, deve-se dar prioridade ao obtido pelo estudo de fluxo de potência pois engloba todas as perdas dos equipamentos, o que na análise de cargas foi efetuado somente acrescentando-se um fator de 3% sobre a demanda por potência ativa.

6.1. Geradores

Os geradores foram os primeiros equipamentos a serem dimensionados em função da análise de cargas e foram desenvolvidos durante este trabalho.

Os geradores principais, que são acionados por turbinas a gás, devem operar em 13,8kV, com fator de potência 0,8, 4 pólos, 60Hz, resultando em uma velocidade síncrona de 1800rpm.

Já os geradores de emergência, que têm acionamento a motores diesel, operam em 480V, fator de potência 0,8, 10 pólos, 60Hz, resultando em uma velocidade síncrona de 720rpm.

Ambos os geradores são conectados em estrela ao sistema, tendo o neutro aterrado por alta impedância, especificamente por resistores.

6.2. Transformadores

A tabela 6.2.1 a seguir retrata as principais especificações dos transformadores do sistema.

Transformador	Relação (V)	Ligação	S (kVA)	Ventilação forçada?	In(A)
TF-5143001A/B	13800-4160	Delta-estrela	12500	Sim	3150
TF-5143002A/B	13800-480/480	Delta-estrela/estrela	4000	Sim	2000
TF-5148001A/B	13800-480	Delta-estrela	2000	Não	2000

Tabela 6.2.1: Principais especificações dos transformadores

Todos os transformadores têm os são aterrados por alta impedância nos lados ligados em estrela.

6.3. Painéis elétricos

Os painéis elétricos foram apresentados ao longo deste trabalho. A tabela a seguir retrata as principais especificações do painel:

Painel	Tensão (V)	I_k'' (kA)	i_p (kA)	In(A)
PN-5143001	13800	40	100	3150
PN-5143002	4160	31,5	82	2000
PN-5143003	480	40	100	2000
PN-5143004	480	40	100	2000
PN-5148001	480	40	100	2000

Tabela 6.1.1: Principais características dos painéis.

Onde:

I_k'' → nível de curto-circuito para corrente simétrica

I_p → nível de curto-circuito para corrente de pico

I_n → capacidade nominal de condução do barramento

Assim como para os painéis, os demais equipamentos que os compõem, tais como disjuntores, fusíveis, contadores, entre outros, devem ser dimensionados seguindo os valores da tabela acima. Os valores de nível de curto são também muito importantes para o dimensionamento dos cabos elétricos, uma vez que devem ser determinados:

- Máxima corrente de curto-circuito em um cabo, num determinado período.
- Seção do condutor necessária para suportar determinada condição de curto-circuito.
- O tempo máximo que um cabo pode funcionar sob curto-circuito sem danos à isolação.

O foco deste projeto é dimensionar os principais equipamentos do sistema elétrico. Tendo como base os estudos desenvolvidos, pode-se montar as tabelas seguintes ressaltando as principais especificações de acordo com o tipo de cada equipamento. Assim, os itens a seguir tratarão cada tipo de equipamento separadamente e da forma mais abrangente.

Assim sendo, pode-se afirmar que todo o sistema elétrico foi bem dimensionado, sendo permitida a operação segura de todos os equipamentos da plataforma e possibilitando ainda futuras ampliações da planta industrial assim como dos sistemas auxiliares da embarcação.

REFERÊNCIAS

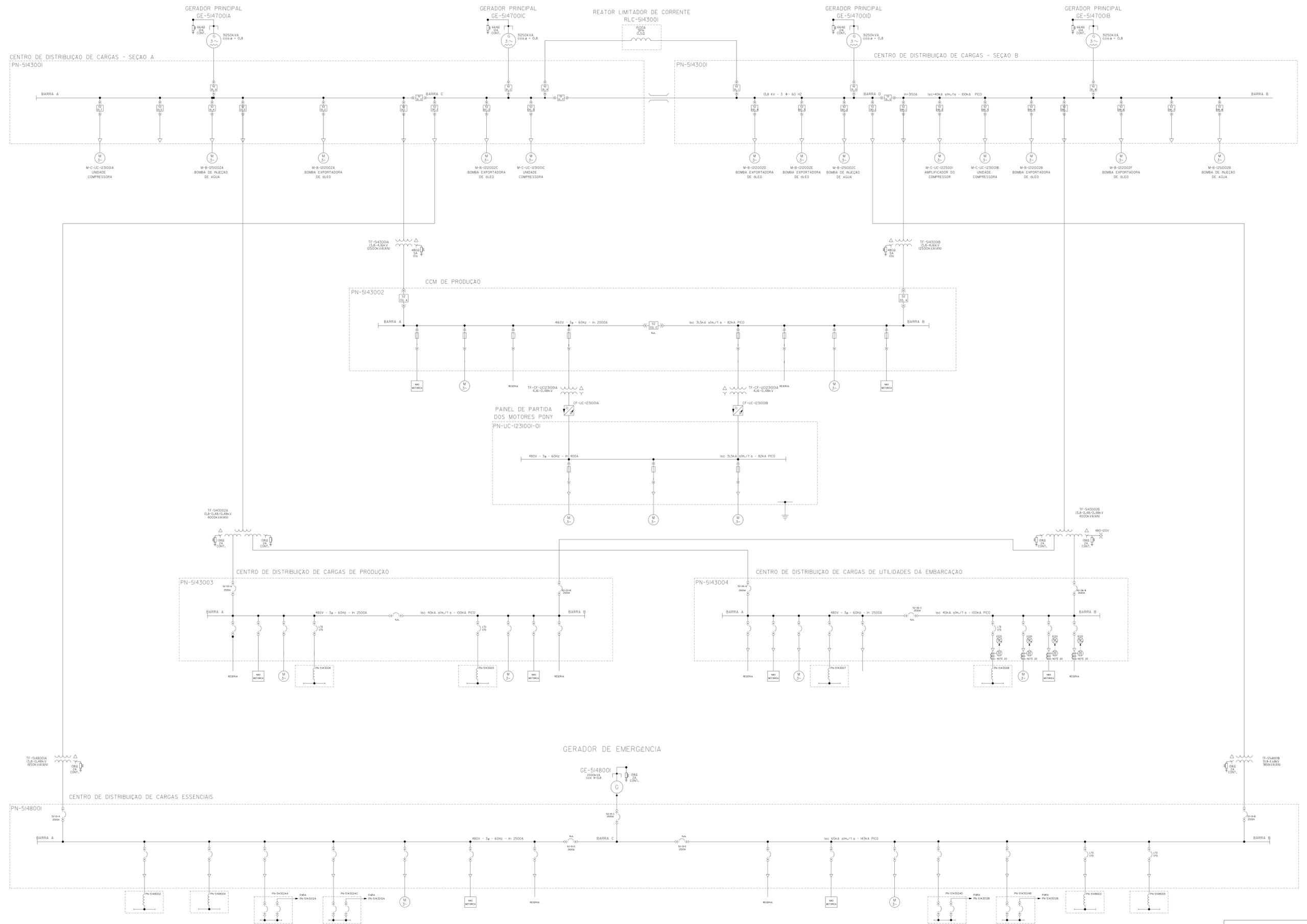
- [1] –Stevenson
- [2] – IEEE Std 142-1991
- [3] – IEEE Std 242-1986
- [4] – Análise de Sistemas de Potência
- [5] – Manual do DIgSILENT
- [6] – Beeman
- [7] – Unifilar montando no DIgSILENT
- [8] – IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 2, March 1994
- [9] – Equipamentos elétricos, Nemésio

ANEXOS

- I – diagrama unifilar
- II- Resultados e unifilares do estudo de curto
- III – idem para Fluxo de pot.

Anexo 1

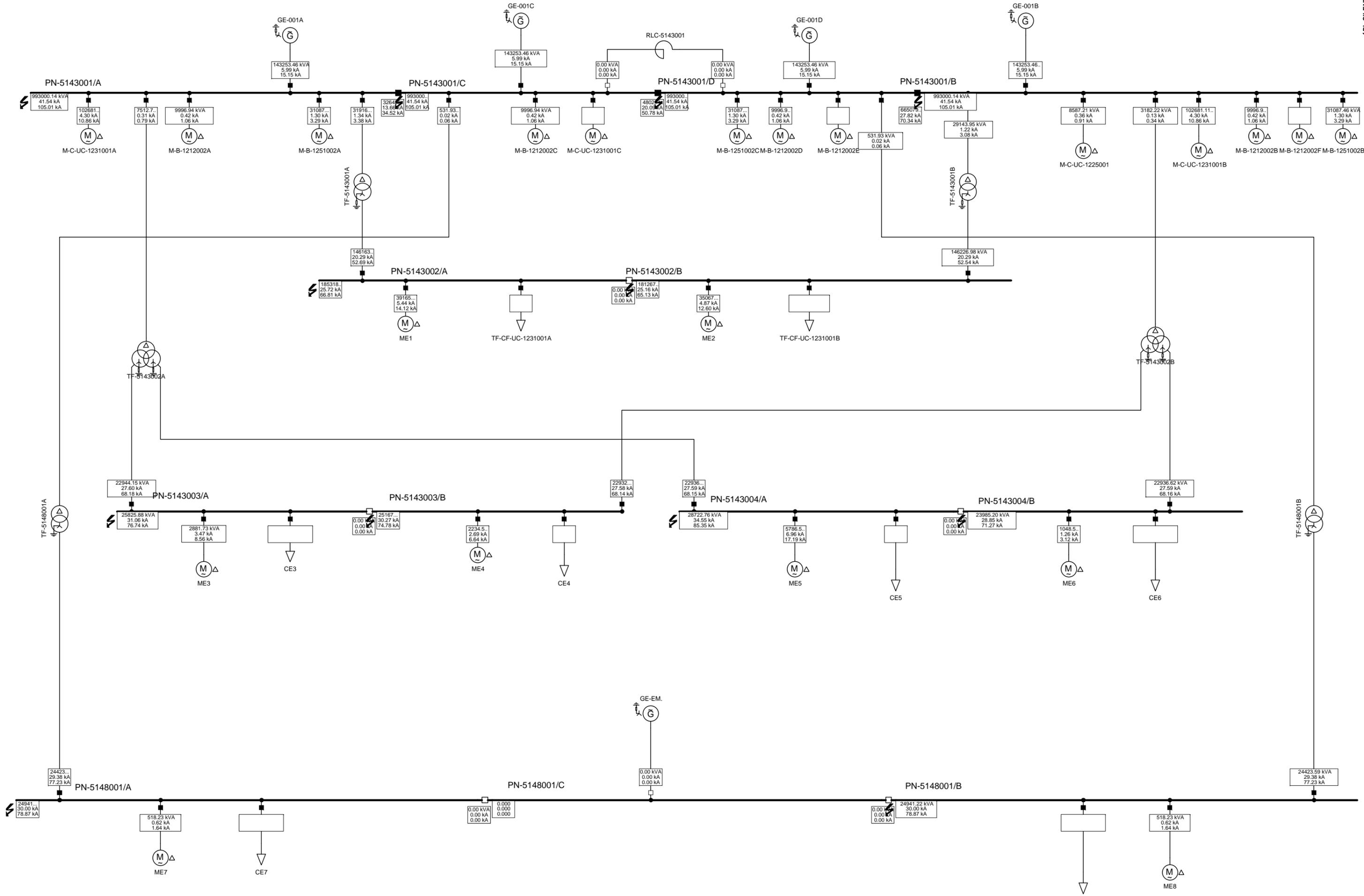
Diagrama Unifilar



UFRJ		ESCOLA POLITÉCNICA
PROJETO	PROJETO FINAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA	
UNIDADE	UNIDADE DE PRODUÇÃO - FPSO	
RESPONSÁVEL	LEANDRO PECANHA ISIDORO	
SCALE	TAB. A0-118x84cm	DATA 27/07/06
		PÁGINA 1 de 1

Anexo 2

Unifilares e saída do *software*
para a simulação de curto-
circuito trifásico

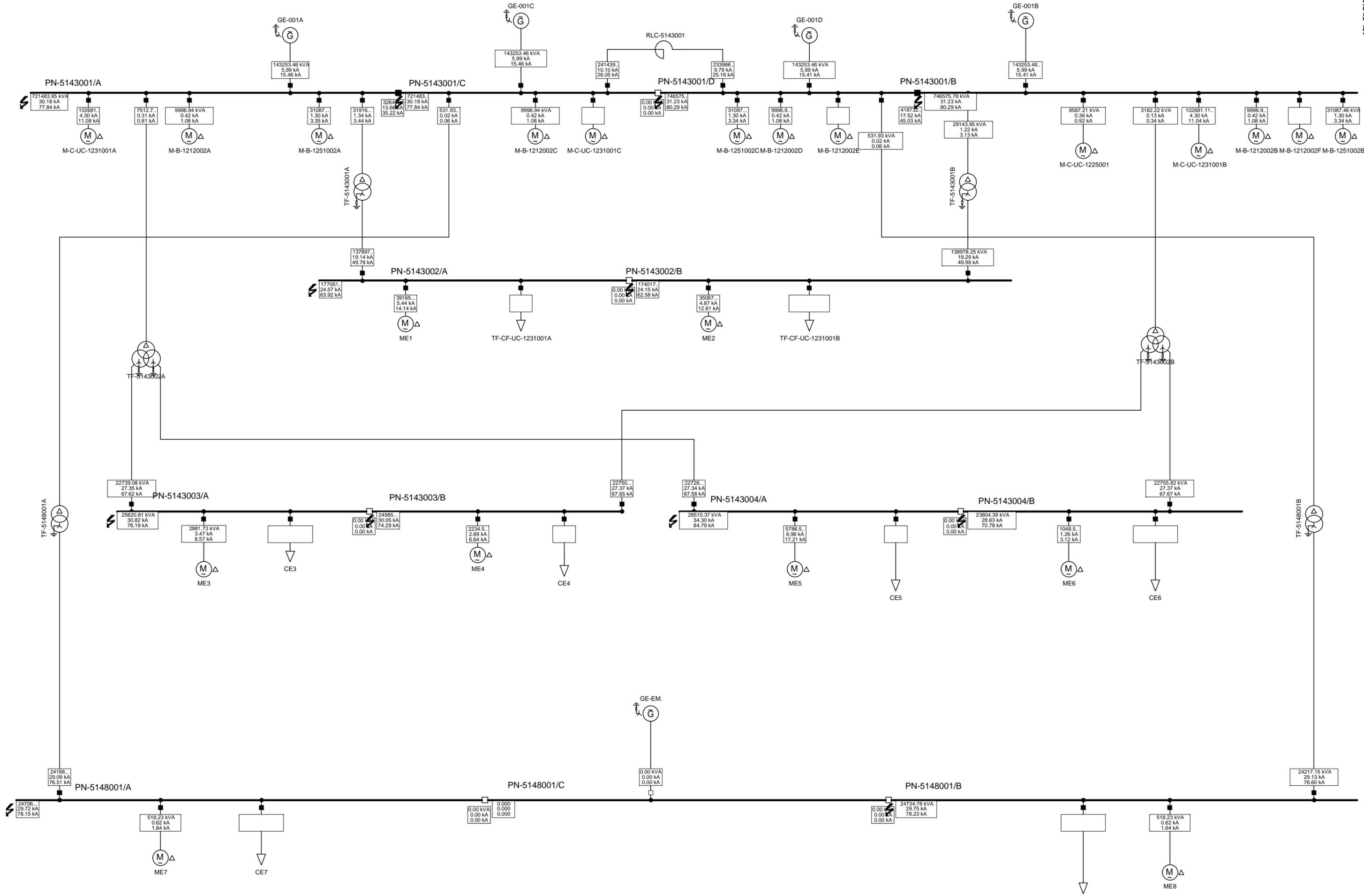


Max. 3-Phase Short-Circuit acc. to IEC	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Power [kVA]	Line-Line Voltage, Magni
Initial Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p.u.]
Peak Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]

UFRJ
DEE
PowerFactory 13.1.257

Projeto Final de Curso
Leandro Peçanha Isidoro
Estudo de Curto-Circuito
Operação de Transferência de Cargas sem RLC

Project: Final
Graphic: Unifilar
Date: 2/24/2006
Annex:

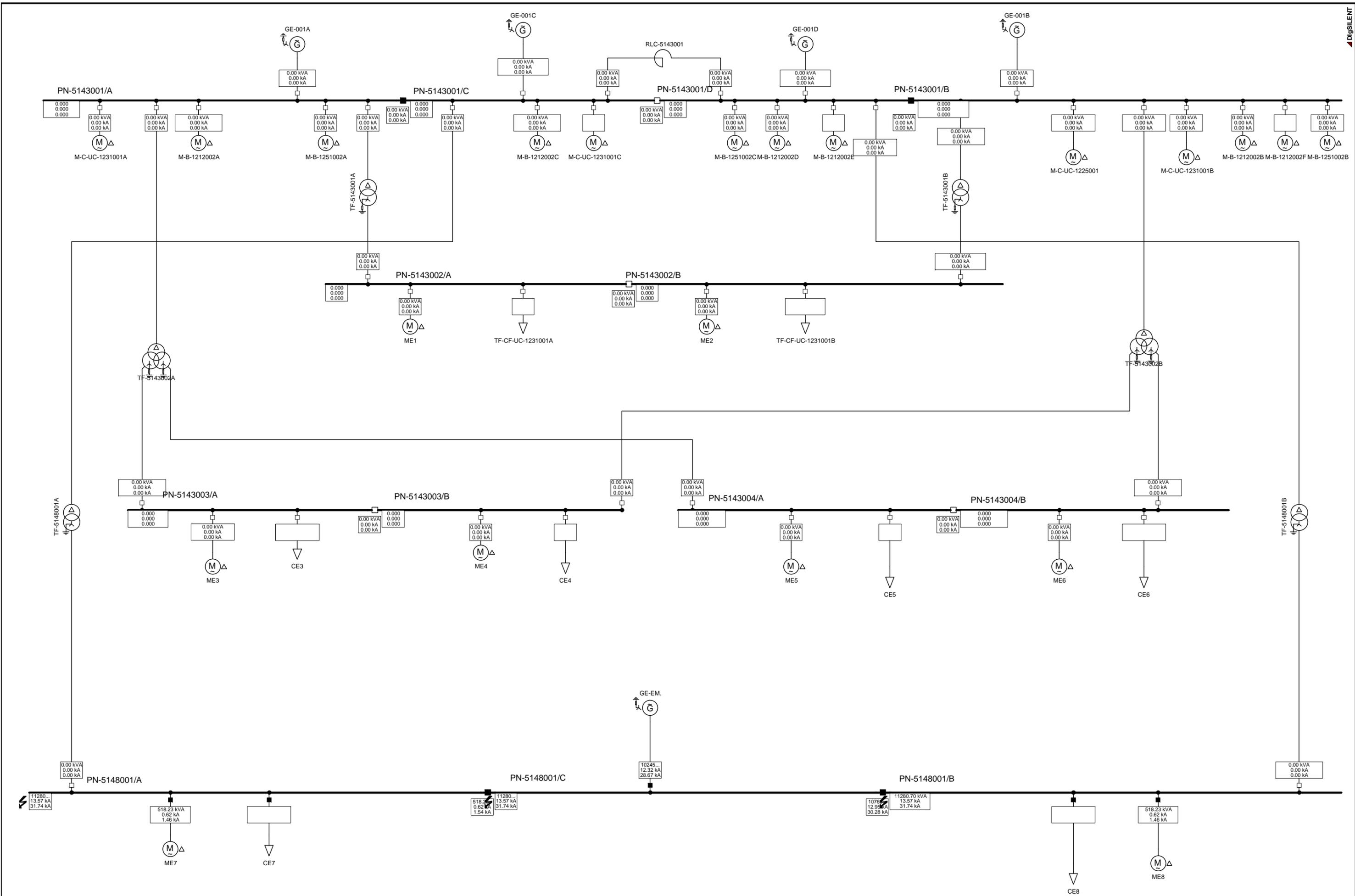


Max. 3-Phase Short-Circuit acc. to IEC	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Power [kVA]	Line-Line Voltage, Magni
Initial Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p.u.]
Peak Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]

UFRJ
DEE
PowerFactory 13.1.257

Projeto Final de Curso
Leandro Peçanha Isidoro
Estudo de Curto-Circuito
Operação de Transferência de Cargas com RLC

Project: Final
Graphic: Unifilar
Date: 2/24/2006
Annex:



Max. 3-Phase Short-Circuit acc. to IEC	
Short Circuit Nodes	Nodes
Initial Short-Circuit Power [kVA]	Line-Line Voltage, Magni
Initial Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Magnitude [p.u.]
Peak Short-Circuit Current [kA]	Voltage, Angle [deg]

UFRJ
DEE
PowerFactory 13.1.257

Projeto Final de Curso
Leandro Peçanha Isidoro
Estudo de Curto-Circuito
Operação de Emergência

Project: Final
Graphic: Unifilar
Date: 2/22/2006
Annex:

Curto-circuito - 3 casos.txt

Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation according to IEC		3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents			
Asynchronous Motors always considered	Grid Identification automatic	Short-Circuit Duration Breaker Time		0.10 s	
Decaying Aperiodic Component Using Method	Conductor Temperature Userdefined	Fault Clearing Time (I _{th})		1.00 s	
B	No	c-Voltage Factor Userdefined		No	

Grid: Unifilar System Stage: Unifilar Annex: / 1

	rtd. V. [kV]	Voltage [kV]	c- Factor	Sk" [kVA/MVA]	I _k " [kA/kA]	I _k " [deg]	I _p [kA/kA]	I _b [kA]	S _b [kVA]	I _k [kA]	I _{th} [kA]
PN-5143001											
A	13.80	0.00	0.00	1.10	993000.14 kVA	41.54 kA	-84.89	105.01 kA	29.21698119.22	23.97	35.30
S5.0					666565.23 kVA	27.89 kA	95.08	70.49 kA			
TF-5143001A					31916.62 kVA	1.34 kA	94.41	3.38 kA			
TF-5143002A					7512.71 kVA	0.31 kA	95.71	0.79 kA			
M-B-1212002A					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.06 kA			
M-B-1251002A					31087.46 kVA	1.30 kA	95.71	3.29 kA			
M-C-UC-1231001A					102681.11 kVA	4.30 kA	95.71	10.86 kA			
GE-001A					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.15 kA			
C	13.80	0.00	0.00	1.10	993000.14 kVA	41.54 kA	-84.89	105.01 kA	29.21698119.22	23.97	35.30
S5.0					326435.17 kVA	13.66 kA	95.17	34.52 kA			
S6.0					512786.15 kVA	21.45 kA	95.15	54.23 kA			
TF-5148001A					531.93 kVA	0.02 kA	95.65	0.06 kA			
M-B-1212002C					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.06 kA			
GE-001C					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.15 kA			
D	13.80	0.00	0.00	1.10	993000.14 kVA	41.54 kA	-84.89	105.01 kA	29.21698119.22	23.97	35.30
S6.0					480214.32 kVA	20.09 kA	95.06	50.78 kA			
S7.0					327922.16 kVA	13.72 kA	95.25	34.68 kA			
TF-5148001B					531.93 kVA	0.02 kA	95.65	0.06 kA			
M-B-1212002D					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.06 kA			
M-B-1251002C					31087.46 kVA	1.30 kA	95.71	3.29 kA			
GE-001D					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.15 kA			
B	13.80	0.00	0.00	1.10	993000.14 kVA	41.54 kA	-84.89	105.01 kA	29.21698119.22	23.97	35.30
S7.0					665079.57 kVA	27.82 kA	95.04	70.34 kA			
TF-5143001B					29143.95 kVA	1.22 kA	95.23	3.08 kA			
TF-5143002B					3182.22 kVA	0.13 kA	95.71	0.34 kA			
M-B-1212002B					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.06 kA			
M-B-1251002B					31087.46 kVA	1.30 kA	95.71	3.29 kA			
M-C-UC-1225001					8587.21 kVA	0.36 kA	95.71	0.91 kA			
M-C-UC-1231001B					102681.11 kVA	4.30 kA	95.71	10.86 kA			
GE-001B					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.15 kA			
PN-5143002											
A	4.16	0.00	0.00	1.10	185318.00 kVA	25.72 kA	-86.46	66.81 kA	23.45168958.67	12.09	20.51
S3.0					0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
TF-5143001A					146163.44 kVA	20.29 kA	93.21	52.69 kA			
ME1					39165.95 kVA	5.44 kA	94.76	14.12 kA			
B	4.16	0.00	0.00	1.10	181267.25 kVA	25.16 kA	-86.31	65.13 kA	23.09166358.88	12.06	20.18
S3.0					0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
TF-5143001B					146226.98 kVA	20.29 kA	93.20	52.54 kA			
ME2					35067.37 kVA	4.87 kA	95.71	12.60 kA			
PN-5143003											
A	0.48	0.00	0.00	1.05	25825.88 kVA	31.06 kA	-84.30	76.74 kA	28.85 23987.60	15.85	25.16
S3.0					0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
TF-5143002A					22944.15 kVA	27.60 kA	95.70	68.18 kA			
ME3					2881.73 kVA	3.47 kA	95.71	8.56 kA			

Curto-circuito - 3 casos.txt

B	0.48	0.00	0.00	1.05	25167.19 kVA	30.27 kA	-84.30	74.78 kA	28.50	23690.75	15.93	24.80
S3.0	A				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143002B	PN-5143001	PN-5143004			22932.66 kVA	27.58 kA	95.70	68.14 kA				

Grid: Unifilar System Stage: Unifilar Annex: / 2

	rtd.V. [kV]	Vol t age [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [kVA/MVA]	I k" [kA/kA]	[deg]	i p [kA/kA]	I b [kA]	Sb [kVA]	I k [kA]	I th [kA]
ME4 PN-5143004					2234.53 kVA	2.69 kA	95.71	6.64 kA				
A	0.48	0.00	0.00	1.05	28722.76 kVA	34.55 kA	-84.30	85.35 kA	30.54	25393.72	15.93	26.95
S3.0	B				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143002A	PN-5143001	PN-5143003			22936.22 kVA	27.59 kA	95.70	68.15 kA				
ME5					5786.54 kVA	6.96 kA	95.71	17.19 kA				
B	0.48	0.00	0.00	1.05	23985.20 kVA	28.85 kA	-84.30	71.27 kA	27.93	23222.26	15.88	24.01
S3.0	A				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143002B	PN-5143001	PN-5143003			22936.62 kVA	27.59 kA	95.70	68.16 kA				
ME6					1048.57 kVA	1.26 kA	95.71	3.12 kA				
PN-5148001												
A	0.48	0.00	0.00	1.05	24941.22 kVA	30.00 kA	-87.02	78.87 kA	29.51	24532.79	16.96	25.66
S4.0	C				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5148001A	PN-5143001				24423.59 kVA	29.38 kA	92.92	77.23 kA				
ME7					518.23 kVA	0.62 kA	95.71	1.64 kA				
B	0.48	0.00	0.00	1.05	24941.22 kVA	30.00 kA	-87.02	78.87 kA	29.51	24532.79	16.96	25.66
S5.0	C				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5148001B	PN-5143001				24423.59 kVA	29.38 kA	92.92	77.23 kA				
ME8					518.23 kVA	0.62 kA	95.71	1.64 kA				

DI gSI LENT
PowerFactory
13.1.257
Project:
Date: 1/25/2006

Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation according to IEC 3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents

Asynchronous Motors always considered	Grid Identification automatic	Short-Circuit Duration Breaker Time	0.10 s
Decaying Aperiodic Component Using Method	Conductor Temperature Userdefined	Fault Clearing Time (Ith)	1.00 s
B	No	c-Voltage Factor Userdefined	No

Grid: Unifilar System Stage: Unifilar Annex: / 1

	rtd.V. [kV]	Vol t age [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [kVA/MVA]	I k" [kA/kA]	[deg]	i p [kA/kA]	I b [kA]	Sb [kVA]	I k [kA]	I th [kA]
PN-5143001												
A	13.80	0.00	0.00	1.10	721483.95 kVA	30.18 kA	-85.82	77.84 kA	23.72566898.70		17.63	25.89
S5.0	C				395137.82 kVA	16.53 kA	93.36	42.63 kA				
TF-5143001A	PN-5143002				31916.62 kVA	1.34 kA	94.41	3.44 kA				
TF-5143002A	PN-5143004	PN-5143003			7512.71 kVA	0.31 kA	95.71	0.81 kA				
M-B-1212002A					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.08 kA				
M-B-1251002A					31087.46 kVA	1.30 kA	95.71	3.35 kA				
M-C-UC-1231001A					102681.11 kVA	4.30 kA	95.71	11.08 kA				
GE-001A					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.46 kA				
C	13.80	0.00	0.00	1.10	721483.95 kVA	30.18 kA	-85.82	77.84 kA	23.72566898.70		17.63	25.89

Curto-circuito - 3 casos.txt

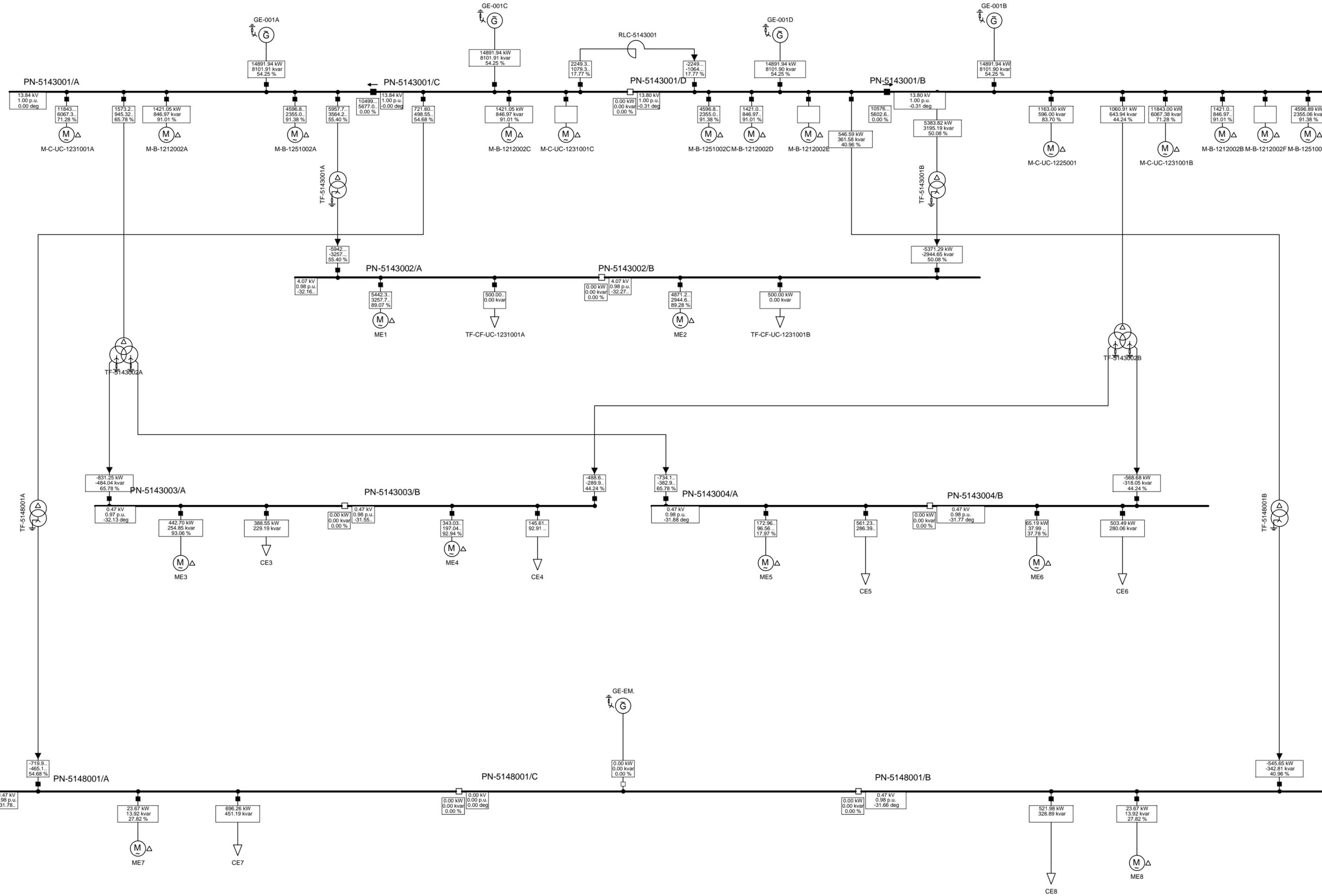
S5.0	A				326435.17 kVA	13.66 kA	95.17	35.22 kA				
S6.0	D				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
RLC-5143001	PN-5143001				241439.52 kVA	10.10 kA	92.42	26.05 kA				
TF-5148001A	PN-5148001				531.93 kVA	0.02 kA	95.65	0.06 kA				
M-B-1212002C					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.08 kA				
GE-001C					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.46 kA				
D		13.80	0.00	0.00	1.10	746575.78 kVA	31.23 kA	-85.69	80.29 kA	24.13576797.67	17.82	26.56
S6.0	C				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
S7.0	B				327922.16 kVA	13.72 kA	95.25	35.26 kA				
RLC-5143001	PN-5143001				233966.89 kVA	9.79 kA	92.46	25.16 kA				
TF-5148001B	PN-5148001				531.93 kVA	0.02 kA	95.65	0.06 kA				
M-B-1212002D					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.08 kA				
M-B-1251002C					31087.46 kVA	1.30 kA	95.71	3.34 kA				
GE-001D					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.41 kA				
B		13.80	0.00	0.00	1.10	746575.78 kVA	31.23 kA	-85.69	80.29 kA	24.13576797.67	17.82	26.56
S7.0	D				418732.86 kVA	17.52 kA	93.57	45.03 kA				
TF-5143001B	PN-5143002				29143.95 kVA	1.22 kA	95.23	3.13 kA				
TF-5143002B	PN-5143003				PN-5143004	3182.22 kVA	0.13 kA	95.71	0.34 kA			
M-B-1212002B					9996.94 kVA	0.42 kA	95.71	1.08 kA				
M-B-1251002B					31087.46 kVA	1.30 kA	95.71	3.34 kA				
M-C-UC-1225001					8587.21 kVA	0.36 kA	95.71	0.92 kA				
M-C-UC-1231001B					102681.11 kVA	4.30 kA	95.71	11.04 kA				
GE-001B					143253.46 kVA	5.99 kA	-85.24	15.41 kA				
PN-5143002												
A		4.16	0.00	0.00	1.10	177051.36 kVA	24.57 kA	-86.51	63.92 kA	22.30160694.15	11.69	19.69
S3.0	B				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143001A	PN-5143001				137897.91 kVA	19.14 kA	93.12	49.78 kA				
ME1					39165.95 kVA	5.44 kA	94.76	14.14 kA				
B		4.16	0.00	0.00	1.10	174017.35 kVA	24.15 kA	-86.35	62.58 kA	22.08159110.82	11.45	19.30
S3.0	A				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143001B	PN-5143001				138978.25 kVA	19.29 kA	93.14	49.98 kA				
ME2					35067.37 kVA	4.87 kA	95.71	12.61 kA				
PN-5143003												
A		0.48	0.00	0.00	1.05	25620.81 kVA	30.82 kA	-84.33	76.19 kA	28.61 23782.65	15.91	25.07
S3.0	B				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143002A	PN-5143001				PN-5143004	22739.08 kVA	27.35 kA	95.66	67.62 kA			
ME3					2881.73 kVA	3.47 kA	95.71	8.57 kA				
B		0.48	0.00	0.00	1.05	24985.38 kVA	30.05 kA	-84.33	74.29 kA	28.28 23509.02	15.63	24.52

Grid: Uni fil ar | System Stage: Uni fil ar | Annex: / 2

	rtd. V. [kV]	Vol tage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [kVA/MVA]	I k" [kA/kA]	[deg]	i p [kA/kA]	I b [kA]	S b [kVA]	I k [kA]	I th [kA]
S3.0	A				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143002B	PN-5143001				PN-5143004	22750.85 kVA	27.37 kA	95.67	67.65 kA			
ME4					2234.53 kVA	2.69 kA	95.71	6.64 kA				
PN-5143004												
A		0.48	0.00	0.00	1.05	28515.37 kVA	34.30 kA	-84.33	84.79 kA	30.29 25186.54	16.00	26.88
S3.0	B				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143002A	PN-5143001				PN-5143003	22728.83 kVA	27.34 kA	95.66	67.58 kA			
ME5					5786.54 kVA	6.96 kA	95.71	17.21 kA				
B		0.48	0.00	0.00	1.05	23804.39 kVA	28.63 kA	-84.33	70.78 kA	27.71 23041.50	15.59	23.74
S3.0	A				0.00 kVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
TF-5143002B	PN-5143001				PN-5143003	22755.82 kVA	27.37 kA	95.67	67.67 kA			
ME6					1048.57 kVA	1.26 kA	95.71	3.12 kA				
PN-5148001												
A		0.48	0.00	0.00	1.05	24706.11 kVA	29.72 kA	-87.03	78.15 kA	29.23 24297.70	17.00	25.53

Anexo 3

Unifilares e saída do *software*
para a simulação de fluxo de
potência

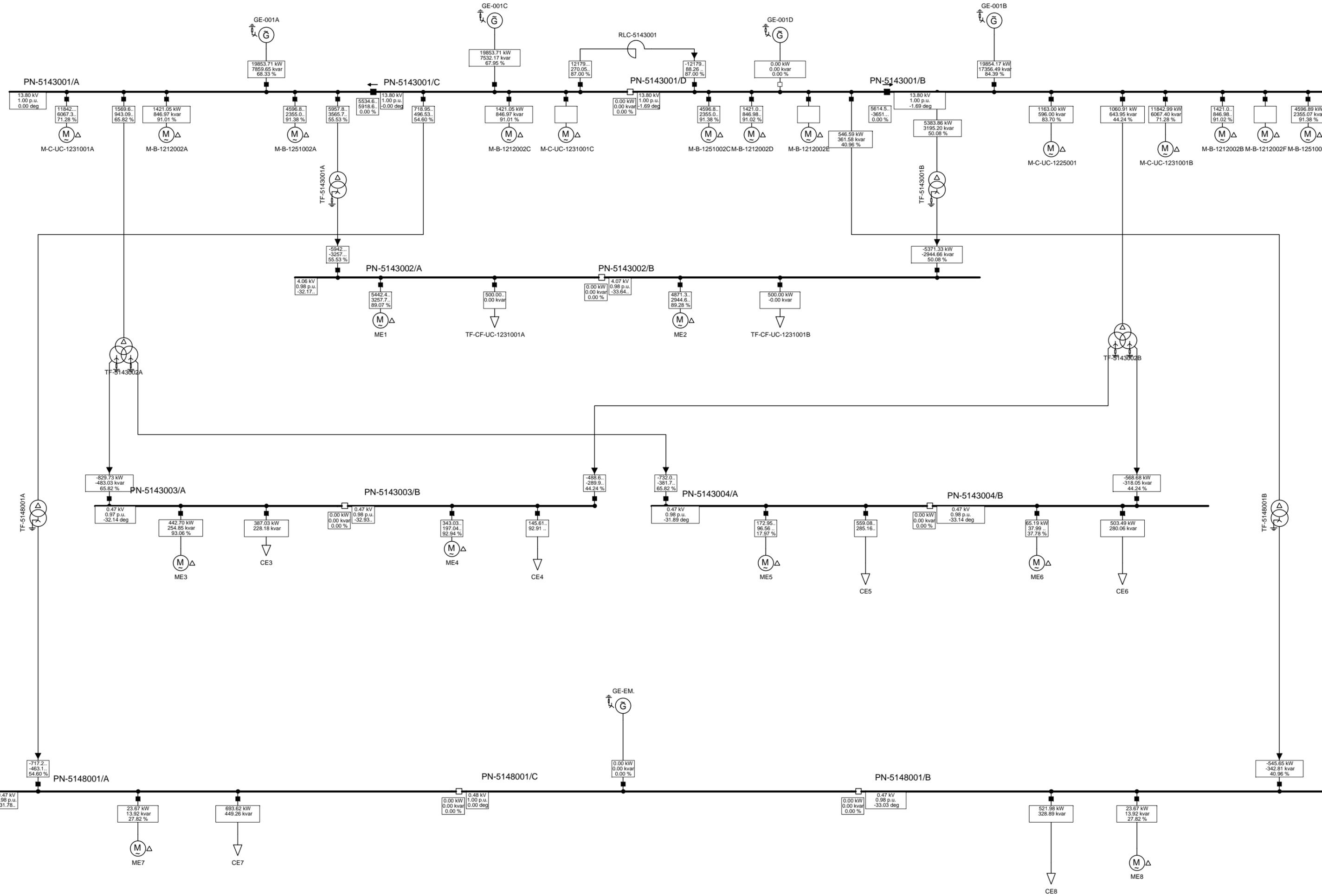


Load Flow Balanced	
Nodes	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [kW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [kvar]
Voltage, Angle [deg]	Loading [%]

UFRJ
DEE
PowerFactory 13.1.257

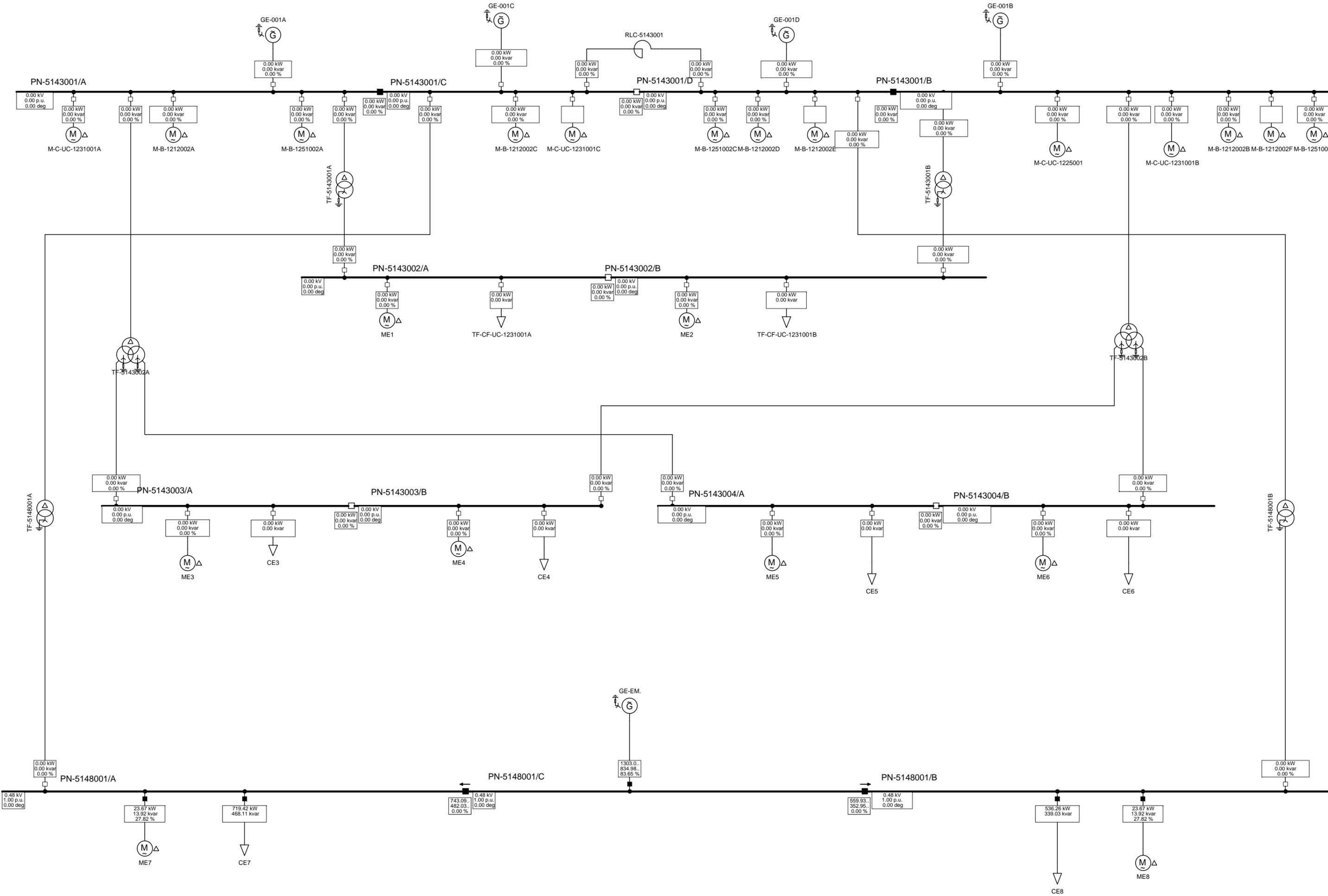
Projeto Final de Curso
Leandro Peçanha Isidoro
Estudo de Fluxo de Potência
4 geradores conectados ao sistema

Project: Final
Graphic: Unifilar
Date: 2/21/2006
Annex:



Load Flow Balanced	
Nodes	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [kW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [kvar]
Voltage, Angle [deg]	Loading [%]

UFRJ DEE PowerFactory 13.1.257	Projeto Final de Curso	Project: Final
	Leandro Peçanha Isidoro Estudo de Fluxo de Potência 3 geradores conectados ao sistema	Graphic: Unifilar
		Date: 2/22/2006
		Annex:



Load Flow Balanced	
Nodes	Branches
Line-Line Voltage, Magnitude [kV]	Active Power [kW]
Voltage, Magnitude [p.u.]	Reactive Power [kvar]
Voltage, Angle [deg]	Loading [%]

UFRJ
DEE
PowerFactory 13.1.257

Projeto Final de Curso
Leandro Peçanha Isidoro
Estudo de Fluxo de Potência
Geração de Emergência

Project: Final
Graphic: Unifilar
Date: 2/21/2006
Annex:

Load flow - 4 geradores.txt

	DIGSI LENT PowerFactory 13.1.257	Project: Date: 2/21/2006
--	--	-----------------------------

Load Flow Calculation		Busbars/Terminals	
Balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergency	Yes
Automatic Tap Adjust of Transformers	No	Max. Acceptable Load Flow Error for	
Consider Reactive Power Limits	No	Nodes	1.00 kVA
		Model Equations	0.10 %

Grid: Unifilar	System Stage: Unifilar	Study Case: Study Case	Annex: / 1
----------------	------------------------	------------------------	------------

	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	Bus-voltage [kV]	Angle [deg]	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data
PN-5143001										
A	13.80	1.00	13.84	0.00						
S5.0 /Switch					-10499.97	-5677.09	-0.88	0.50		Tie-Breaker
Cub_0.5/Asm					1421.05	846.97	0.86	0.07	91.01	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.6/Asm					4596.89	2355.06	0.89	0.22	91.38	Slip: 0.82 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.3/Asm					11843.00	6067.38	0.89	0.56	71.28	Slip: 0.64 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.5/Sym					14891.94	8101.91	0.88	0.71	54.25	Typ: PV
Cub_0.2/Tr2					5957.71	3564.27	0.86	0.29	55.40	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
Cub_0.3/Tr3					1573.27	945.32	0.86	0.08	65.78	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
Total										
Motor Load:					17860.94	9269.41				
C	13.80	1.00	13.84	-0.00						
S5.0 /Switch					10499.97	5677.09	0.88	0.50		Tie-Breaker
S6.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
Cub_1.2/Asm					1421.05	846.97	0.86	0.07	91.01	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p.u.
Cub_1.3/Asm										Slip: xm:
Cub_1.4/Sym					14891.94	8101.91	0.88	0.71	54.25	Typ: PV
Cub_1.4/Sind					2249.33	1079.30	0.90	0.10	17.77	X: 0.46 Ohm R: 0.00 Ohm
Cub_1.1/Tr2					721.60	498.55	0.82	0.04	54.68	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
D	13.80	1.00	13.80	-0.31						
S6.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S7.0 /Switch					10576.73	5602.64	0.88	0.50		Tie-Breaker
Cub_2.2/Asm					1421.05	846.97	0.86	0.07	91.01	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p.u.
Cub_2.3/Asm										Slip: xm:
Cub_2.4/Asm					4596.89	2355.06	0.89	0.22	91.38	Slip: 0.82 % xm: 4.00 p.u.
Cub_2.5/Sym					14891.94	8101.90	0.88	0.71	54.25	Typ: PV
Cub_2.5/Sind					-2249.33	-1064.35	-0.90	0.10	17.77	X: 0.46 Ohm R: 0.00 Ohm
Cub_2.1/Tr2					546.59	361.58	0.83	0.03	40.96	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
Total										
Motor Load:					6017.94	3202.03				

Grid: Unifilar	System Stage: Unifilar	Study Case: Study Case	Annex: / 2
----------------	------------------------	------------------------	------------

	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	Bus-voltage [kV]	Angle [deg]	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data
B										
S7.0 /Switch	13.80	1.00	13.80	-0.31						
Cub_3.5/Asm					-10576.73	-5602.64	-0.88	0.50		Tie-Breaker
Cub_3.6/Asm					1421.05	846.97	0.86	0.07	91.01	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p.u.
Cub_3.7/Asm										Slip: xm:
Cub_3.4/Asm					4596.89	2355.06	0.89	0.22	91.38	Slip: 0.82 % xm: 4.00 p.u.
Cub_3.3/Asm					1163.00	596.00	0.89	0.05	83.70	Slip: 0.75 % xm: 4.00 p.u.
Cub_3.7/Sym					11843.00	6067.38	0.89	0.56	71.28	Slip: 0.64 % xm: 4.00 p.u.
Cub_3.1/Tr2					14891.94	8101.90	0.88	0.71	54.25	Typ: PV
Cub_3.2/Tr3					5383.82	3195.19	0.86	0.26	50.08	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
Total					1060.91	643.94	0.85	0.05	44.24	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0

Load flow - 4 geradores.txt

		Total Motor	Load:	-----	-----					
				19023.94	9865.41					
B0.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S9.0	/Switch									
B1.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S9.0	/Switch									
S10.0	/Switch									Tie-Breaker
B2.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S10.0	/Switch									
S11.0	/Switch									Tie-Breaker
B3.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S11.0	/Switch									
S12.0	/Switch									Tie-Breaker
B4.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S12.0	/Switch									
S13.0	/Switch									Tie-Breaker
B5.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S13.0	/Switch									
S14.0	/Switch									Tie-Breaker
B6.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S14.0	/Switch									
S15.0	/Switch									Tie-Breaker
B7.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S15.0	/Switch									

Grid: Unifilar System Stage: Unifilar Study Case: Study Case Annex: / 3

	rated Vol tage [kV]	Bus-vol tage [p. u.] [kV]		Acti ve Power [kW]	Reacti ve Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loadi ng [%]		Ad di ti on al Data
PN-5143002										
A	4.16	0.98	4.07	-32.16						
S3.0	/Switch									Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME1			5442.38	3257.78	0.86	0.90	89.07	Slip: 0.81 %	xm: 4.00 p. u.
Cub_0.2/Lod	TF-CF-UC-1231001A			500.00	0.00	1.00	0.07		PI0: 500.00 kW	QI0: 0.00 kvar
Cub_0.0/Tr2	TF-5143001A			-5942.38	-3257.78	-0.88	0.96	55.40	Tap: 0.00	Min: 0 Max: 0
B	4.16	0.98	4.07	-32.27						
S3.0	/Switch									Tie-Breaker
Cub_1.1/Asm	ME2			4871.29	2944.65	0.86	0.81	89.28	Slip: 0.81 %	xm: 4.00 p. u.
Cub_1.2/Lod	TF-CF-UC-1231001B			500.00	0.00	1.00	0.07		PI0: 500.00 kW	QI0: 0.00 kvar
Cub_1.0/Tr2	TF-5143001B			-5371.29	-2944.65	-0.88	0.87	50.08	Tap: 0.00	Min: 0 Max: 0
PN-5143003										
A	0.48	0.97	0.47	-32.13						
S3.0	/Switch									Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME3			442.70	254.85	0.87	0.63	93.06	Slip: 0.86 %	xm: 4.00 p. u.
Cub_0.2/Lod	CE3			388.55	229.19	0.86	0.56		PI0: 404.69 kW	QI0: 239.93 kvar
Cub_0.0/Tr3	TF-5143002A			-831.25	-484.04	-0.86	1.19	65.78	Tap: 0.00	Min: 0 Max: 0
B	0.48	0.98	0.47	-31.55						
S3.0	/Switch									Tie-Breaker
Cub_1.1/Asm	ME4			343.03	197.04	0.87	0.48	92.94	Slip: 0.84 %	xm: 4.00 p. u.
Cub_1.2/Lod	CE4			145.61	92.91	0.84	0.21		PI0: 149.47 kW	QI0: 95.69 kvar
Cub_1.0/Tr3	TF-5143002B			-488.64	-289.95	-0.86	0.69	44.24	Tap: 0.00	Min: 0 Max: 0
PN-5143004										
A	0.48	0.98	0.47	-31.88						
S3.0	/Switch									Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME5			172.96	96.56	0.87	0.24	17.97	Slip: 0.16 %	xm: 4.00 p. u.
Cub_0.2/Lod	CE5			561.23	286.39	0.89	0.77		PI0: 579.26 kW	QI0: 296.76 kvar
Cub_0.0/Tr3	TF-5143002A			-734.19	-382.95	-0.89	1.02	65.78	Tap: 0.00	Min: 0 Max: 0
B	0.48	0.98	0.47	-31.77						
S3.0	/Switch									Tie-Breaker
Cub_1.1/Asm	ME6			65.19	37.99	0.86	0.09	37.78	Slip: 0.34 %	xm: 4.00 p. u.
Cub_1.2/Lod	CE6			503.49	280.06	0.87	0.71		PI0: 518.38 kW	QI0: 289.40 kvar
Cub_1.0/Tr3	TF-5143002B			-568.68	-318.05	-0.87	0.80	44.24	Tap: 0.00	Min: 0 Max: 0

Grid: Uni fil ar										System Stage: Uni fil ar			Study Case: Study Case			Annex: / 4		
	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p. u.]	Bus-voltage [kV]	[deg]	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data								
PN-5148001																		
A	0.48	0.98	0.47	-31.78														
S4.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker								
Cub_0.1/Asm		ME7			23.67	13.92	0.86	0.03	27.82	Slip:	0.25 %	xm:	4.00 p. u.					
Cub_0.2/Lod		CE7			696.26	451.19	0.84	1.02		PI0:	719.42 kW	QI0:	468.11 kvar					
Cub_0.0/Tr2		TF-5148001A			-719.93	-465.11	-0.84	1.05	54.68	Tap:	0.00	Min:	0	Max: 0				
C	0.48	0.00	0.00	0.00														
S4.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker								
S5.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker								
B	0.48	0.98	0.47	-31.66														
S5.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker								
Cub_2.2/Asm		ME8			23.67	13.92	0.86	0.03	27.82	Slip:	0.25 %	xm:	4.00 p. u.					
Cub_2.1/Lod		CE8			521.98	328.89	0.85	0.75		PI0:	536.26 kW	QI0:	339.03 kvar					
Cub_2.0/Tr2		TF-5148001B			-545.65	-342.81	-0.85	0.79	40.96	Tap:	0.00	Min:	0	Max: 0				

Load flow - 3 geradores.txt

	DIGSI LENT PowerFactory 13.1.257	Project: Date: 2/22/2006
--	--	-----------------------------

Load Flow Calculation		Busbars/Terminals	
Balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergency	Yes
Automatic Tap Adjust of Transformers	No	Max. Acceptable Load Flow Error for Nodes	1.00 kVA
Consider Reactive Power Limits	No	Model Equations	0.10 %

Grid: Uni fil ar	System Stage: Uni fil ar	Study Case: Study Case	Annex: / 1
------------------	--------------------------	------------------------	------------

rated Vol tage [kV]	Bus-vol tage [p. u.]	Bus-vol tage [kV]	[deg]	Acti ve Power [kW]	Reacti ve Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loadi ng [%]	Additional Data
PN-5143001									
A	13.80	1.00	13.80	0.00					
S5.0 /Switch				-5534.63	-5918.62	-0.68	0.34		Tie-Breaker
Cub_0.5/Asm		M-B-1212002A		1421.05	846.97	0.86	0.07	91.01	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p. u.
Cub_0.6/Asm		M-B-1251002A		4596.88	2355.06	0.89	0.22	91.38	Slip: 0.82 % xm: 4.00 p. u.
Cub_0.3/Asm		M-C-UC-1231001A		11842.98	6067.37	0.89	0.56	71.28	Slip: 0.64 % xm: 4.00 p. u.
Cub_0.5/Sym		GE-001A		19853.71	7859.65	0.93	0.89	68.33	Typ: PV
Cub_0.2/Tr2		TF-5143001A		5957.82	3565.78	0.86	0.29	55.53	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
Cub_0.3/Tr3		TF-5143002A		1569.60	943.09	0.86	0.08	65.82	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
		Total							
		Motor Load:		17860.91	9269.40				
C	13.80	1.00	13.80	-0.00					
S5.0 /Switch				5534.63	5918.62	0.68	0.34		Tie-Breaker
S6.0 /Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
Cub_1.2/Asm		M-B-1212002C		1421.05	846.97	0.86	0.07	91.01	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p. u.
Cub_1.3/Asm		M-C-UC-1231001C							Slip: xm:
Cub_1.4/Sym		GE-001C		19853.71	7532.17	0.93	0.89	67.95	Typ: PV
Cub_1.4/Sind		RLC-5143001		12179.08	270.05	1.00	0.51	87.00	X: 0.46 Ohm R: 0.00 Ohm
Cub_1.1/Tr2		TF-5148001A		718.95	496.53	0.82	0.04	54.60	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
D	13.80	1.00	13.80	-1.69					
S6.0 /Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S7.0 /Switch				5614.54	-3651.89	0.84	0.28		Tie-Breaker
Cub_2.2/Asm		M-B-1212002D		1421.05	846.98	0.86	0.07	91.02	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p. u.
Cub_2.3/Asm		M-B-1212002E							Slip: xm:
Cub_2.4/Asm		M-B-1251002C		4596.89	2355.07	0.89	0.22	91.38	Slip: 0.82 % xm: 4.00 p. u.
Cub_2.5/Sind		RLC-5143001		-12179.08	88.26	-1.00	0.51	87.00	X: 0.46 Ohm R: 0.00 Ohm
Cub_2.1/Tr2		TF-5148001B		546.59	361.58	0.83	0.03	40.96	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
		Total							
		Motor Load:		6017.94	3202.05				
B	13.80	1.00	13.80	-1.69					

Grid: Uni fil ar	System Stage: Uni fil ar	Study Case: Study Case	Annex: / 2
------------------	--------------------------	------------------------	------------

rated Vol tage [kV]	Bus-vol tage [p. u.]	Bus-vol tage [kV]	[deg]	Acti ve Power [kW]	Reacti ve Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loadi ng [%]	Additional Data
S7.0 /Switch				-5614.54	3651.89	-0.84	0.28		Tie-Breaker
Cub_3.5/Asm		M-B-1212002B		1421.05	846.98	0.86	0.07	91.02	Slip: 0.79 % xm: 4.00 p. u.
Cub_3.6/Asm		M-B-1212002F							Slip: xm:
Cub_3.7/Asm		M-B-1251002B		4596.89	2355.07	0.89	0.22	91.38	Slip: 0.82 % xm: 4.00 p. u.
Cub_3.4/Asm		M-C-UC-1225001		1163.00	596.00	0.89	0.05	83.70	Slip: 0.75 % xm: 4.00 p. u.
Cub_3.3/Asm		M-C-UC-1231001B		11842.99	6067.40	0.89	0.56	71.28	Slip: 0.64 % xm: 4.00 p. u.
Cub_3.7/Sym		GE-001B		19854.17	17356.49	0.75	1.10	84.39	Typ: PV
Cub_3.1/Tr2		TF-5143001B		5383.86	3195.20	0.86	0.26	50.08	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
Cub_3.2/Tr3		TF-5143002B		1060.91	643.95	0.85	0.05	44.24	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
		Total							

		Motor Load:		19023.94	9865.46				
B0.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S9.0	/Switch								
B1.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S9.0	/Switch								
S10.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
B2.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S10.0	/Switch								
S11.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
B3.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S11.0	/Switch								
S12.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
B4.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S12.0	/Switch								
S13.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
B5.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S13.0	/Switch								
S14.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
B6.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S14.0	/Switch								
S15.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
B7.0	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
S15.0	/Switch								

Grid: Unifilar System Stage: Unifilar Study Case: Study Case Annex: / 3

rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	Bus-voltage [kV]	[deg]	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data
PN-5143002									
A	4.16	0.98	4.06	-32.17					
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME1			5442.42	3257.75	0.86	0.90	89.07	Slip: 0.81 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.2/Lod	TF-CF-UC-1231001A			500.00	0.00	1.00	0.07		PI0: 500.00 kW QI0: 0.00 kvar
Cub_0.0/Tr2	TF-5143001A			-5942.42	-3257.75	-0.88	0.96	55.53	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
B	4.16	0.98	4.07	-33.64					
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
Cub_1.1/Asm	ME2			4871.33	2944.66	0.86	0.81	89.28	Slip: 0.81 % xm: 4.00 p.u.
Cub_1.2/Lod	TF-CF-UC-1231001B			500.00	-0.00	1.00	0.07		PI0: 500.00 kW QI0: 0.00 kvar
Cub_1.0/Tr2	TF-5143001B			-5371.33	-2944.66	-0.88	0.87	50.08	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
PN-5143003									
A	0.48	0.97	0.47	-32.14					
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME3			442.70	254.85	0.87	0.63	93.06	Slip: 0.86 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.2/Lod	CE3			387.03	228.18	0.86	0.56		PI0: 404.69 kW QI0: 239.93 kvar
Cub_0.0/Tr3	TF-5143002A			-829.73	-483.03	-0.86	1.19	65.82	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
B	0.48	0.98	0.47	-32.93					
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
Cub_1.1/Asm	ME4			343.03	197.04	0.87	0.48	92.94	Slip: 0.84 % xm: 4.00 p.u.
Cub_1.2/Lod	CE4			145.61	92.91	0.84	0.21		PI0: 149.47 kW QI0: 95.69 kvar
Cub_1.0/Tr3	TF-5143002B			-488.64	-289.95	-0.86	0.69	44.24	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
PN-5143004									
A	0.48	0.98	0.47	-31.89					
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME5			172.95	96.56	0.87	0.24	17.97	Slip: 0.16 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.2/Lod	CE5			559.08	285.16	0.89	0.77		PI0: 579.26 kW QI0: 296.76 kvar
Cub_0.0/Tr3	TF-5143002A			-732.03	-381.72	-0.89	1.02	65.82	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
B	0.48	0.98	0.47	-33.14					
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00	Tie-Breaker
Cub_1.1/Asm	ME6			65.19	37.99	0.86	0.09	37.78	Slip: 0.34 % xm: 4.00 p.u.
Cub_1.2/Lod	CE6			503.49	280.06	0.87	0.71		PI0: 518.38 kW QI0: 289.40 kvar
Cub_1.0/Tr3	TF-5143002B			-568.68	-318.05	-0.87	0.80	44.24	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0

Load flow - 3 geradores.txt

Grid: Uni fil ar		System Stage: Uni fil ar			Study Case: Study Case				Annex: / 4	
rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p. u.] [kV]	deg	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data		
PN-5148001										
A	0.48	0.98	0.47	-31.78						
S4.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME7				23.67	13.92	0.86	0.03	27.82	Slip: 0.25 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.2/Lod	CE7				693.62	449.26	0.84	1.02		PI 0: 719.42 kW QI 0: 468.11 kvar
Cub_0.0/Tr2	TF-5148001A				-717.28	-463.18	-0.84	1.05	54.60	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0
C	0.48	1.00	0.48	0.00						
S4.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S5.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
Cub_1.0/Sym	GE-EM.				0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	Typ: PQ
B	0.48	0.98	0.47	-33.03						
S5.0 /Switch					0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
Cub_2.2/Asm	ME8				23.67	13.92	0.86	0.03	27.82	Slip: 0.25 % xm: 4.00 p.u.
Cub_2.1/Lod	CE8				521.98	328.89	0.85	0.75		PI 0: 536.26 kW QI 0: 339.03 kvar
Cub_2.0/Tr2	TF-5148001B				-545.65	-342.81	-0.85	0.79	40.96	Tap: 0.00 Min: 0 Max: 0

Load flow - emergencia.txt

	DIGSI LENT PowerFactory 13.1.257	Project: Date: 2/21/2006
--	--	-----------------------------

Load Flow Calculation	Busbars/Terminals		
Balanced, positive sequence		Automatic Model Adaptation for Convergency	Yes
Automatic Tap Adjust of Transformers	No	Max. Acceptable Load Flow Error for	
Consider Reactive Power Limits	No	Nodes	1.00 kVA
		Model Equations	0.10 %

Grid: Unifilar	System Stage: Unifilar	Study Case: Study Case	Annex: / 1
----------------	------------------------	------------------------	------------

	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	Bus-voltage [kV]	deg	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data
PN-5143001										
A	13.80	0.00	0.00	0.00						
S5.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
C	13.80	0.00	0.00	0.00						
S5.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S6.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
D	13.80	0.00	0.00	0.00						
S6.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S7.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B	13.80	0.00	0.00	0.00						
S7.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B0.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S9.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B1.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S9.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S10.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B2.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S10.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S11.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B3.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S11.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S12.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B4.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S12.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S13.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B5.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S13.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
S14.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B6.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S14.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker

Grid: Unifilar	System Stage: Unifilar	Study Case: Study Case	Annex: / 2
----------------	------------------------	------------------------	------------

	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	Bus-voltage [kV]	deg	Active Power [kW]	Reactive Power [kvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data
S15.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B7.0	0.48	0.00	0.00	0.00						
S15.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
PN-5143002										
A	4.16	0.00	0.00	0.00						
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B	4.16	0.00	0.00	0.00						
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker

Load flow - emergencia.txt

PN-5143003										
A	0.48	0.00	0.00	0.00						
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B	0.48	0.00	0.00	0.00						
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
PN-5143004										
A	0.48	0.00	0.00	0.00						
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
B	0.48	0.00	0.00	0.00						
S3.0	/Switch				0.00	0.00	1.00	0.00		Tie-Breaker
PN-5148001										
A	0.48	1.00	0.48	0.00						
S4.0	/Switch				-743.09	-482.03	-0.84	1.07		Tie-Breaker
Cub_0.1/Asm	ME7				23.67	13.92	0.86	0.03	27.82	Slip: 0.24 % xm: 4.00 p.u.
Cub_0.2/Lod	CE7				719.42	468.11	0.84	1.03		PI0: 719.42 kW QI0: 468.11 kvar
C	0.48	1.00	0.48	0.00						
S4.0	/Switch				743.09	482.03	0.84	1.07		Tie-Breaker
S5.0	/Switch				559.93	352.95	0.85	0.80		Tie-Breaker
Cub_1.0/Sym	GE-EM.				1303.02	834.98	0.84	1.86	83.65	Typ: PQ
B	0.48	1.00	0.48	0.00						
S5.0	/Switch				-559.93	-352.95	-0.85	0.80		Tie-Breaker
Cub_2.2/Asm	ME8				23.67	13.92	0.86	0.03	27.82	Slip: 0.24 % xm: 4.00 p.u.
Cub_2.1/Lod	CE8				536.26	339.03	0.85	0.76		PI0: 536.26 kW QI0: 339.03 kvar