

Sillas Batista da Silva Junior

Análise de operação de sistemas de distribuição utilizando o OpenDSS

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S586a Silva Junior, Sillas Batista da
Análise de operação de sistemas de distribuição
utilizando o OpenDSS / Sillas Batista da Silva Junior ;
orientador Eduardo Nobuhiro Asada. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Engenharia Elétrica com ênfase em Energia e Automação) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2010.

1. Distribuição de energia elétrica. 2. Cogeração de
energia elétrica. 3. Capacitores. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Sillas Batista da Silva Júnior


Título: "Análise de Operação de Sistemas de Distribuição Utilizando o OpenDSS"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 23 / 11 / 2010,

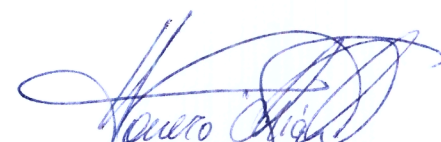
com NOTA 9,8 (nove, oito), pela comissão julgadora:



Prof. Dr. José Carlos Felizatti - EESC/USP



Prof. Dr. Rodrigo Andrade Ramos - EESC/USP



Prof. Associado Homero Schiabel
Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica
EESC/USP

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por finalidade o estudo do comportamento de um sistema de distribuição de energia elétrica de porte e características reais, com bancos de capacitores e geradores distribuídos. São mostradas as análises de perfis de tensão, correntes de falta, fluxos de potência e perdas para todo o circuito em seus diferentes períodos de demanda no estado de operação normal, na configuração sem bancos de capacitores e na situação com os cogeradores inoperantes. Também foi proposta e analisada uma nova configuração de alocação de bancos de capacitores. As simulações foram executadas através da utilização do software *OpenDSS*.

Palavras-chave: distribuição de energia, geração distribuída, bancos de capacitores.

ABSTRACT

This graduation project aims at studies of realistic electric power distribution systems which present capacitor banks and distributed generators. It shows the analysis of voltages levels, short circuit currents, power flow and losses for the entire circuit at different demand periods considering the operation with and without capacitor banks and also testing the system behavior with disabled cogenerators. Studies concerning the proposition of new allocation for the capacitor banks are also shown. The simulations were performed using the OpenDSS software.

Keywords: energy distribution, distributed generation, capacitor banks.

.

SUMÁRIO

1. Introdução	3
1.1. Estado da Arte.....	5
1.2. Justificativa.....	5
1.3. Proposta e Objetivos	6
1.4. Estrutura do Trabalho	7
2. Apresentação do Software OpenDSS.....	9
2.1. Aplicações Básicas.....	10
2.2. Conceitos Básicos	12
2.3. Sintaxe da Linguagem de Comando.....	15
3. Descrição do Caso	19
3.1. Cargas.....	21
3.2. Cabos e Conexões	25
3.3. Capacitores	31
3.4. Geradores	32
3.5. Transformadores	33
4. Perfis de Tensão	35
4.1. Situação Normal de Operação.....	35
4.2. Situação Sem Bancos de Capacitores.....	41
4.3. Situação Sem Geração Distribuída.....	51
5. Fluxo de Potência.....	63
5.1. Situação Normal de Operação.....	63
5.2. Situação Sem Bancos de Capacitores.....	77
5.3. Situação Sem Geração Distribuída.....	86
6. Correntes de Falta.....	95
7. Realocação dos Bancos de Capacitores	101
7.1. Perfis de Tensão.....	103
7.2. Fluxo de Potência.....	111
7.3. Perdas	115
8. Conclusão	117
9. Referências Bibliográficas	119
APÊNDICE A – Código Fonte Completo (<i>OpenDSS</i>).....	121

1. Introdução

Desde que foi descoberta, a energia elétrica desempenha papel importantíssimo na história das sociedades. É uma das mais nobres formas de energia secundária, proporciona conforto, comodidade, qualidade de vida e progresso econômico. As sociedades modernas exigem um fornecimento de energia elétrica cada vez mais confiável e menos susceptível a falhas.

Os chamados SEPs – Sistemas Elétricos de Potência – tem por obrigação fornecer energia elétrica para consumidores de grande ou pequeno porte, englobando os processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica com qualidade e confiabilidade regulamentadas e controladas, no Brasil, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em outras palavras, tais sistemas têm a função de produtores – convertendo a energia de alguma natureza em energia elétrica – e de distribuidores – fornecendo a quantidade de energia demandada pelos consumidores a qualquer instante [1].

Os sistemas de transmissão são os responsáveis por levar a energia gerada nas zonas produtoras aos centros consumidores. No Brasil, devido ao predomínio da geração de energia elétrica provida de hidroelétricas, a distância entre os centros consumidores e tais zonas de geração torna-se muito grande, demandando atenção especial aos sistemas de transmissão.

Já nos centros consumidores, a energia que chega dos sistemas de transmissão deve ser distribuída a todos os diferentes tipos de clientes, desde pequenas residências até grandes indústrias, cada um no nível de tensão que lhe é mais adequado. Em resumo, um sistema de transmissão em alta tensão transporta potência elétrica para os sistemas de distribuição em média tensão que, por sua vez, entregam diretamente aos consumidores de baixa tensão. O chamado sistema de distribuição é composto pelas redes elétricas primárias (redes de distribuição de média tensão), e redes secundárias (redes de distribuição de baixa tensão), cuja construção, manutenção e operação são responsabilidade das companhias concessionárias distribuidoras de eletricidade, também controladas pela ANEEL.

Neste contexto inserem-se também os sistemas de geração distribuída (GD), ou cogeração, termo usado para designar a geração de energia elétrica realizada junto ou próxima dos centros consumidores, independente da potência, tecnologia ou fonte de energia, envolvendo equipamentos de medida, controle e comando que articulam a operação dos geradores. Acredita-se que sistemas de geração distribuída tenham vantagem sobre a geração central, pois economizam investimentos em transmissão e reduzem as perdas nestes sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica [2].

A instalação de bancos de capacitores (BCs) torna-se frequentemente necessária pois visa não só a redução das perdas ativas e reativas e melhoria nos perfis de tensão, mas também o controle do fluxo de potência, melhoria da estabilidade do sistema, redução do custo de operação do sistema, correção de fator de potência, compensação da energia reativa – produzida por cargas indutivas e pelas reatâncias das linhas, redução da carga aparente liberando capacidade para a ligação de cargas adicionais e redução da componente atrasada da corrente [8][9].

Os benefícios reais obtidos com a instalação de capacitores em sistemas de distribuição dependem das características dos equipamentos e da forma como é feita essa instalação. Especificamente, dependem do número e tamanho dos capacitores, de sua localização, do tipo (fixos ou chaveados) e do esquema de controle utilizado. Muitas pesquisas já foram feitas no que tange à localização ótima de capacitores em sistemas de distribuição de energia balanceados [10].

Analisando os perfis de tensão no sistema em diferentes períodos de carga, é possível dizer se o sistema está dentro dos padrões de qualidade exigidos pela agência reguladora, a ANEEL, que estabelece os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente [13]. Valores de tensão acima ou abaixo do valor nominal de tensão contratado podem provocar danos nos equipamentos e devem ser evitados.

As análises de fluxo de potência levam-nos à compreensão da quantidade de reativos circulantes no sistema e à potência real consumida pelos elementos passivos. Dessa maneira torna-se possível descobrir as perdas existentes no circuito. A relação entre a potência ativa e reativa é o que determina o fator de potência, parâmetro este que deve ser monitorado a fim de garantir os padrões exigidos de qualidade de energia. Alta quantidade de reativos diminui o fator de potência, em outras palavras, parte da potência produzida pela fonte não está sendo consumida pelo sistema. Este tipo de estudo também torna conhecido o sentido direcional da potência. Um fluxo bidirecional, por exemplo, pode provocar maiores perdas e problemas na seletividade e coordenação dos equipamentos de proteção.

Outro importante aspecto de análise de desempenho de sistemas de distribuição de energia diz respeito aos potenciais de falta ao longo da rede, visto que maiores correntes de curto-circuito demandam maiores gastos em equipamentos e obras, afetando diretamente os parâmetros que ditam a qualidade de energia elétrica. O estabelecimento de faltas causa efeitos transitórios indesejáveis, alterando os valores de tensão e corrente esperados, podendo provocar a atuação de equipamentos de proteção e interromper o fornecimento de energia. Um estudo das variações nas correntes de falta devidas a inserção ou modificação

de diferentes elementos do sistema faz-se importante frente à possível melhoria da segurança e estabilidade de operação.

1.1. Estado da Arte

Com a atual estrutura do mercado de eletricidade, a automação dos sistemas de distribuição torna-se ainda mais importante para a correta classificação dos diferentes tipos de consumidores. No cenário atual, a maioria dos sistemas de distribuição apresenta deficiência na implantação de uma automação eficiente e não permite o monitoramento de todos os padrões de carga no nível de subestação. O processo de automação da distribuição de energia requer altos investimentos em equipamentos de medição e monitoramento a fim de coletar e processar os dados provindos das subestações monitoradas. Usualmente são criadas campanhas para realização de baterias de medições e processamento desses dados com a finalidade de conhecer melhor os padrões de consumo dos clientes. Todavia tais informações são parciais e limitadas a um determinado período de tempo. Assim, a caracterização de cargas em grandes sistemas de distribuição para análise do fluxo de potência permanece como uma tarefa desafiadora [5].

O mercado atual exige maiores esforços de engenharia e planejamento, forçando os estudos e análises do sistema elétrico a serem conduzidos com eficiência e em formato aplicável. Atualmente não se encontra, entre as ferramentas utilizadas, *softwares* capazes de atender a todas as necessidades técnicas exigidas (ex.: Matlab e Simulink, Commercial Distribution Software, EMTP Family e etc). Estudos mais completos podem levar de duas a três semanas para serem concluídos por consultores experientes. As necessidades e vantagens de um *software* livre são claras: pesquisadores e usuários finais são os maiores beneficiados [6]. Poucas ferramentas de análise na área de automação de sistemas de distribuição dispõem de métodos de cálculo de fluxo de potência robustos e eficientes, com capacidade de representar as diferentes características dos sistemas, tais como estruturas radiais, sistemas polifásicos, desbalanceados, isolados ou não-isolados e com geração distribuída [7].

1.2. Justificativa

O impacto da cogeração em sistemas existentes deve ser estudado, pois sua influência no fluxo de potência e correntes de curto-circuito é expressiva. Quando ocorre a geração de energia elétrica utilizando cogeneradores em paralelo a um sistema, faz-se necessário conhecer os impactos provocados nas instalações existentes [4]. O fluxo de carga revela, além do perfil de carga de cada alimentador, as perdas e também a direção fluxo de potência, determinado pelos níveis de carga em determinado período e a potência gerada.

Durante o período de carga leve, por exemplo, a presença de geradores em sistemas de distribuição pode promover um aumento das tensões nas barras do sistema, as quais podem atingir valores que excedem os limites estabelecidos pelas normas, logo, percebe-se que é imprescindível determinar essas condições proibitivas de operação e propor medidas para que as mesmas não sejam atingidas.

A quantidade de pequenos geradores conectados aos sistemas de distribuição está crescendo rapidamente, contribuindo para redução das perdas do sistema. Tais geradores são, na maioria dos casos, de propriedade de diferentes produtores e podem ser controlados de maneira independente, levando a um possível problema de coordenação entre os controladores locais e o controle do sistema nas subestações distribuidoras de alta ou média tensão [5].

Com o aumento das preocupações com os níveis de qualidade de energia estabelecidos pela ANEEL, o gerenciamento da potência reativa tem se tornado cada vez mais importante para as empresas fornecedoras de energia. No entanto, o crescimento das cargas longe dos centros geradores, as extensas linhas e as perdas decorrentes dos cabos resultam em variações de tensão nas barras, e assim comprometem a qualidade da energia elétrica fornecida. O alto nível de potência reativa indutiva demandada nos sistemas de distribuição também causa problemas como a queda de tensão, o aumento das perdas, distorções no fator de potência e gastos com equipamentos mais robustos, causando dificuldades no controle da tensão [8].

1.3. Proposta e Objetivos

Este trabalho de conclusão de curso tem por finalidade a aplicação de análise computacional para verificação do comportamento de um sistema real de distribuição de energia elétrica na presença de geração distribuída, examinando a contribuição dos geradores distribuídos em diversas situações e a colaboração para a melhoria de parâmetros de qualidade de energia, evitando-se assim desperdícios, prejuízos e danos aos SEPs.

Levando em consideração todos os aspectos relevantes à representação mais realística possível de um sistema de distribuição de energia de porte real – como variação de cargas no tempo, distância e localização geográfica de cargas e bancos de capacitores, geradores distribuídos, entre outros; serão propostas e analisadas, de maneira dinâmica e eficiente, ações praticáveis na realocação dos bancos de capacitores para melhoramento de parâmetros de qualidade de energia.

Dentre os diversos parâmetros de um sistema de distribuição de energia que merecem atenção e estudo, abordaremos aqui os estudos de perfis de tensão, fluxo de potências, perdas e correntes de falta.

Para a realização dos objetivos propostos, utilizar-se-á um *software* gratuito voltado para a simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica, o OpenDSS. A utilização deste *software* permitirá, de forma simples e eficaz, elaborar estudos e análises de maneira dinâmica e com resultados satisfatórios sendo, portanto, parte também integrante deste trabalho de conclusão de curso, o aprendizado e utilização eficiente desta ferramenta computacional. A partir da representação no ambiente do *software* OpenDSS, proceder-se-á análise do desempenho de um sistema real de distribuição de energia frente as suas variações, verificando as alterações nos perfis de tensão, fluxo de potência e correntes de curto-circuito.

1.4. Estrutura do Trabalho

Iniciaremos a apresentação deste trabalho de conclusão de curso mostrando uma visão geral do ambiente computacional utilizado nas simulações, o *OpenDSS*, exibindo os aspectos básicos necessários para o entendimento dos resultados a serem expostos nos capítulos seguintes.

No Capítulo 3, estão representados todos os parâmetros e aspectos inerentes ao sistema elétrico alvo de estudo. Neste capítulo são apresentados diagramas e tabelas que descrevem todos os elementos e configurações existentes no circuito em questão.

Os estudos de perfis de tensão e fluxo de potência, realizados para situação normal de operação, bem como para o sistema sem GD e sem BCs, são mostrados no Capítulo 4 e 5, respectivamente.

No Capítulo 6 é mostrado o estudo de correntes de falta, permitindo conhecimento de valores para curtos-circuitos trifásicos, fase-terra e fase-fase no decorrer de todos os alimentadores do circuito.

Já no Capítulo 7 são apresentados estudos de perfis de tensão, fluxo de potência e perdas para o circuito com uma nova configuração de bancos de capacitores.

Após a “Conclusão” e “Referências Bibliográficas”, Capítulos 8 e 9, respectivamente, o APÊNDICE A mostrará, na íntegra, o código fonte utilizado no *OpenDSS* para execução das análises apresentadas.

2. Apresentação do Software OpenDSS

O *OpenDSS* (*Distribution System Simulator*) é um software livre (*open source*) que pode, portanto, ser utilizado e modificado por qualquer usuário sem nenhum tipo de ônus ou obrigação para com o desenvolvedor. Seu desenvolvimento iniciou-se em 1997 na *Electrotek Concepts, Inc.* por Roger Dungan e Thomas McDermott. Em 2004 o *OpenDSS* foi comprado pela *EPRI Solutions* e, em 2008, tornou-se um programa *open source* a fim de se somar a outros esforços para as modernizações na área de *Smart Grid* [11]. Foi inicialmente concebido com o intuito de criar uma ferramenta que fosse capaz de modelar subestações e os circuitos de distribuição entre elas numa linguagem orientada a objetos que diminuísse o trabalho de complicadas linguagens e sistemas de conversão existentes na época.

Sabendo que a automação dos sistemas de distribuição era eminente e se tornaria cada vez mais importante, foi dado grande valor ao impacto dos algoritmos na operação dos sistemas. Outro objetivo no desenvolvimento do programa foi a inclusão de análises de harmônicos nos estudos de fluxo de potência sem a necessidade de modelos não lineares dos equipamentos.

Até o presente, o *OpenDSS* tem atingido os objetivos inicialmente propostos e adquirido muitas outras funcionalidades que não são facilmente encontradas em outras ferramentas de análise de sistemas de distribuição.

O sistema suporta basicamente todo tipo de análise em regime permanente (no domínio da frequência, não limitado a 60Hz) utilizada em sistemas de distribuição. Adicionalmente suporta vários tipos de análises desenvolvidas para necessidades futuras na formação de sistemas de distribuição em todo mundo. Algumas das funcionalidades encontradas no programa foram desenvolvidas com foco em sistemas com geração distribuída; outras com foco em qualidade de energia e análise de harmônicos. O *OpenDSS* foi desenvolvido para ser indefinidamente expansível, dessa forma pode ser facilmente adaptado para necessidades futuras.

O *OpenDSS* pode ser usado para planejamento e análise de sistemas de distribuição de energia, análise de circuitos polifásicos, análise de sistemas com geração distribuída, simulações de variação anual de cargas e geradores, simulações de plantas geradoras eólicas, análises de configurações incomuns de transformadores, análises de harmônicos e inter harmônicos, estudo de tensão entre neutro e terra, desenvolvimento de testes IEEE e etc.

Dentre os diversos modos de solução podemos destacar: fluxo de potência instantâneo (Snapshot Power Flow), fluxo de potência anual ou diário (Daily/Yearly Power Flow), harmônicos (Harmonics), dinâmico (Dynamic), estudo de faltas (Faultstudy) e o modo Autoadd, que automaticamente escolhe lugares ótimos para instalação de geradores ou bancos de capacitores.

O comportamento do algoritmo se aproxima mais ao de um algoritmo de análise de fluxo de harmônicos do que ao de um algoritmo típico para análise de fluxo de potência. Isso pode parecer estranho, visto que o OpenDSS é uma ótima ferramenta para o estudo de fluxos de potência, porém dá ao programa uma enorme flexibilidade para modelagem de elementos na mais diversas configurações de circuitos.

A estrutura de mais alto nível do algoritmo, que mantém as definições dos elementos do circuito, foi desenvolvida em ambiente Delphi, as estruturas secundárias foram escritas em C e C++. O compilador é extremamente rápido, permitindo ciclos iterativos em tempos mais que satisfatórios. Todo o programa é executado a partir de um único arquivo do tipo *.EXE que não necessita instalação e funciona diretamente de sua localização. A velocidade de processamento dos scripts superou as expectativas dos desenvolvedores, provando ser mais do que adequadas para seu propósito.

2.1. Aplicações Básicas

O executável permite ao usuário trabalhar simultaneamente com várias janelas e executar um script ou uma porção de um script em qualquer das janelas que estiverem abertas. Isso permite a organização dos scripts de forma lógica e deixá-los disponíveis a qualquer momento. Todos os scripts operam no circuito que estiver ativo ou podem definir um novo circuito que se torne ativo.

Scripts ou fragmentos de scripts são executados selecionando suas linhas, clicando com o botão direito e escolhendo a opção *“Do Selected”* ou também utilizando o atalho Ctrl+d.

Os resultados podem ser requisitados no próprio código (comandos *Show* ou *Export*) ou através de links que podem ser clicados na interface gráfica. Estes podem retornar como arquivos *.CSV, *.TXT ou como gráficos que podem ser configurados para mostrar os mais diferentes tipos de resultados.

O *OpenDSS* executa análises básicas de fluxo de potência onde existe uma fonte principal de potência para o sistema. Dessa forma torna-se possível resolver sistemas radiais ou em anel, ideal para companhias que também tenham sistemas de transmissão e subtransmissão, bem como sistemas de pequeno e médio porte.

O circuito pode ser declarado com seus parâmetros de sequência positiva ou polifásicos (o modo polifásico é pré-definido). O fluxo de potência pode ser executado em diversos modos de solução (*snapshot*, *daily*, *dutycycle*, *monte carlo* e outros nos quais as cargas variam em função do tempo).

Quando a análise de fluxo de potência é finalizada, as perdas, tensões, fluxos e outras informações tornam-se disponíveis para todo o sistema, cada componente e certas áreas pré-definidas. Para cada instante do tempo as perdas são mostradas em kW, por exemplo. Medidores de energia podem ser usados para mostrar os fluxos no decorrer de um intervalo de tempo.

Para estudos de fluxo de potência, cargas e geradores distribuídos são tratados como fontes de injeção de corrente. No modo de solução direta, tais elementos são incluídos como admitâncias na matriz de admitância do sistema que é então resolvida diretamente, sem iterações.

Existem dois tipos diferentes de fluxo de potência que podem ser empregados: o método “normal” e o método “Newton”. O algoritmo “normal” é mais rápido mas pode ter problemas de convergência para circuitos grandes e complexos, onde se recomenda a utilização do método “Newton”.

Estudos convencionais de falta podem ser realizados para todas as barras através do comando “*Set mode=Falstudy*” que retorna as correntes e tensões em todas as fases para todos os tipos de faltas, mostrando-se uma excelente ferramenta para depuração de erros de modelagem até parametrização de relés de proteção.

Também é possível criar e analisar faltas no modo “*snapshot*”. Para isto o usuário deve definir a barra em que a falta ocorre, bem como o tipo de falta e o valor da resistência de falta. Nesse caso, a falta é um elemento do circuito e pode ser manipulado como tal.

No modo “*Monte Carlo*” é possível aplicar faltas aleatórias em regiões predefinidas pelo usuário. Assim é possível examinar o comportamento da tensão em geradores distribuídos para várias faltas ocorrentes no sistema, por exemplo.

Como o *OpenDSS* opera no domínio da frequência, é natural, e uma das mais simples utilidades do programa, a análise de fluxo de harmônicos. O usuário define espectros de harmônicos de interesse para todo e qualquer elemento do circuito. O programa também traz espectros predefinidos para vários tipos de elementos.

Simulações dinâmicas de comportamento de máquinas também são possíveis no OpenDSS, o que pode ser útil para o estudo do comportamento de geradores distribuídos em casos de falta.

O programa também permite exportar tabelas com valores de tensão e correntes (de fase ou de sequência), sobrecarga, potências, correntes de falta, geradores, cargas, matriz de admitância e etc. É possível também gerar gráficos nos quais a espessura das linhas do circuito variam de acordo com a potência, corrente, tensão ou perdas nelas verificadas, é permitido editar parâmetros como cores, variação de espessuras e etc; para esta função é necessário declarar as coordenadas espaciais dos barramentos.

2.2. Conceitos Básicos

Cada elemento do sistema de potência, seja ele ativo ou passivo, é declarado como tendo um ou mais terminais, cada terminal pode ter um ou mais condutores. Se o terminal é conectado a um dispositivo polifásico de N fases, as primeiras são consideradas terminais de fase, em ordem, os terminais restantes são neutros ou não transmitem potência.

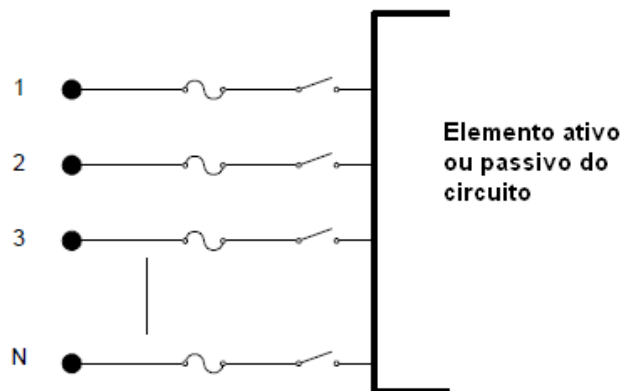


Figura 1. Definição de terminais

Para o *OpenDSS* uma barra ou barramento é um ponto de conexão com um ou mais nós para conexão de fases individuais e outros condutores provindos de elementos do circuito. As barras podem receber qualquer nome alfanumérico ASCII. Mesmo que os nomes sejam numéricos, o algoritmo os transformará em outros números que serão usados internamente. É aconselhável que os nomes não contenham caracteres nulos ou de controle, todavia não tem limite de caracteres.

Um barramento não existe para o programa até que este seja necessário para a solução ou algum outro propósito. Sempre que é executada uma solução, é criada uma lista dos barramentos ativos. Se o usuário desejar declarar uma nova barra, basta criar um elemento

conectado a ela ou modificar as conexões dos elementos existentes no circuito ativo. A criação da lista de barras pode ser forçada pelo usuário através do comando *"MakeBusList"*.

Os terminais dos elementos não são definidos separadamente. Cada elemento, assim que criado, terá um nome e uma quantidade definida de terminais. Estes recebem nomes em ordem numérica [1, 2, 3, ...]. Os terminais e nós de barramento podem ser combinados para formar qualquer tipo de conexão praticável. Dessa forma, se um barramento possui elementos trifásicos, as conexões ocorrerão nos nós 1, 2 e 3; o nó 0 sempre será a tensão de referência, exatamente zero volts, representando o neutro ou aterramento do sistema.

Os elementos passivos costumemente possuem dois ou mais terminais polifásicos (capacitores conectados em paralelo são um exceção pois possuem apenas um terminal), cuja função básica é transportar energia de um ponto a outro do sistema. Tais elementos são comumente definidos por suas impedâncias, dessa forma são facilmente representados na matriz de impedâncias primitiva.

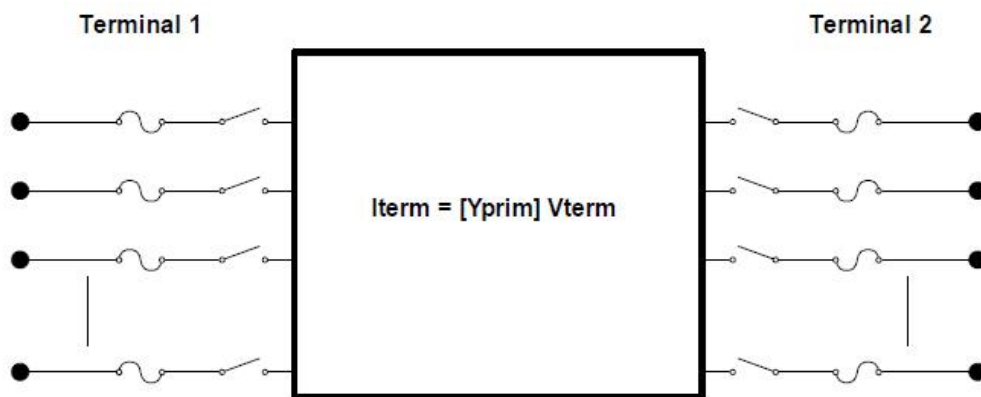


Figura 2. Representação de elemento passivo

Já os elementos ativos convertem potência elétrica para alguma outra forma, ou vice-versa. A maioria deles terá apenas uma conexão com o sistema de potência, portanto, apenas um terminal polifásico.

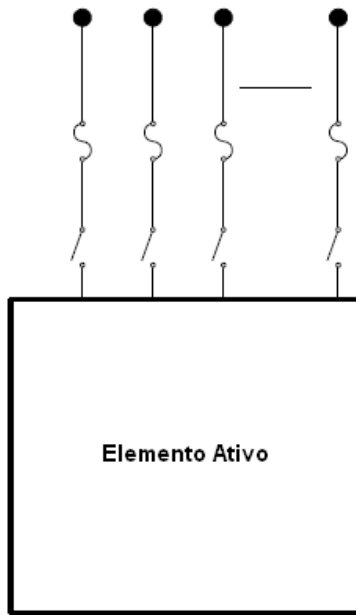


Figura 3. Representação de elemento ativo

Elementos não-lineares como geradores e alguns tipos de cargas são tratados como equivalentes de Norton, com matriz de admitância primária constante e uma “corrente de compensação” que equivale à porção não-linear. Existem seis modelos de carga predefinidos no *OpenDSS*.

A Figura 4 ilustra como o *OpenDSS* une todos os elementos do circuito para executar a solução. Um valor inicial de tensão é obtido pela análise de fluxos de potência desconsiderando as cargas, ou seja, desconectando todos os elementos *shunt* e considerando apenas os elementos passivos em série. Os ciclos de iteração iniciam-se pela obtenção das correntes injetadas no sistema por todos os elementos ativos e adicionando-as ao vetor I_{inj} , então resolve-se o sistema para a seguinte aproximação dos valores de tensão.

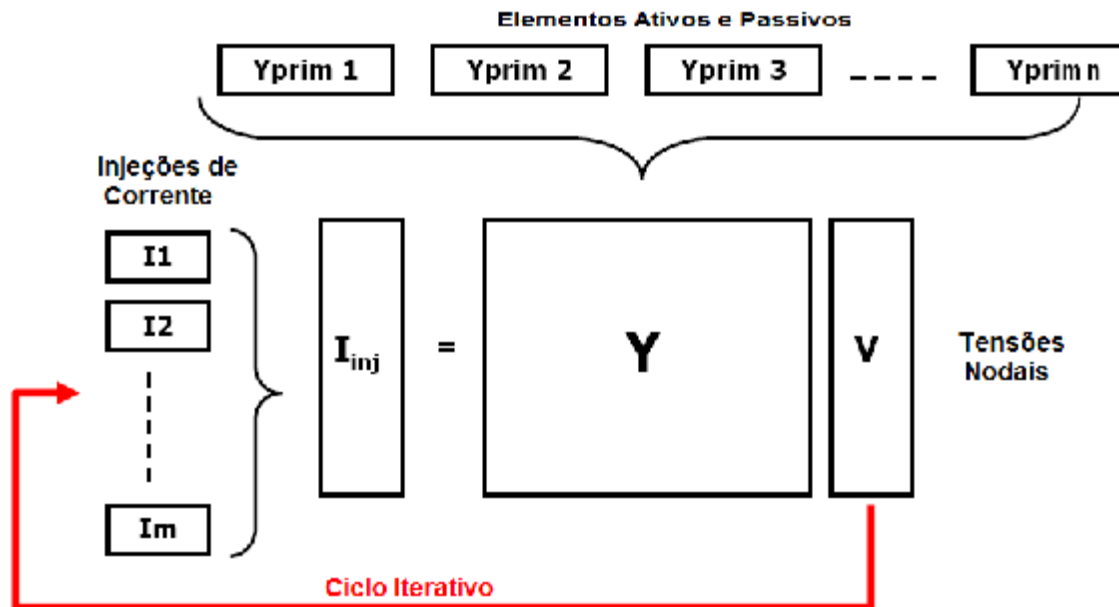


Figura 4. Ciclo de solução do *OpenDSS*

Também existe o algoritmo “Newton” (não confundir com o típico método Newton-Raphson de cálculo de fluxo de potência), utilizado para sistemas mais complexos e difíceis de resolver.

Quando executando simulações de comportamento anual ou diário do sistema, a solução obtida para o tempo presente é utilizada como passo inicial para o próximo período de tempo. A menos que exista uma drástica mudança de cargas entre períodos, o método convergirá em 2 iterações – uma que soluciona e outra que verifica a convergência.

Sempre que um circuito é iniciado, o programa automaticamente cria uma fonte de tensão trifásica chamada “*Source*”, conectada a uma barra chamada “*SourceBus*” com um valor razoável de potência de curto-circuito. Este conjunto (fonte+barra) não pode ser deletado ou omitido do circuito pois é fundamental para a solução, por isso sempre que um novo circuito é declarado, os parâmetros da classe “*Vsource*” devem ser editados.

2.3. Sintaxe da Linguagem de Comando

Mesmo possuindo atalhos na interface gráfica que podem ser utilizados com o mouse, o *OpenDSS* foi desenvolvido de modo que todas suas funções podem ser empregadas através de códigos de comandos. É muito importante lembrar que todos os comandos e nomes reconhecidos pelo *OpenDSS* estão referenciados na ajuda (*Help*).

A sintaxe de comando tem a seguinte forma geral:

Comando parâmetro1, parâmetro2 parâmetro3 ...

O significado dos parâmetros podem ser definidos por sua posição (pré-definições) ou por nomes seguidos do sinal “=” e o valor do parâmetro. Os dois meios de declará-los podem ser mesclados na mesma linha de comando. As duas linhas a seguir tem o mesmo significado:

```
New Object="Line.LINHA1" Bus1=BARRA1 Bus2=BARRA2
```

```
New Line.LINHA1 BARRA1 BARRA2
```

O primeiro exemplo utiliza nomes para declarar os parâmetros mostrados na ordem predefinida para o elemento *Line*. Já o segundo exemplo mostra os valores dos parâmetros declarados na ordem com a emissão de seus nomes. Os exemplos acima trazem o comando *New*, utilizado para adicionar um novo elemento ao circuito ativo, este comando deve obrigatoriamente trazer o tipo de objeto a ser adicionado, a maioria dos parâmetros referentes ao novo objeto podem ser assumidos pelo programa como valores razoáveis predefinidos.

Dentre os caracteres especiais podemos destacar os seguintes: “~” significa continuação da linha imediatamente acima; “/” inicia uma linha de comentário que não será interpretada pelo algoritmo; “!” inicia comentário em linha de comando; “|” delimitador de linha de matriz; “.” delimitador de classe, objeto, nó ou barra.

Sequências de números, ou parâmetros *array* são preferencialmente declarados entre colchetes e os números podem ser separados por vírgulas ou espaço. O exemplo a seguir traz a declaração de um transformador trifásico com parâmetros declarados em *array* onde também é interessante notar o uso do caractere “~” indicando continuação da linha acima:

```
New Transformer.TRAFO1 Buses=[1000, 1300] Conns=[Delta Wye]
```

```
~ kVs= [88 13.8] kVAs=[15000, 20000] XHL=14.03
```

Além do comando *New*, outros comandos envolvem parâmetros, os mais comuns são: *Set*, *Edit*, *Show* e *Export*. O comando *Set* é utilizado para alteração ou configuração de opções aplicáveis a todo circuito ativo, este comando costuma ser utilizado para escolher o modo de solução a ser executado, outras utilizações verificar o grupo *Options* na ajuda do *OpenDSS*. Exemplos:

```
Set mode=snapshot !Seleciona o modo Snapshot para solução do caso.
```

```
Set normvminpu=0.99 !Menor valor de tensão em pu admissível em situação normal.
```

```
Set voltagebases="0.48 13.8 88" !Define os valores das bases de tensão para cálculos em pu.
```

Os comandos *Show* e *Export* servem para exibição de resultados. O comando *Show* abrirá na tela um arquivo no formato *.TXT com as informações requisitadas, já o comando *Export* salvará na pasta raiz do programa um arquivo do tipo *.CSV. Exemplos:

Show powers

Show voltages

Show losses

Export voltages

Export currents

Export overloads

O comando *Plot*, como dito anteriormente, gera gráficos onde a espessura das linhas entre as barras varia de acordo com determinada grandeza como corrente, potência, tensão, perdas e etc. Os principais parâmetros desse comando são os seguintes:

- *Type* = { *Circuit* | *Monitor* | *Daisy* | *Zones* | *AutoAdd* | *General (bus data)* } (Tipo de gráfico a ser gerado)
- *Quantity* = { *Voltage* | *Current* | *Power* | *Losses* | *Capacity* } (Define a grandeza a ser plotada, outros parâmetros também são cabíveis)
- *Max* = { 0 | valor máximo assumido pela grandeza }
- *Dots* = { *Y* | *N* }
- *Labels* = { *Y* | *N* }
- *C1*, *C2*, *C3* = { numeração RGB das cores a serem utilizadas }
- *Subs* = { *Y* | *N* } (*default* = *N*) (mostra as subestações)
- *Thickness* = máxima espessura permitida no gráfico (*default* = 7)

Para correta utilização do comando *Plot*, é necessário definir coordenadas espaciais para cada barra. Isto pode ser feito criando-se um arquivo *.CSV com os dados na forma: nome da barra, coordenada x, coordenada y.

Os comandos *Show*, *Export* e *Plot*, entre muitos outros, podem ser acionados diretamente da interface gráfica, sem a utilização de comandos textuais.

Também é possível exibir um resumo dos valores dos parâmetros de cada elemento do circuito, bem como os valores polifásicos de potência, tensão e corrente. Isso é possível escolhendo-se o elemento na interface gráfica do programa como mostrado na Figura 5:

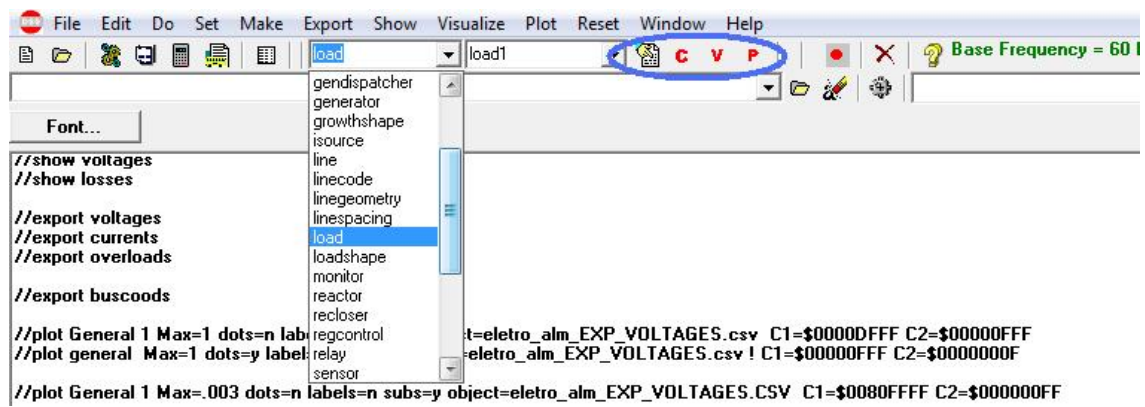


Figura 5. OpenDSS exhibindo características específicas de elementos

3. Descrição do Caso

Como alvo de análise e das aplicações apresentadas neste trabalho, foi escolhido um sistema real que permitisse mostrar as várias funcionalidades do *OpenDSS* e sua eficiência no estudo de casos envolvendo geração distribuída, bancos de capacitores e longos alimentadores. A Figura 6 abaixo mostra o diagrama unifilar simplificado da região de análise.

O barramento 1000 (SE-01, 88kV) representa a conexão com o restante do sistema, é a partir dele que se inicia nosso caso de estudo, por isso este será reconhecido pelo *OpenDSS* como o “*Vsource*”. De acordo com informações fornecidas pela concessionária de energia responsável pela região, as potências de curto-circuito neste ponto são 409 MVA, trifásica e 224,5 MVA monofásica. Dessa forma, como explicado na seção “Conceitos Básicos”, o “*Source*” do sistema deve ser editado como se segue:

```
Edit Vsource.source basekv=88 pu=1.00 MVAsc1=237.72 MVAsc3=482.25 bus1=1000
```


3.1. Cargas

As cargas foram concentradas nos diversos barramentos mostrados na Figura 6, onde também está indicada a numeração dos barramentos que serão referenciados nas diversas análises feitas neste trabalho.

Foram considerados quatro períodos de carga – manhã, tarde, noite e madrugada. O valor da carga concentrada foi obtido através da soma das cargas nas três fases dos alimentadores que compõem a mesma. A Tabela 1 mostra o valor da carga em cada barramento por período.

Tabela 1 – Cargas nos períodos da manhã tarde e noite

Barra	Manhã		Tarde		Noite		Madrugada	
	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]
1031	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01
1032	0,43	0,14	0,38	0,13	0,62	0,20	0,30	0,10
1061	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00
1062	0,10	0,03	0,09	0,03	0,13	0,04	0,06	0,02
1071	0,14	0,05	0,13	0,04	0,21	0,07	0,11	0,04
1072	0,50	0,16	0,45	0,15	0,79	0,26	0,37	0,12
1073	0,06	0,02	0,06	0,02	0,09	0,03	0,05	0,02
1081	0,55	0,18	0,49	0,16	0,91	0,30	0,44	0,15
1021	0,18	0,06	0,16	0,05	0,26	0,09	0,14	0,05
1022	1,09	0,36	0,97	0,32	1,59	0,52	0,78	0,25
1023	0,59	0,19	0,52	0,17	0,82	0,27	0,40	0,13
1024	1,39	0,46	1,23	0,40	1,99	0,65	0,98	0,32
1041	0,32	0,10	0,30	0,10	0,34	0,11	0,17	0,06
1042	1,58	0,52	1,43	0,47	2,21	0,73	1,09	0,36
1043	1,02	0,34	0,94	0,31	1,68	0,55	0,75	0,25
1051	0,47	0,16	0,43	0,14	0,64	0,21	0,33	0,11
1052	0,27	0,09	0,25	0,08	0,45	0,15	0,20	0,07
1053	0,05	0,02	0,05	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01
1054	0,64	0,21	0,58	0,19	1,03	0,34	0,47	0,15
1091	1,61	0,53	1,48	0,49	2,11	0,69	1,03	0,34
1092	1,71	0,56	1,53	0,50	2,48	0,81	1,23	0,40
1093	0,26	0,08	0,24	0,08	0,33	0,11	0,18	0,06

A representação destas cargas no ambiente *OpenDSS*, para fins de praticidade e simplificação na apresentação dos resultados, foi declarada separadamente por período ao invés da utilização de multiplicadores para representação da variação das cargas no modo diário (*Dayli mode*). Sendo assim, as linhas de comando não desejadas são declaradas como comentários (pelo acréscimo do sinal “//”) para análise em determinado período. Abaixo mostramos as linhas de declaração das cargas em todos os períodos:

//Carga - manhã

```
New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=20 kvar=10
New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=430 kvar=140
New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=0 kvar=0
New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=100 kvar=30
New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=140 kvar=50
New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=500 kvar=160
New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=60 kvar=20
New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=550 kvar=180
New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=180 kvar=60
New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=1090 kvar=360
New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=590 kvar=190
New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=1390 kvar=460
New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=320 kvar=100
New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=1580 kvar=520
New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=1020 kvar=340
New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=470 kvar=160
New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=270 kvar=90
New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=50 kvar=20
New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=640 kvar=210
New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=1610 kvar=530
New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=1710 kvar=560
New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=260 kvar=80
```

//carga - tarde

```
New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=20 kvar=10
New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=380 kvar=130
New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=0 kvar=0
```

New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=90 kvar=30
 New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=130 kvar=40
 New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=450 kvar=150
 New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=60 kvar=20
 New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=490 kvar=160
 New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=160 kvar=50
 New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=970 kvar=320
 New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=520 kvar=170
 New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=1230 kvar=400
 New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=300 kvar=100
 New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=1430 kvar=470
 New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=940 kvar=310
 New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=430 kvar=140
 New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=250 kvar=80
 New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=50 kvar=20
 New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=580 kvar=190
 New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=1480 kvar=490
 New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=1530 kvar=500
 New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=240 kvar=80

//carga - noite

New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=30 kvar=10
 New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=620 kvar=200
 New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=200 kvar=100
 New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=130 kvar=40
 New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=210 kvar=70
 New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=790 kvar=260
 New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=90 kvar=30
 New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=910 kvar=300
 New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=260 kvar=90
 New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=1590 kvar=520
 New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=820 kvar=270
 New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=1990 kvar=650
 New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=340 kvar=110
 New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=2210 kvar=730
 New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=1680 kvar=550

New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=640 kvar=210
 New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=450 kvar=150
 New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=90 kvar=30
 New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=1030 kvar=340
 New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=2110 kvar=690
 New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=2480 kvar=810
 New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=330 kvar=110

//carga - madrugada

New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=20 kvar=10
 New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=300 kvar=100
 New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=10 kvar=0
 New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=60 kvar=20
 New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=110 kvar=40
 New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=370 kvar=120
 New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=50 kvar=20
 New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=440 kvar=150
 New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=140 kvar=50
 New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=780 kvar=250
 New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=400 kvar=130
 New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=980 kvar=320
 New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=170 kvar=60
 New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=1090 kvar=360
 New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=750 kvar=250
 New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=330 kvar=110
 New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=200 kvar=70
 New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=40 kvar=10
 New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=470 kvar=150
 New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=1030 kvar=340
 New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=1230 kvar=400
 New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=180 kvar=60

3.2. Cabos e Conexões

As características dos cabos utilizados nas simulações estão representadas na Tabela 2. Foram desconsideradas as susceptâncias capacitivas (*charging*).

Tabela 2 – Parâmetros dos condutores

Condutor	Sequência Positiva		Sequência Zero		Máxima Corrente Admissível [A]
	r [Ω/m]	x [Ω/m]	r [Ω/m]	x [Ω/m]	
336.4	0,222	0,369	0,402	1,87	429
3/0	0,443	0,428	0,616	1,89	272
1/0	0,705	0,459	0,879	1,92	202

Os parâmetros mostrados na Tabela 2 acima são declarados no *OpenDSS* como segue:

// Definição dos parâmetros dos alimentadores

New Linecode.336.4 R1=0.222 X1=0.402 R0=0.396 X0=1.87 Units=km normamps=322

New Linecode.3/0 R1=0.443 X1=0.428 R0=0.616 X0=1.89 Units=km normamps=204

New Linecode.1/0 R1=0.705 X1=0.450 R0=0.879 X0=1.92 Units=km normamps=151

A Tabela 3 apresenta os comprimentos de cada tipo de cabo que interliga os pontos de cargas concentradas nos barramentos.

Tabela 3 – Comprimento dos cabos que interligam os pontos de carga

Barras	Comprimento dos Cabos [km]			Alimentador
	336,4	3/0	1/0	
2200-1021		0,24		CPC_02
1021-1921		2,14		CPC_02
1921-1022		0,36		CPC_02
1022-1023		3,00		CPC_02
1022-1922		0,46		CPC_02
1922-1024		1,86		CPC_02
2100-1041		2,98		EPE_01
1041-1941	0,72	1,14		EPE_01
1941-1042		2,06		EPE_01
1042-1043		1,75		EPE_01
2100-1051		1,24		CPC_01
1051-1052		0,55		CPC_01

Barras	Comprimento dos Cabos [km]			Alimentador
	336,4	3/0	1/0	
1052-1053			0,92	CPC_01
1051-1054			0,80	CPC_01
2200-1091		1,86		EPE_02
1091-1991		0,36		EPE_02
1991-1092		1,25		EPE_02
1092-1093	3,61	3,61		EPE_02
1300-1031	1,26			GPR_02
1031-1931	1,54	0,24		GPR_02
1931-1032	0,12	0,56		GPR_02
1032-2200		2,96		GPR_02
1300-1061	1,22			GPR_01
1061-1062	1,88	0,18		GPR_01
1062-2200		1,46		GPR_01
1200-1971		1,08		GPR_03
1971-1071		0,47		GPR_03
1071-1072		0,87		GPR_03
1072-1073	0,32	1,72		GPR_03
1073-2100		4,12		GPR_03
1200-1081		3,87		GPR_04
1081-2100		1,11		GPR_04

Para utilização da função *Plot*, foram definidas coordenadas arbitrárias para os barramentos. Como algumas interligações tem dois tipos diferentes de cabos, e respeitando as distâncias, foram criadas barras intermediárias entre as conexões mostradas na Tabela 3. Tais coordenadas são mostradas na Tabela 4:

Tabela 4 – Coordenadas das barras

Barra	x	y	Barra	x	y
1000	2470.75	2131.63	1922	10075.49	1291
1300	2570.75	2131.63	1024	11935.49	1291
1200	2570.75	2131.63	1091	8451.74	2459.92
1971	2645.39	1054.21	1991	8642.83	2765.02
1071	2611.78	585.4	1092	9854.32	3072.91
1072	3139.91	-106.11	1093	3179.9	5826.19
1073	3921.46	-1990.46	12008a	5440.57	606.3
1081	5988.04	315.32	108116a	6448.18	483.76
1031	3192.87	3226.64	12007a	2595.65	1772.11
1931	4819.41	3950.85	107229a	3262.5	-401.7
1032	5460.57	3724.31	107331a	5479.93	-643.33
1061	3786.64	2231.65	193113a	4600.14	3853.28
1062	5837.38	2036.53	193121a	4932.56	3910.87
2100	7030.4	696.89	193121b	5045.7	3870.9
2300	7030.65	796.56	103228a	6823.92	1595.07
1051	7030.4	-543.12	106114a	5658.19	2053.58
1054	7661.27	-1035.04	106222a	6488.03	1606.35
1052	6787.63	-1036.64	21003a	7030.51	-283.07
1053	6787.63	-1956.64	21002a	8204.34	574.69
1041	9994.71	388.78	104110a	9994.71	-331.22
1941	9996.28	-1469.36	10219a	8587.42	1170.44
1042	12054.71	-1471.22	22004a	7878.06	1961.41
1043	13430.44	-389.62	109227a	6517.11	4449.55
2200	7055.27	1231.32			
2400	7055.27	1131.32			
1021	7287.42	1170.44			
1921	9427.42	1170.44			
1022	9646.27	1456.44			
1023	12379.19	2693.84			

Estas coordenadas são inseridas da forma como estão apresentadas na Tabela 4 (com exceção da linha título) em um arquivo do tipo *.CSV salvo na pasta raiz do *OpenDSS*. Para este caso nomeamos o arquivo como “coordenadas.CSV”. O *OpenDSS* busca essas informações imediatamente antes ou após executar a solução, isso se dá pelo comando:

```
BusCoords coordenadas.csv
```

A figura 7 mostra o sistema elétrico com o posicionamento espacial das barras.

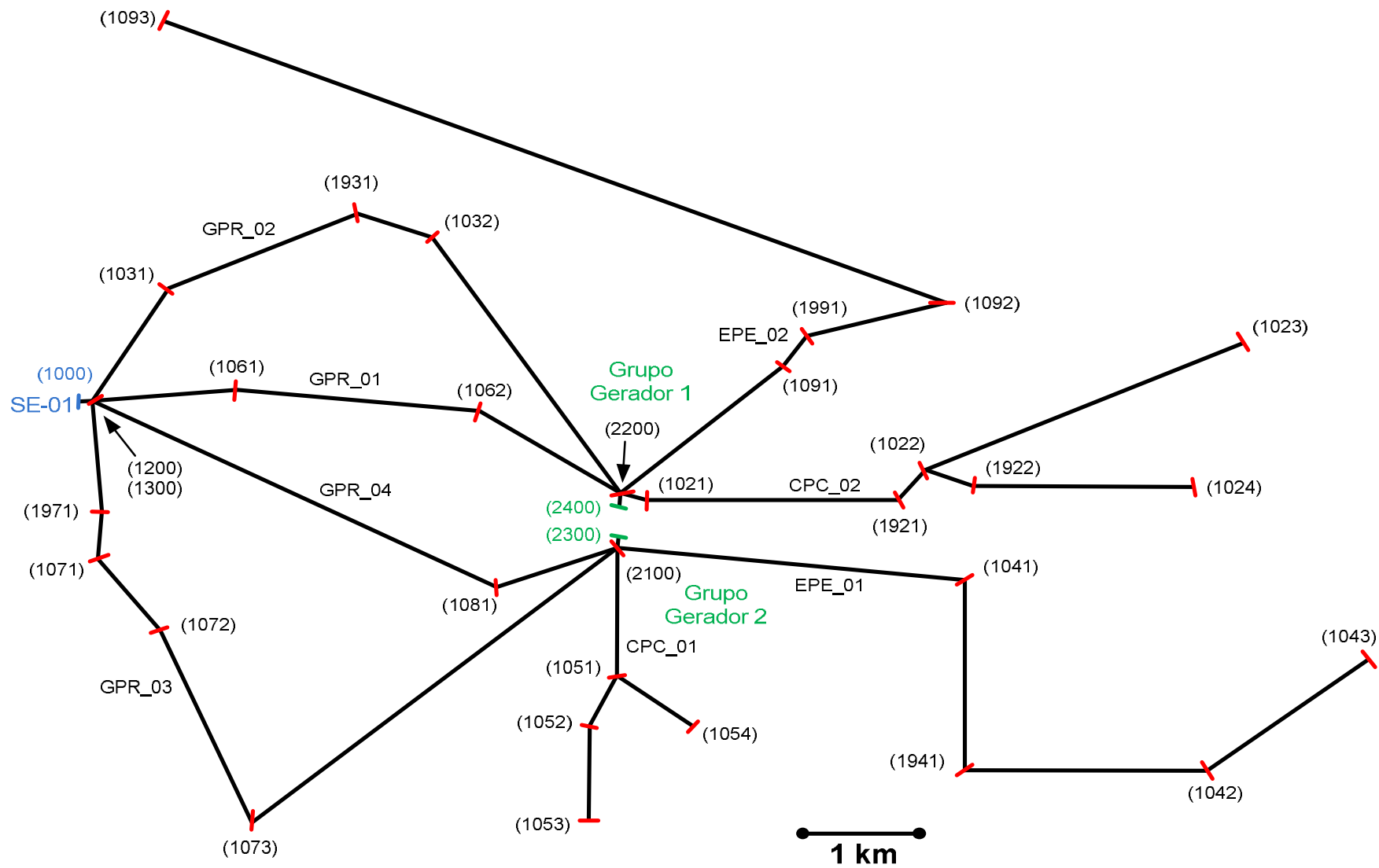


Figura 7. Sistema físico implementado

A declaração dos cabos e das distâncias entre os barramentos no *OpenDSS* foi realizada pelo seguinte trecho de código:

```
// Definição física das linhas e cabos que interligam as cargas
```

```
// GPR_01
```

```
New Line.LINE6   Bus1=1300   Bus2=1061   Linecode=3/0   Length=1.22 Units=km
New Line.LINE14a Bus1=1061   Bus2=106114a Linecode=3/0   Length=1.88 Units=km
New Line.LINE14b Bus1=106114a Bus2=1062   Linecode=336.4 Length=0.18 Units=km
New Line.LINE22a Bus1=1062   Bus2=106222a Linecode=336.4 Length=0.78 Units=km
New Line.LINE22b Bus1=106222a Bus2=2200   Linecode=336.4 Length=0.68 Units=km
```

```
// GPR_02
```

```
New Line.LINE28b Bus1=103228a Bus2=2200   Linecode=336.4 Length=0.16 Units=km
New Line.LINE28a Bus1=1032   Bus2=103228a Linecode=336.4 Length=2.80 Units=km
New Line.LINE21c Bus1=193121b Bus2=1032   Linecode=3/0   Length=0.44 Units=km
New Line.LINE21b Bus1=193121a Bus2=193121b Linecode=3/0   Length=0.12 Units=km
New Line.LINE13b Bus1=193113a Bus2=1931   Linecode=3/0   Length=0.24 Units=km
New Line.LINE21a Bus1=1931   Bus2=193121a Linecode=3/0   Length=0.12 Units=km
New Line.LINE13a Bus1=1031   Bus2=193113a Linecode=3/0   Length=1.54 Units=km
New Line.LINE5   Bus1=1300   Bus2=1031   Linecode=3/0   Length=1.26 Units=km
```

```
// GPR_03
```

```
New Line.LINE31b Bus1=107331a Bus2=2100   Linecode=336.4 Length=2.06 Units=km
New Line.LINE31a Bus1=1073   Bus2=107331a Linecode=336.4 Length=2.06 Units=km
New Line.LINE29b Bus1=107229a Bus2=1073   Linecode=336.4 Length=1.72 Units=km
New Line.LINE29a Bus1=1072   Bus2=107229a Linecode=336.4 Length=0.32 Units=km
New Line.LINE23   Bus1=1071   Bus2=1072   Linecode=3/0   Length=0.87 Units=km
New Line.LINE15   Bus1=1971   Bus2=1071   Linecode=3/0   Length=0.47 Units=km
New Line.LINE7b   Bus1=12007a Bus2=1971   Linecode=3/0   Length=0.68 Units=km
New Line.LINE7a   Bus1=1200   Bus2=12007a Linecode=3/0   Length=0.40 Units=km
```

```
// GPR_04
```

```
New Line.LINE16b Bus1=108116a Bus2=2100   Linecode=3/0   Length=0.62 Units=km
New Line.LINE16a Bus1=1081   Bus2=108116a Linecode=3/0   Length=0.49 Units=km
New Line.LINE8b   Bus1=12008a Bus2=1081   Linecode=3/0   Length=0.62 Units=km
New Line.LINE8a   Bus1=1200   Bus2=12008a Linecode=3/0   Length=3.25 Units=km
```

// CPC_01

New Line.LINE3a	Bus1=2100	Bus2=21003a	Linecode=3/0	Length=0.98	Units=km
New Line.LINE3b	Bus1=21003a	Bus2=1051	Linecode=3/0	Length=0.26	Units=km
New Line.LINE26	Bus1=1051	Bus2=1054	Linecode=1/0	Length=0.80	Units=km
New Line.LINE11	Bus1=1051	Bus2=1052	Linecode=1/0	Length=0.55	Units=km
New Line.LINE19	Bus1=1052	Bus2=1053	Linecode=1/0	Length=0.92	Units=km

// EPE_01

New Line.LINE2a	Bus1=2100	Bus2=21002a	Linecode=336.4	Length=1.18	Units=km
New Line.LINE2b	Bus1=21002a	Bus2=1041	Linecode=336.4	Length=1.80	Units=km
New Line.LINE10a	Bus1=1041	Bus2=104110a	Linecode=336.4	Length=0.72	Units=km
New Line.LINE10b	Bus1=104110a	Bus2=1941	Linecode=336.4	Length=1.14	Units=km
New Line.LINE18	Bus1=1941	Bus2=1042	Linecode=3/0	Length=2.06	Units=km
New Line.LINE25	Bus1=1042	Bus2=1043	Linecode=1/0	Length=1.75	Units=km

// CPC_02

New Line.LINE1	Bus1=2200	Bus2=1021	Linecode=3/0	Length=0.24	Units=km
New Line.LINE9a	Bus1=1021	Bus2=10219a	Linecode=3/0	Length=1.30	Units=km
New Line.LINE9b	Bus1=10219a	Bus2=1921	Linecode=3/0	Length=0.84	Units=km
New Line.LINE17	Bus1=1921	Bus2=1022	Linecode=3/0	Length=0.36	Units=km
New Line.LINE24	Bus1=1022	Bus2=1023	Linecode=1/0	Length=3.00	Units=km
New Line.LINE30	Bus1=1022	Bus2=1922	Linecode=3/0	Length=0.46	Units=km
New Line.LINE32	Bus1=1922	Bus2=1024	Linecode=1/0	Length=1.86	Units=km

// EPE_02

New Line.LINE4a	Bus1=2200	Bus2=22004a	Linecode=336.4	Length=1.10	Units=km
New Line.LINE4b	Bus1=22004a	Bus2=1091	Linecode=336.4	Length=0.76	Units=km
New Line.LINE12	Bus1=1091	Bus2=1991	Linecode=3/0	Length=0.36	Units=km
New Line.LINE20	Bus1=1991	Bus2=1092	Linecode=3/0	Length=1.25	Units=km
New Line.LINE27a	Bus1=1092	Bus2=109227a	Linecode=3/0	Length=3.61	Units=km
New Line.LINE27b	Bus1=109227a	Bus2=1093	Linecode=1/0	Length=3.61	Units=km

3.3. Capacitores

Como já citado, no sistema representado existem bancos de capacitores. A Tabela 5 mostra o valor de cada banco e a barra em que estão conectados.

Tabela 5 – Bancos de capacitores

Barra	Q [kVAr]
1931	1200
1971	600
1921	600
1922	600
1941	1200
1042	1200
1051	600
1991	1200
1092	600

Estes capacitores são declarados ao *OpenDSS* através dos seguintes comandos:

```
// Bancos de capacitores
```

```
new capacitor.C1 bus1=1931 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C2 bus1=1971 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C3 bus1=1921 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C4 bus1=1922 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C5 bus1=1941 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C6 bus1=1042 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C7 bus1=1051 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C8 bus1=1991 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C9 bus1=1092 phases=3 kvar=600 kv=13.8
```

3.4. Geradores

Os grupos de cogeneradores mostrados na Figura 6 possuem as seguintes características:

Tabela 6 – Características dos grupos cogeneradores

Dado	Valor	
	Grupo 1	Grupo 2
Potência Nominal [MVA]	1,156	1,156
Potência Nominal [MW]	0,875	0,875
Número de Unidades	12	12
Tensão Nominal [kV]	0,48	0,48
Fator de Potência Nominal	0,85	0,85
X'_d [%]	17,78	17,78
X_0 [%]	0,97	0,97
Conexão	Yat	Yat

Neste caso específico, de acordo com [12] (pp 97), análises de fluxo de potência podem não convergir para geradores com conexão estrela aterrada. Para solução deste problema o próprio desenvolvedor sugere agrupar os geradores e declará-los ao programa como geradores conectados em delta atrás de transformadores com conexão delta no primário (onde se ligará o gerador) e estrela aterrada no secundário (que segue normalmente para o restante do circuito). A Figura 8 mostra como a modelagem deve ser realizada.

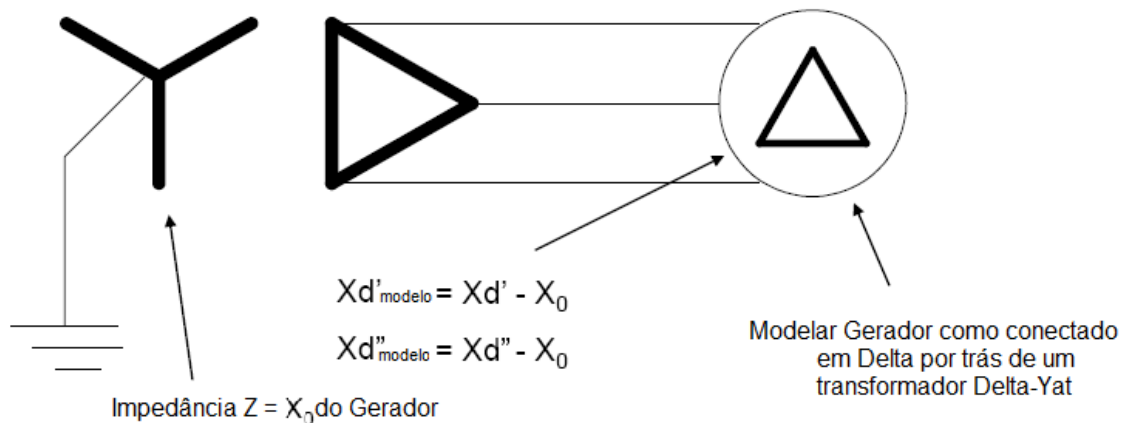


Figura 8. Modelo para ligação de gerador Yat

O trecho de comandos que executa a modelagem descrita acima é o seguinte:

```
// Geradores Agrupados (Bandeirantes) - Grupos 1 e 2
```

```
New Generator.G1 bus1=2300a kW=10600 kV=0.48 PF=-0.85 conn=delta model=3 phases=3
~enable=y status=fixed pvfactor=1
New Generator.G2 bus1=2400a kW=10600 kV=0.48 PF=-0.85 conn=delta model=3 phases=3
~enable=y status=fixed pvfactor=1
```

```
//Trafos para modelagem
```

```
New Transformer.G1 Buses=[2300a, 2300] Conns=[delta wye] kVs=[0.48 0.48]
~kVAs=[15000 15000] XHL=0.97
New Transformer.G2 Buses=[2400a, 2400] Conns=[delta wye] kVs=[0.48 0.48]
~kVAs=[15000 15000] XHL=0.97
```

3.5. Transformadores

O barramento infinito (barra 1000) que representa o restante do sistema, chamado na Figura 6 de SE-01, possui dois transformadores que abaixam o nível de tensão de 88kV para 13,8kV, chamaremos estes transformadores de TR3 (entre as barras 1000 e 1300) e TR2 (entre as barras 1000 e 1200).

Existem também outros dois grupos de transformadores que elevam a tensão de 0,48kV dos grupos geradores para 13,8kV. Para facilidade de entendimento e convergência do algoritmo, agruparemos os doze transformadores de cada grupo em um único transformador com características equivalentes. Chamaremos o transformador que liga o Grupo 1 ao sistema de TG1 (entre as barras 2300 e 2100) e de TG2 o transformador que ligado ao Grupo 2 (entre as barras 2400 e 2200).

A Tabela 7 apresenta os parâmetros dos transformadores existentes no sistema:

Tabela 7 – Características dos tranformadores

Parâmetro	Transformador			
	TR2	TR3	TG1	TG2
Tensão (kV)	88/13,8	88/13,8	0,48/13,8	0,48/13,8
Impedância (pu)	14,03	14,84	5,75	5,75
Potência (MW)	15/20	15/20	15	15
Conexão	Delta/Yat	Delta/Yat	Yat/Delta	Yat/Delta

Estes transformadores são declarados ao programa através dos seguintes comandos:

// Transformadores da subestação

New Transformer.TR3 Buses=[1000, 1300] Conns=[Delta Wye] kVs= [88 13.8]

~kVAs=[15000 20000] XHL=14.03

New Transformer.TR2 Buses=[1000, 1200] Conns=[Delta Wye] kVs= [88 13.8]

~kVAs=[15000 20000] XHL=14.84

// Transformadores - Grupos 1 e 2

New Transformer.TG1 Buses=[2100, 2300] Conns=[Wye Delta] kVs= [13.8 0.48]

~kVAs=[15000 15000] XHL=5.75

New Transformer.TG2 Buses=[2200, 2400] Conns=[Wye Delta] kVs= [13.8 0.48]

~kVAs=[15000 15000] XHL=5.75

4. Perfis de Tensão

Para o caso descrito no capítulo anterior, foram realizados estudos de perfis de tensão, para os quatro períodos de cargas (manhã, tarde, noite e madrugada). Mostraremos aqui os resultados gerados pelo *OpenDSS* e gráficos mostrando a variação da tensão no decorrer dos alimentadores.

Os valores de tensão, para sistemas com tensão nominal entre 1kV e 69kV, em regime permanente são classificados pela ANEEL em adequados, críticos ou precários. Os valores considerados adequados estão compreendidos entre 0,93pu e 1,05pu. Tensões na faixa de 0,90pu a 0,93pu são consideradas precárias. Valores abaixo de 0,90pu ou acima de 1,05pu são chamados críticos [13].

No ambiente do programa, após executar a solução do circuito, utiliza-se o comando “*show voltages*” que gera um arquivo texto do tipo *TXT que abre automaticamente e fica salvo na pasta raiz do *OpenDSS*.

Make bus list !iniciação do algoritmo

Calc voltage bases

BusCoords coordenadas.csv !carregamento das coordenadas

Solve !solução no modo selecionado (neste caso o padrão: snapshot)

Show Voltages !gera o arquivo texto com as informações de tensão em todos os barramentos

Este arquivo mostra as componentes de sequência das tensões fase-neutro em “por unidade” em todos os barramentos, todavia outros parâmetros podem ser visualizados configurando-se o mesmo comando, vide [11] (pp 56). Para facilidade de visualização e compreensão, serão mostrados aqui somente os valores da tensão em pu nos barramentos separados por alimentador.

4.1. Situação Normal de Operação

Nestas simulações pretendemos mostrar a relação inversamente proporcional do valor de tensão com a distância da fonte alimentadora, comprovando que a operação do sistema ocorre dentro de padrões aceitáveis, considerados adequados pela ANEEL.

A Tabela 8 mostra as tensões nas barras conectadas à SE-01 (barra 1000), separadas por alimentador e ordenadas por distância. As Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram os perfis de tensão nos ramos alimentadores variando em função da distância da SE-01.

Tabela 8 – Tensões nas barras da SE-01 em condição normal

Barra	Distância da SE-01 [km]	Madrugada [pu]	Manhã [pu]	Tarde [pu]	Noite [pu]	Ramo Alimentador
1000	0.00	0.9985	0.9989	0.9988	0.9986	
1300	0.00	0.9891	0.9934	0.9920	0.9977	GPR_01
1061	1.22	0.9980	1.0035	1.0122	0.9809	GPR_01
1062	3.28	1.0062	1.0009	1.0026	0.9902	GPR_01
2400	4.74	0.9990	0.9982	0.9985	0.9971	GPR_01
2200	4.74	1.0079	1.0028	1.0045	0.9948	GPR_01
1300	0.00	0.9891	0.9934	0.9920	0.9977	GPR_02
1031	1.26	0.9953	0.9972	0.9966	0.9981	GPR_02
1931	3.04	1.0064	1.0011	1.0028	0.9905	GPR_02
1032	7.72	0.9982	0.9858	0.9904	0.9670	GPR_02
2200	6.68	1.0079	1.0028	1.0045	0.9948	GPR_02
2400	6.68	0.9990	0.9982	0.9985	0.9971	GPR_02
1200	0	0.9808	0.9845	0.9835	0.9897	GPR_03
1971	1.08	0.9930	0.9929	0.9931	0.9910	GPR_03
1071	1.55	1.0129	1.0037	1.0064	0.9875	GPR_03
1072	2.42	0.9963	0.9828	0.9878	0.9623	GPR_03
1073	4.46	1.0064	0.9964	0.9996	0.9822	GPR_03
2100	8.58	1.0092	1.0057	1.0069	0.9987	GPR_03
2300	8.58	0.9992	0.9987	0.9988	0.9977	GPR_03
1081	3.87	0.9889	0.9901	0.9899	0.9906	GPR_04
2100	4.98	1.0092	1.0057	1.0069	0.9987	GPR_04
2300	4.98	0.9992	0.9987	0.9988	0.9977	GPR_04

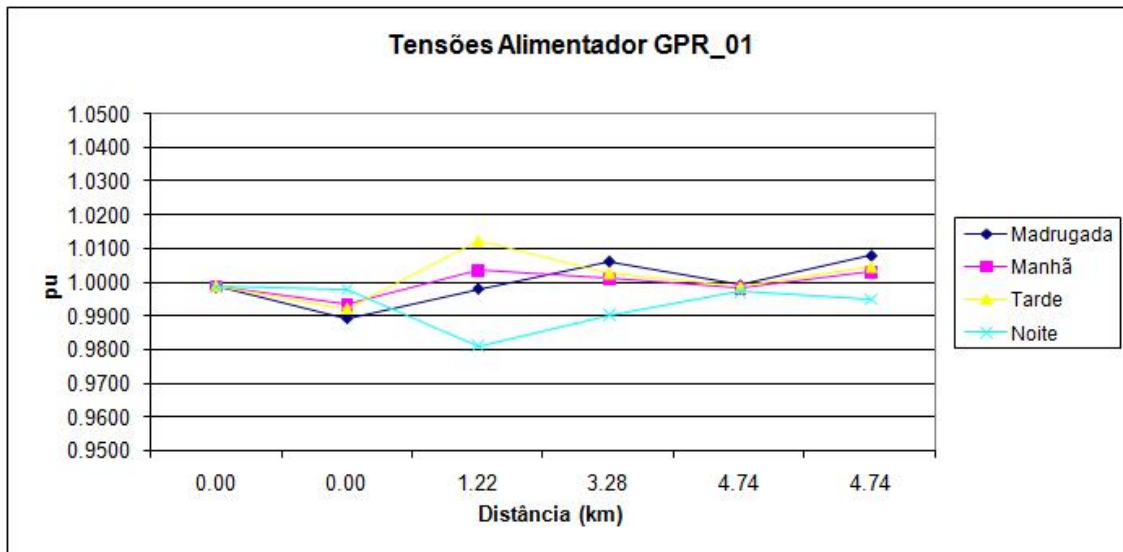


Figura 9. Tensões no decorrer do alimentador GPR_01 em condição normal

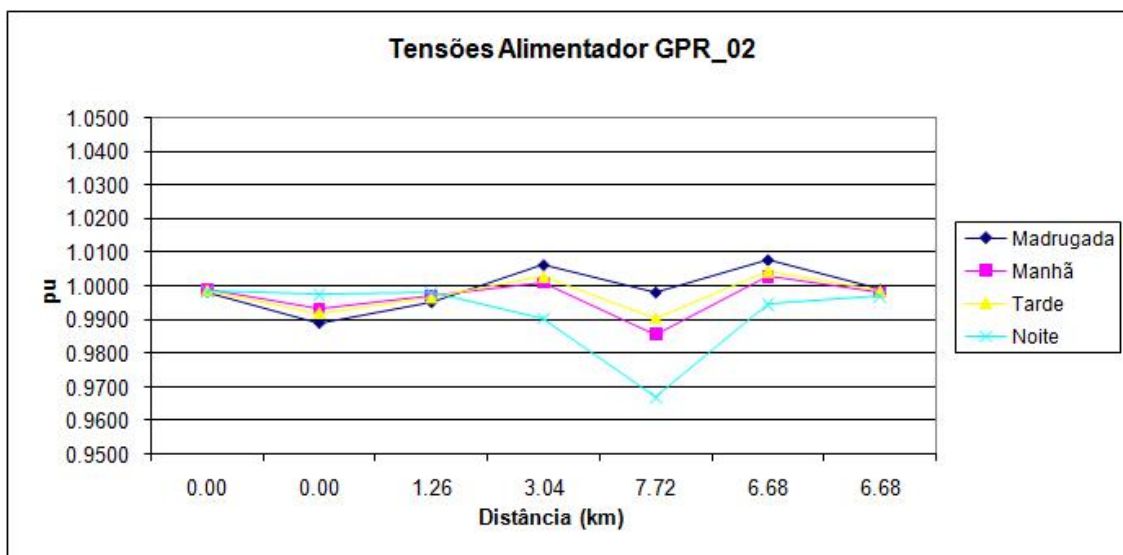


Figura 10. Tensões no decorrer do alimentador GPR_02 em condição normal

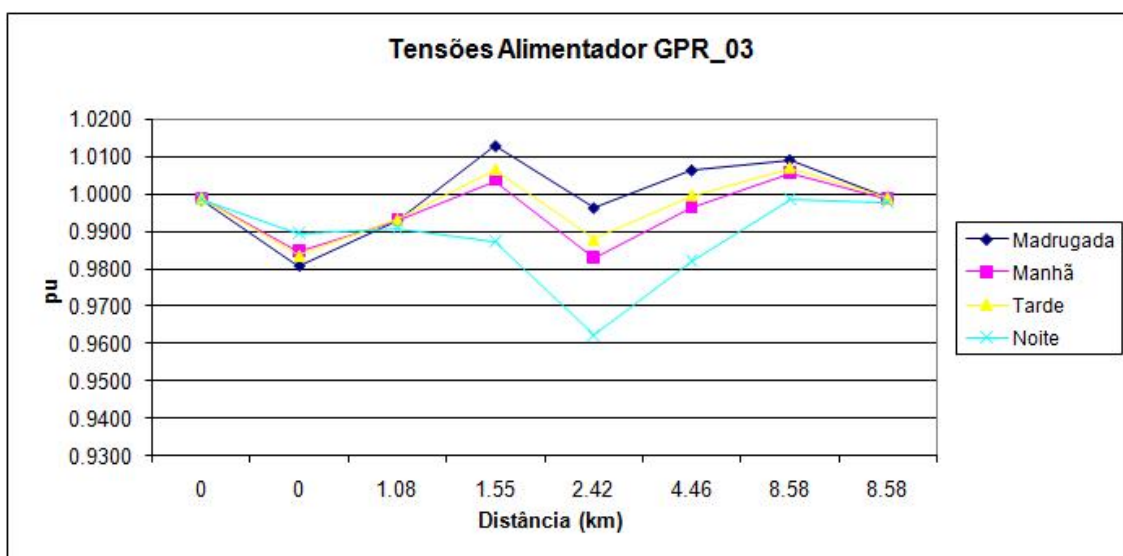


Figura 11. Tensões no decorrer do alimentador GPR_03 em condição normal

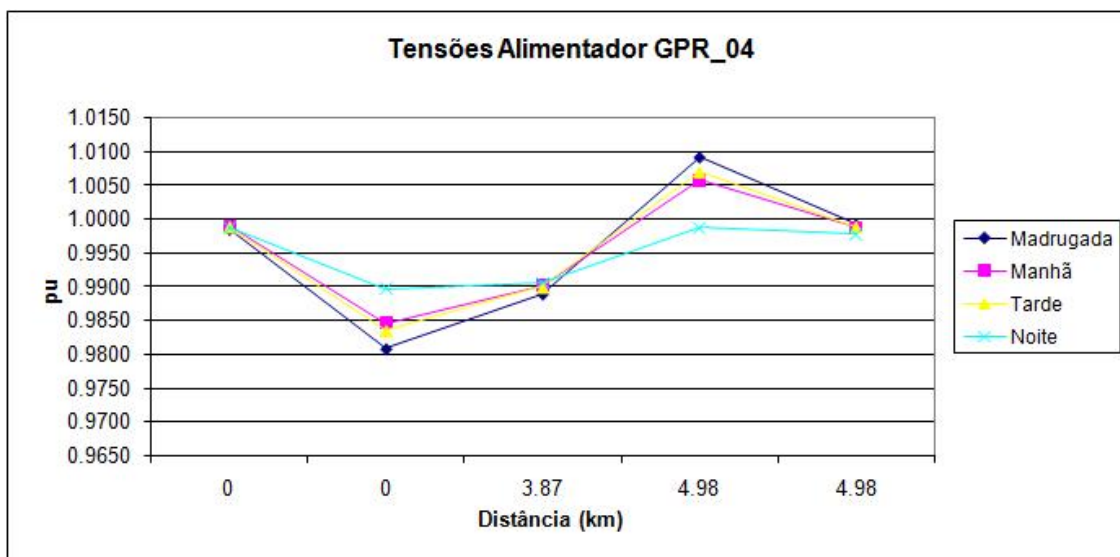


Figura 12. Tensões no decorrer do alimentador GPR_04 em condição normal

Da Tabela 8 podemos observar que as menores tensões encontradas nesses barramentos ocorrem no período da noite, visto que neste período as cargas são maiores. Em contrapartida, o período da madrugada, que possui as cargas mais baixas, apresenta os níveis mais altos de tensão. A menor tensão encontrada é de 0,9623pu, na noite na barra 1072, a maior tensão é encontrada no barramento 1071 no período da madrugada, sendo de 1,0129pu, ambos os valores se encontram dentro da faixa considerada adequada pela ANEEL.

Como mostrado na Tabela 5, existe um banco de capacitores de 1200kVar na barra 1931 do alimentador GPR_02, cujos perfis de tensão estão mostrados na Figura 10. Também existe um banco de 600kVar alocado na barra 1971 do alimentador GPR_03, mostrado na Figura 11. Em ambas as figuras podemos observar a atuação dos bancos de capacitores regulando a tensão nos alimentadores em que estão instalados. Também é de fácil observação a diminuição da tensão com o aumento da distância e/ou da carga.

A Tabela 9 mostra as tensões nas barras que fazem parte dos ramos radiais que partem do Grupo 1 de geradores. As Figuras 13 e 14 mostram a tensão variando com a distância em cada ramo.

Tabela 9 – Tensões nas barras conectadas ao Grupo 1 em condição normal

Barra	Distância do Grupo 1 [km]	Madrugada [pu]	Manhã [pu]	Tarde [pu]	Noite [pu]	Ramo Alimentador
2300	0	0.9992	0.9987	0.9988	0.9977	
2100	0	1.0092	1.0057	1.0069	0.9987	
1051	1.24	1.0060	1.0029	1.0040	0.9973	CPC_01
1052	1.79	1.0070	1.0019	1.0036	0.9919	CPC_01
1053	2.71	1.0040	0.9844	0.9904	0.9479	CPC_01
1054	2.04	0.9872	0.9694	0.9762	0.9427	CPC_01
1041	2.98	1.0051	1.0015	1.0028	0.9952	EPE_01
1941	4.84	1.0014	0.9994	1.0001	0.9942	EPE_01
1042	6.69	1.0099	0.9925	0.9978	0.9617	EPE_01
1043	8.65	0.9955	0.9813	0.9866	0.9600	EPE_01

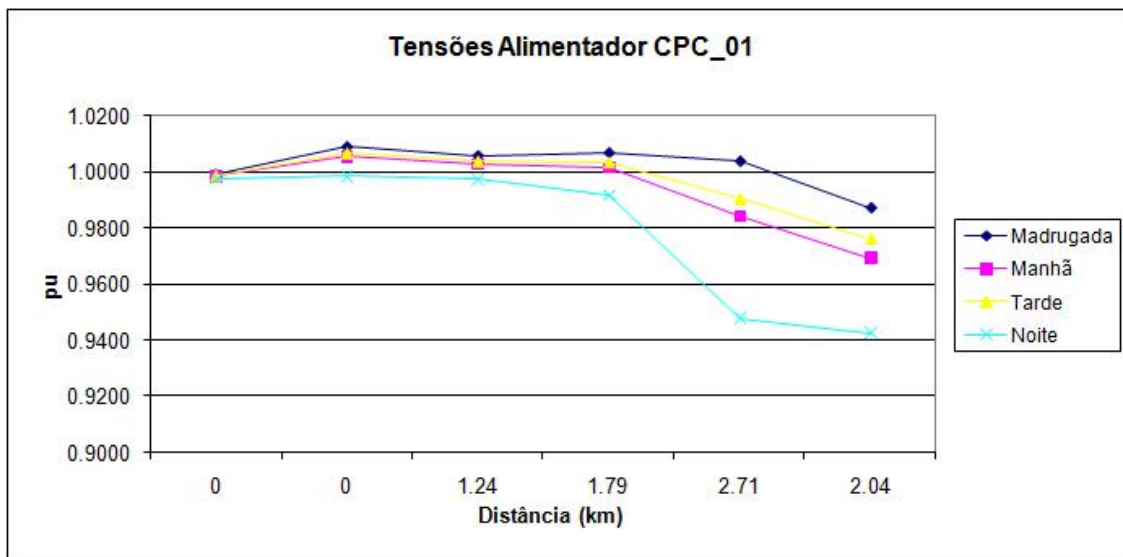


Figura 13. Tensões no decorrer do alimentador CPC_01 em condição normal

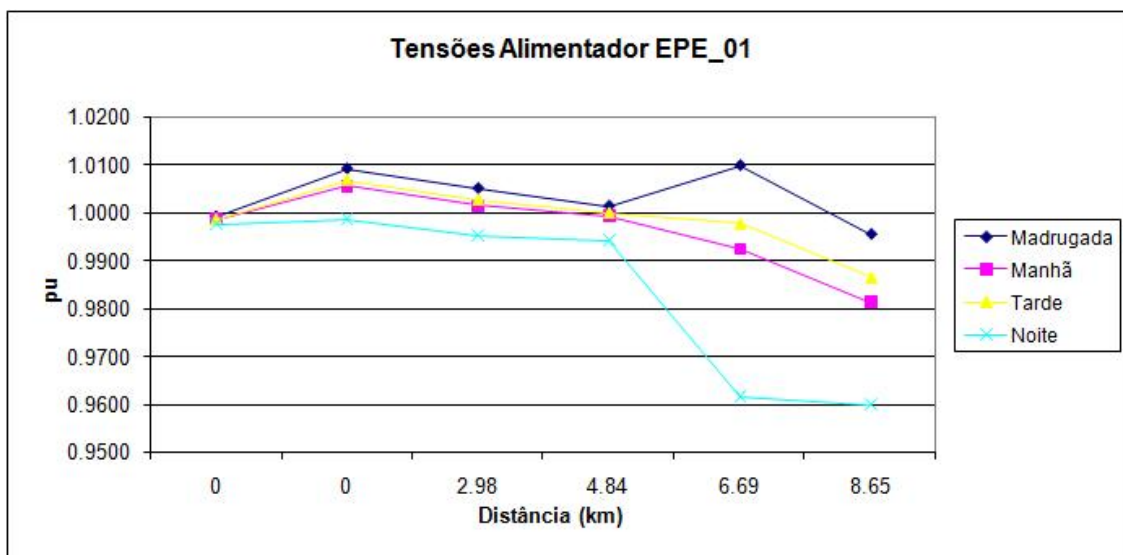


Figura 14. Tensões no decorrer do alimentador EPE_01 em condição normal

De acordo com a Tabela 9 podemos perceber, nesse grupo de barras, uma situação um pouco pior de valor de tensão. A menor tensão, 0,9427pu, é encontrada no período da noite no barramento 1054, que é o mais distante no alimentador CPC_01, como visto na Figura 13. O maior valor é encontrado no período da madrugada, sendo de 1,0099pu, na barra 1042, que possui um banco de capacitores de 1200kVAr. Também existem bancos de capacitores nas barras 1941 e 1051 de 1200kVAr e 600kVAr, respectivamente. Ambos os valores, máximo e mínimo, encontrados neste grupo de barramentos, 0,9427pu e 1,01pu, também se encontram inclusos na faixa de valores considerados adequados pela ANEEL.

A Tabela 10, por sua vez, mostra as tensões nos barramentos que compõem os alimentadores iniciados no Grupo 2 de geradores. As Figuras 15 e 16 mostram as tensões nestes alimentadores em função da distância do ponto de origem.

Tabela 10 - Tensões nas barras conectadas ao Grupo 2 em condição normal

Barra	Distância do Grupo 2 [km]	Madrugada [pu]	Manhã [pu]	Tarde [pu]	Noite [pu]	Ramo Alimentador
2400	0	0.9990	0.9982	0.9985	0.9971	
2200	0	1.0079	1.0028	1.0045	0.9948	
1021	0.24	0.9952	0.9965	0.9961	0.9962	CPC_02
1921	2.38	0.9869	0.9889	0.9884	0.9908	CPC_02
1022	2.74	1.0159	1.0037	1.0074	0.9822	CPC_02
1922	3.2	1.0027	0.9905	0.9945	0.9728	CPC_02
1023	5.74	0.9909	0.9747	0.9807	0.9508	CPC_02
1024	5.06	0.9978	0.9834	0.9879	0.9634	CPC_02
1091	1.86	1.0044	1.0027	1.0033	0.9989	EPE_02
1991	2.22	1.0053	0.9996	1.0015	0.9882	EPE_02
1092	3.47	1.0068	1.0009	1.0030	0.9918	EPE_02
1093	10.69	1.0065	0.9972	1.0001	0.9840	EPE_02

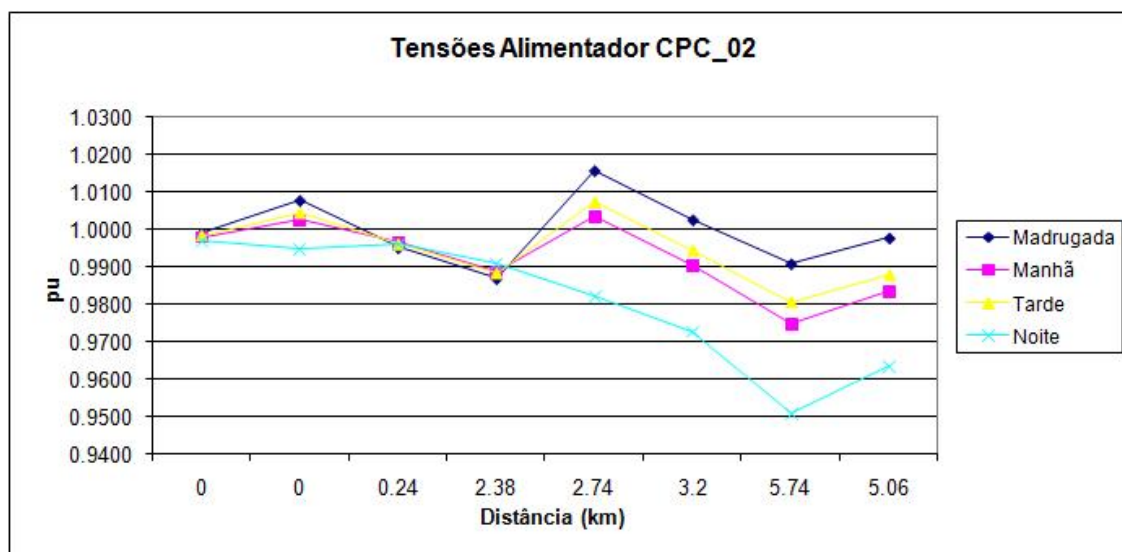


Figura 15. Tensões no decorrer do alimentador CPC_02 em condição normal

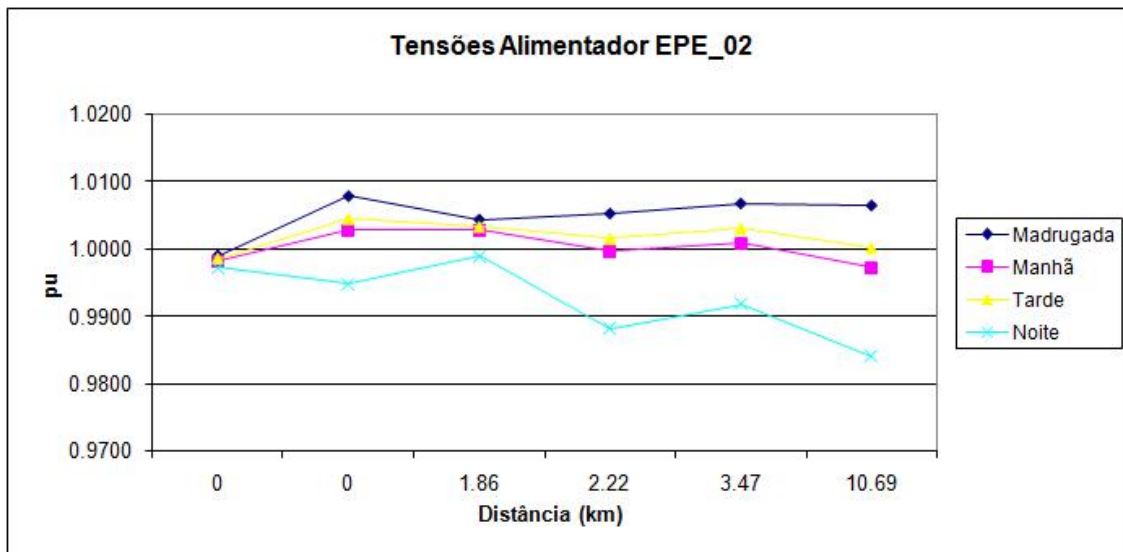


Figura 16. Tensões no decorrer do alimentador EPE_02 em condição normal

Também para estes alimentadores, como visto nas figuras 15 e 16, as menores tensões são verificadas no período da noite. A menor delas é encontrada na barra 1023 com o valor de 0,9508pu. A maior tensão foi constatada no período da madrugada, na barra 1022, em 1,0159pu. Valores estes considerados adequados pela ANEEL.

Existem dois bancos de capacitores de 600kVAr no alimentador CPC_02, nas barras 1921 e 1022 e pode-se observar seus efeitos na Figura 15. No alimentador EPE_02 existe uma banco de 1200kVAr e um de 600kVAr nas barras 1991 e 1092, respectivamente, cujos efeitos de elevação de tensão são verificados na Figura 16.

Das análises em condição normal podemos concluir que os valores de tensão diminuem conforme o aumento da carga e da distância da fonte alimentadora. Os menores valores de tensão em um ramo são encontrados no período da noite, em seus barramentos mais distantes. Também podemos verificar que em todo circuito foram respeitados os valores estabelecidos pela ANEEL para operação adequada.

4.2. Situação Sem Bancos de Capacitores

Mostraremos aqui, como na seção anterior, os perfis de tensão para todo o circuito, porém, desta vez, mostraremos novamente o perfil do alimentador em situação normal, desta forma poderemos comparar as duas situações e verificar a eficiência dos bancos de capacitores para melhoria dos perfis de tensão. Serão mostrados gráficos comparativos para os períodos da noite e madrugada que possuem as demandas máximas e mínimas, respectivamente.

A Tabela 11 mostra as tensões em todas as barras do sistema sem os bancos de capacitores. Pode-se verificar que os valores apresentados são mais baixos do que os valores em condição normal apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10, sendo a menor tensão encontrada na barra 1053 em 0,91pu no período da noite.

Tabela 11 – Tensões no circuito sem bancos de capacitores

Barra	Madrugada [pu]	Manhã [pu]	Tarde [pu]	Noite [pu]
1000	0.9949	0.9953	0.9952	0.9952
1300	0.9761	0.9807	0.9792	0.9851
1200	0.9693	0.9731	0.9721	0.9782
2300	0.9973	0.9968	0.9970	0.9960
2400	0.9969	0.9962	0.9964	0.9951
2100	0.9964	0.9931	0.9941	0.9870
2200	0.9933	0.9883	0.9900	0.9809
1021	0.9818	0.9834	0.9829	0.9833
1041	0.9910	0.9876	0.9888	0.9818
1051	0.9885	0.9856	0.9867	0.9805
1091	0.9862	0.9847	0.9853	0.9813
1031	0.9802	0.9823	0.9817	0.9835
1061	0.9851	0.9841	0.9845	0.9810
1971	0.9801	0.9801	0.9803	0.9785
1081	0.9760	0.9774	0.9771	0.9780
1921	0.9739	0.9761	0.9756	0.9781
1941	0.9888	0.9869	0.9876	0.9825
1052	0.9924	0.9875	0.9891	0.9784
1991	0.9907	0.9852	0.9870	0.9746
1931	0.9918	0.9867	0.9883	0.9770
1062	0.9916	0.9865	0.9881	0.9766
1071	0.9846	0.9758	0.9783	0.9623
1022	0.9779	0.9662	0.9696	0.9484
1042	0.9658	0.9490	0.9539	0.9233
1053	0.9597	0.9406	0.9462	0.9100
1092	0.9915	0.9858	0.9878	0.9773
1032	0.9769	0.9646	0.9691	0.9474
1072	0.9745	0.9611	0.9660	0.9424
1023	0.9689	0.9528	0.9587	0.9310
1043	0.9730	0.9590	0.9642	0.9395
1054	0.9646	0.9469	0.9535	0.9226
1093	0.9846	0.9755	0.9784	0.9629
1073	0.9830	0.9732	0.9763	0.9597
1922	0.9775	0.9654	0.9693	0.9484
1024	0.9725	0.9581	0.9626	0.9390

As Figuras 17 e 18 mostram as tensões no alimentador GPR_01, com e sem os bancos de capacitores, nos períodos da noite e madrugada, respectivamente

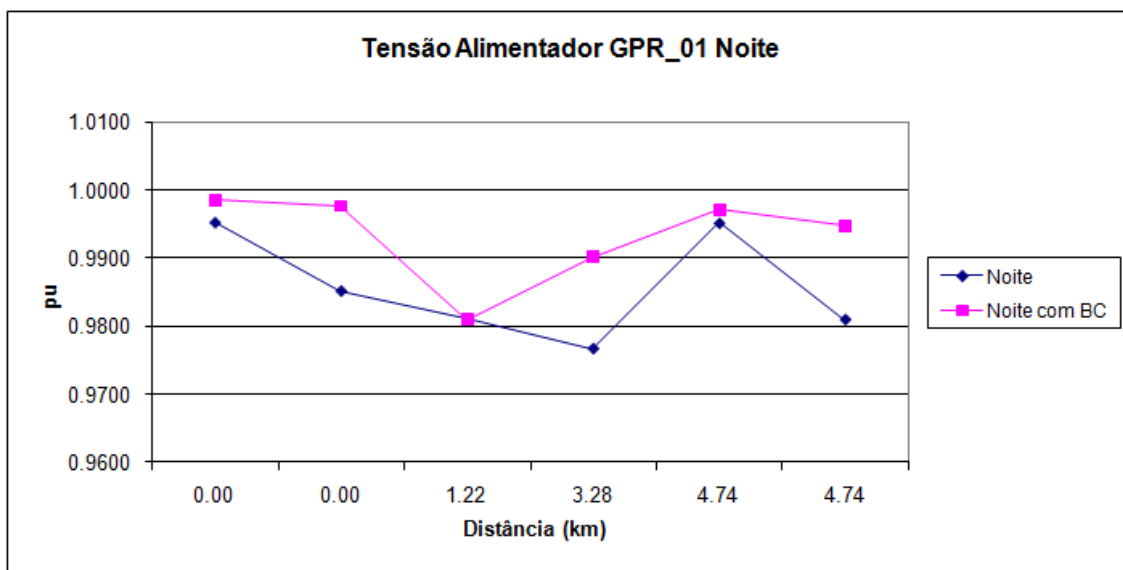


Figura 17. Tensões no alimentador GPR_01 a noite com e sem BC

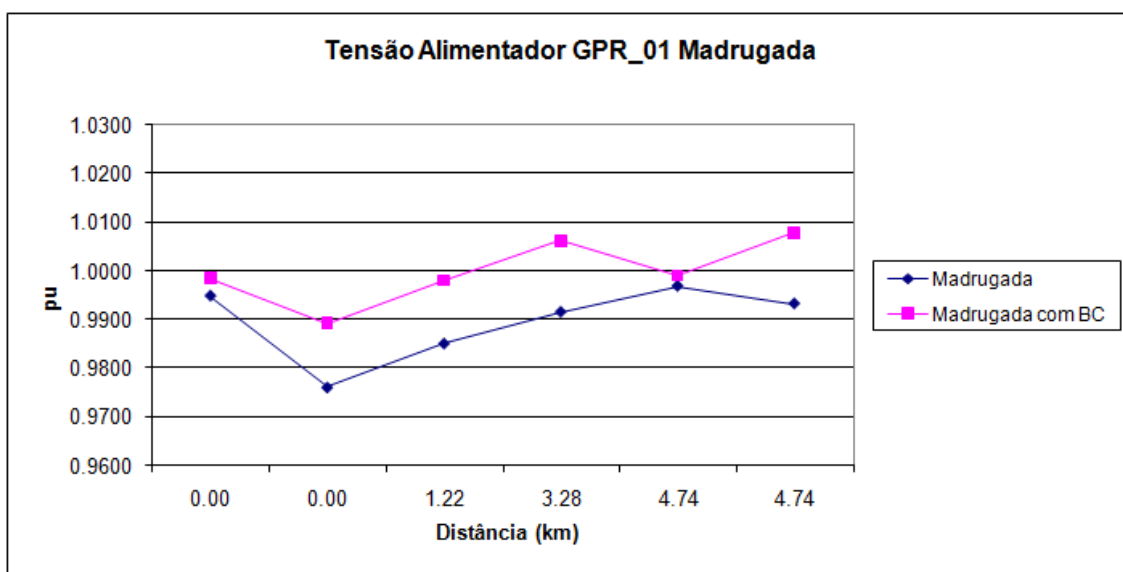


Figura 18. Tensões no alimentador GPR_01 na madrugada com e sem BC

É interessante notar que, mesmo não existindo nenhum banco de capacitores conectado às barras do alimentador GPR_01, os valores de tensão são menores quando retiramos os bancos de capacitores das outras barras do circuito. Isso se deve ao fato da diminuição dos reativos circulantes em todo sistema quando da inclusão dos bancos de capacitores, quando os capacitores são retirados, a potência reativa consumida pelo circuito aumenta, provocando queda de tensão em todo circuito.

As Figuras 19 e 20 mostram as tensões no alimentador GPR_02 em nos períodos críticos. Neste alimentador, na barra 1931, existe um banco de capacitores de 1200kVAr, chamado de C1, indicado nas figuras.

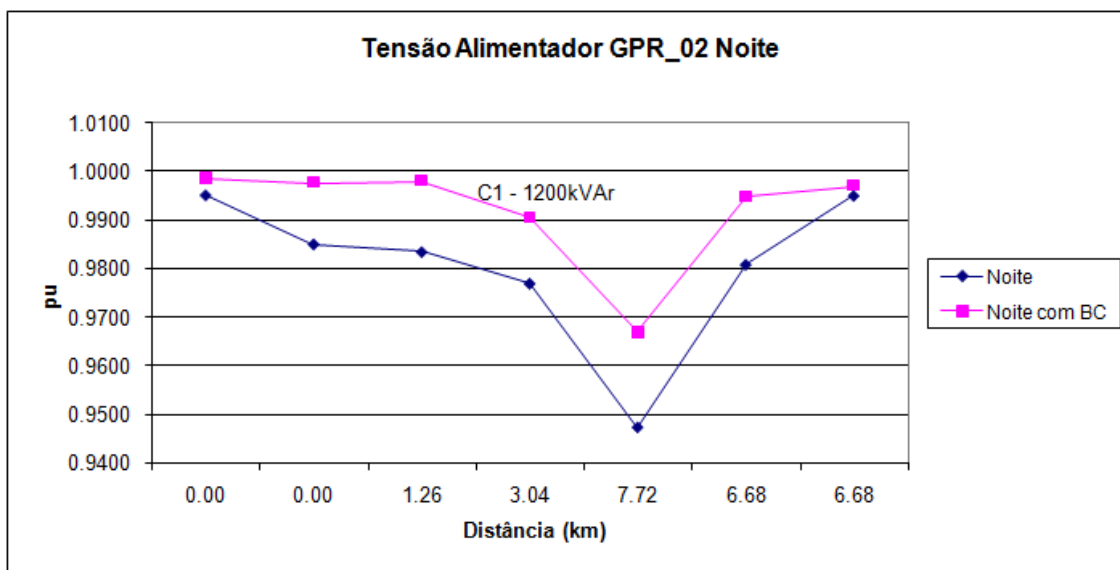


Figura 19. Tensões no alimentador GPR_02 à noite com e sem BC

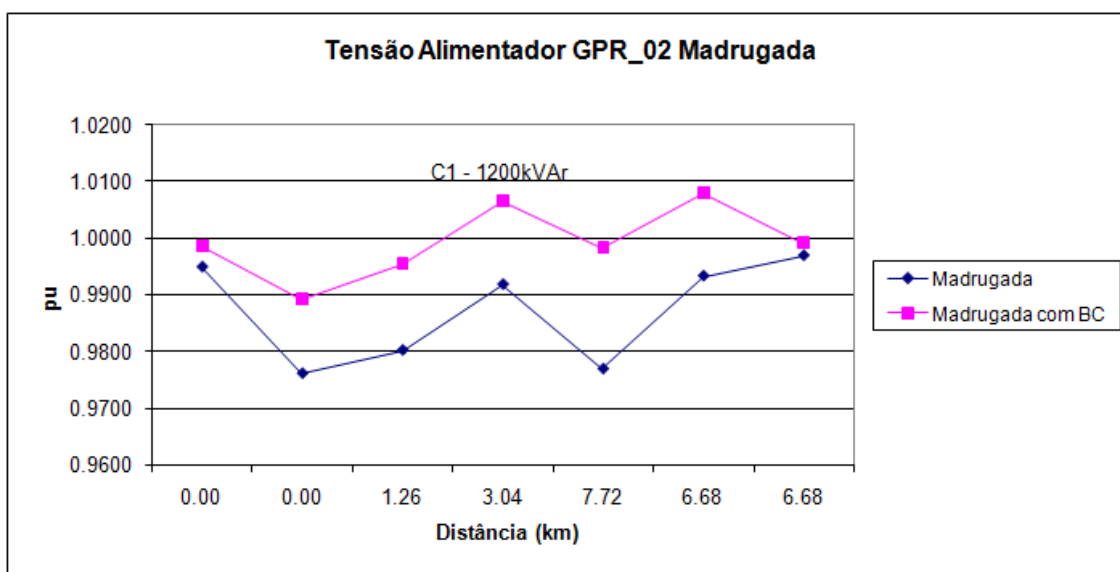


Figura 20. Tensões no alimentador GPR_02 na madrugada com e sem BC

Podemos notar que os valores de tensão no fim dos ramos, ou seja, próximo ao Grupo 2 de geradores, são mais altos e muito próximos quando comparamos as configurações com e sem bancos de capacitores. De modo geral, como as cargas conectadas às barras são as mesmas nas duas configurações, é notável que a curva de perfil de tensão no decorrer do alimentador sem bancos de capacitores “acompanha” a curva da configuração com os capacitores, apenas com valores mais baixos, como esperado.

As Figuras 21 e 22 mostram as tensões no alimentador GPR_03 com o banco de capacitores C2 de 600kVAr conectado à barra 1971.

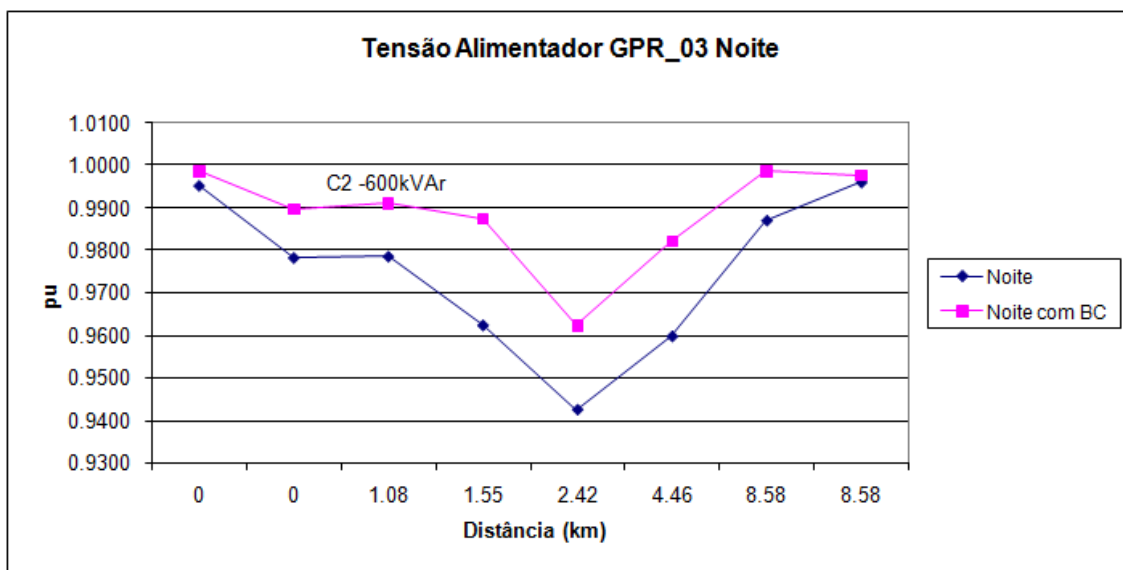


Figura 21. Tensões no alimentador GPR_03 à noite com e sem BC

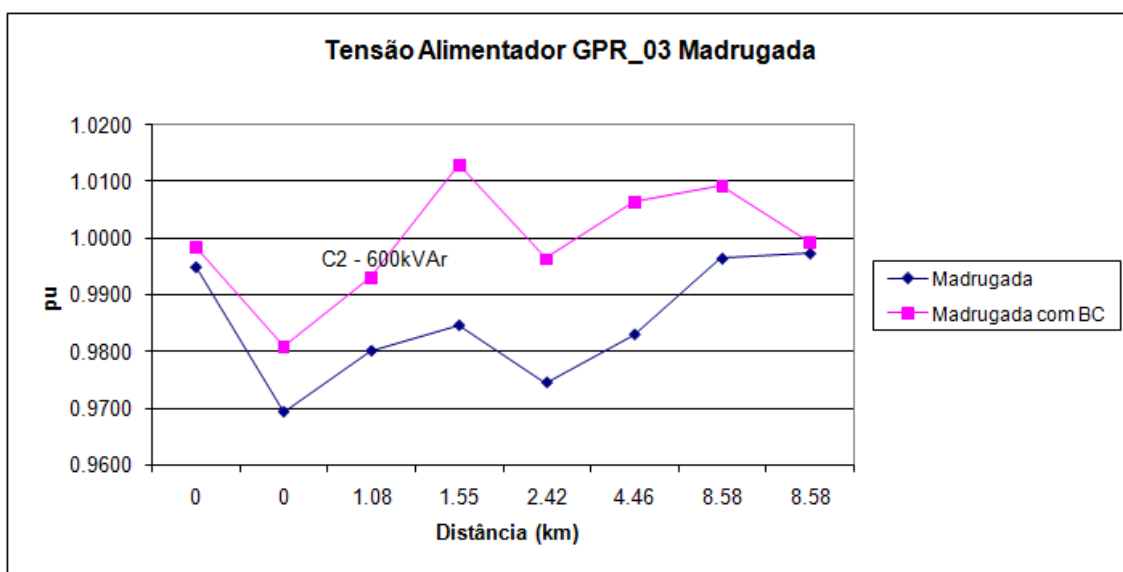


Figura 22. Tensões no alimentador GPR_03 na madrugada com e sem BC

No alimentador GPR_03, mostrado nos gráficos acima, podemos verificar grandes diferenças nos valores de tensão entre as configurações com e sem bancos de capacitores e as melhoras significativas provocadas na qualidade da energia elétrica envolvida pela inserção dos bancos de capacitores.

Finalizando os ramos da SE-01, temos o alimentador GPR_04, cujas tensões nos períodos da noite e madrugada são mostradas nas Figuras 23 e 24 abaixo:

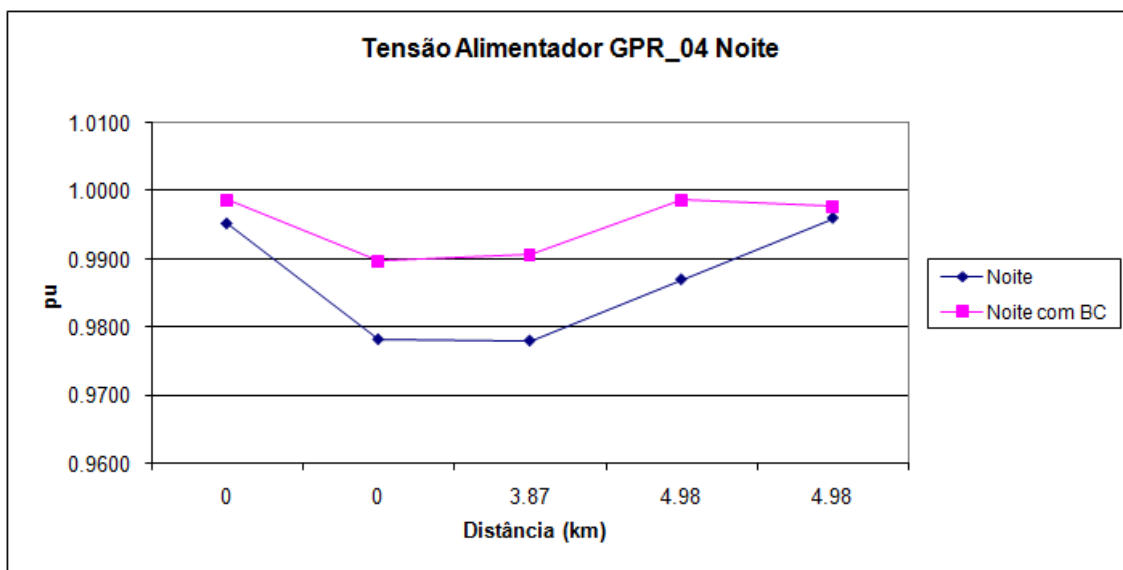


Figura 23. Tensões no alimentador GPR_04 à noite com e sem BC

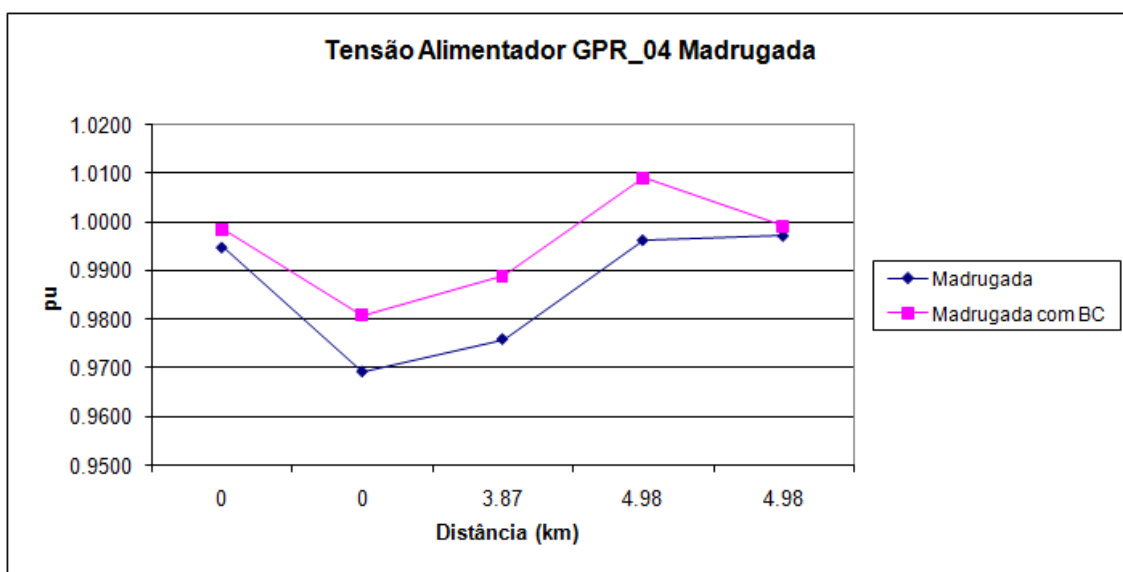


Figura 24. Tensões no alimentador GPR_04 na madrugada com e sem BC

O alimentador GPR_04 também não possui banco de capacitores, mesmo assim, como averiguado no alimentador GPR_01, o acréscimo de capacitores em outros pontos do sistema afeta a tensão inclusive nestes alimentadores, visto que todo o sistema está interligado.

As Figuras 25 e 26 mostram as tensões no alimentador radial CPC_01 que se inicia no Grupo 1 de geradores e possui, originalmente, um banco de capacitores de 600kVAR na barra 1051.

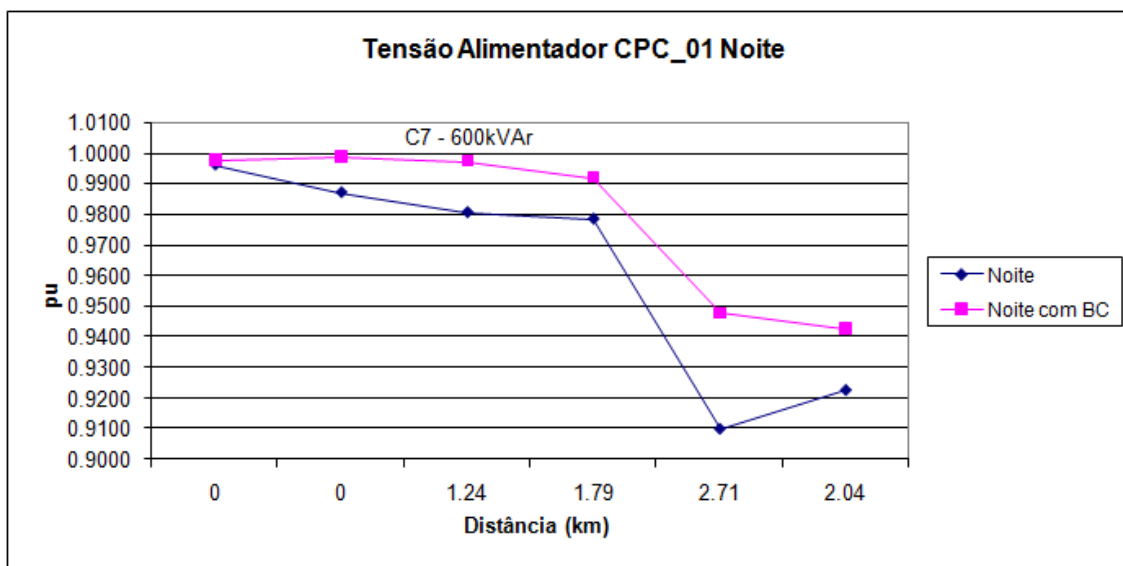


Figura 25. Tensões no alimentador CPC_01 à noite com e sem BC

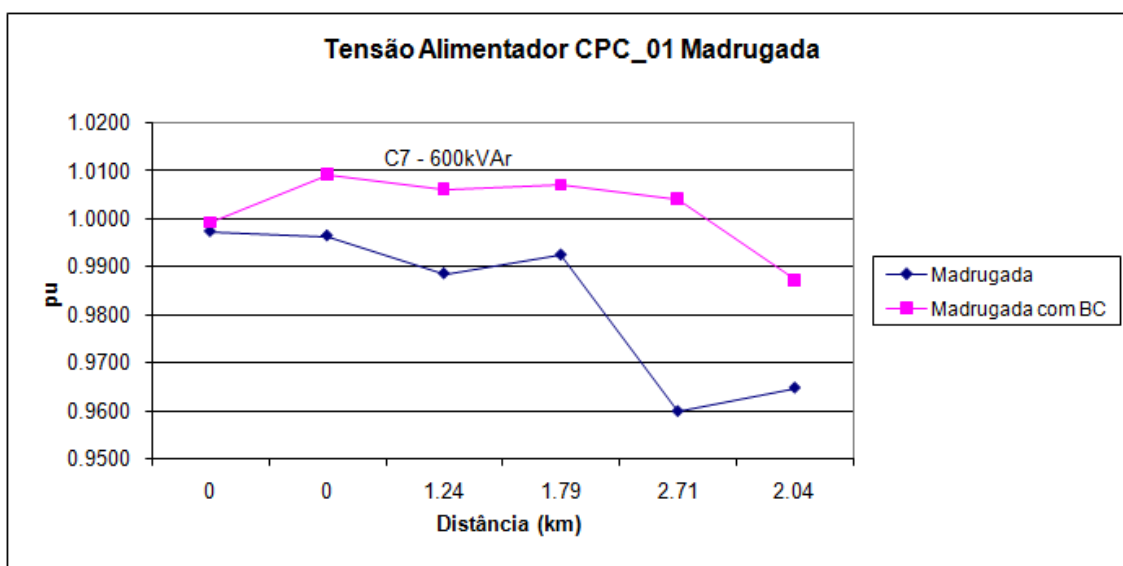


Figura 26. Tensões no alimentador CPC_01 na madrugada com e sem BC

Neste alimentador podemos notar claramente os efeitos do banco de capacitores no comportamento da tensão nas barras. A retirada dos bancos de capacitores do sistema provocou significativa diminuição nos valores de tensão, pode ser vista a influência direta do banco C7 elevando a tensão principalmente no período em que as cargas são mais baixas, no qual as curvas mais se distanciam.

Também no alimentador CPC_01, quando retirados os bancos de capacitores, verificamos a primeira ocorrência de valores de tensão fora da faixa chamada adequada. As tensões mínimas encontradas são de 0,91pu e 0,9226pu, nas barras 1053 e 1054, respectivamente,

no período da noite. De acordo com a ANEEL, [13], valores entre 0,90pu e 0,93pu, estão na faixa chamada precária.

O último ramo radial que parte do Grupo 1 de geradores é o EPE_01 que possui 2 bancos de capacitores de 1200kVAr nas barras 1941 e 1042, mostrados nas Figuras 27 e 28.

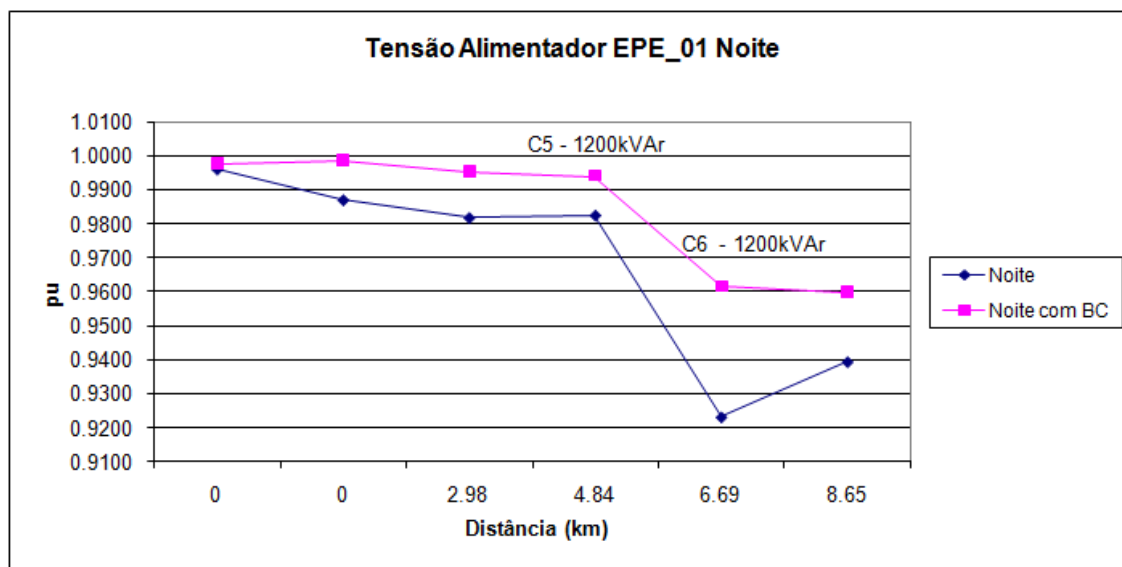


Figura 27. Tensões no alimentador CPC_01 à noite com e sem BC

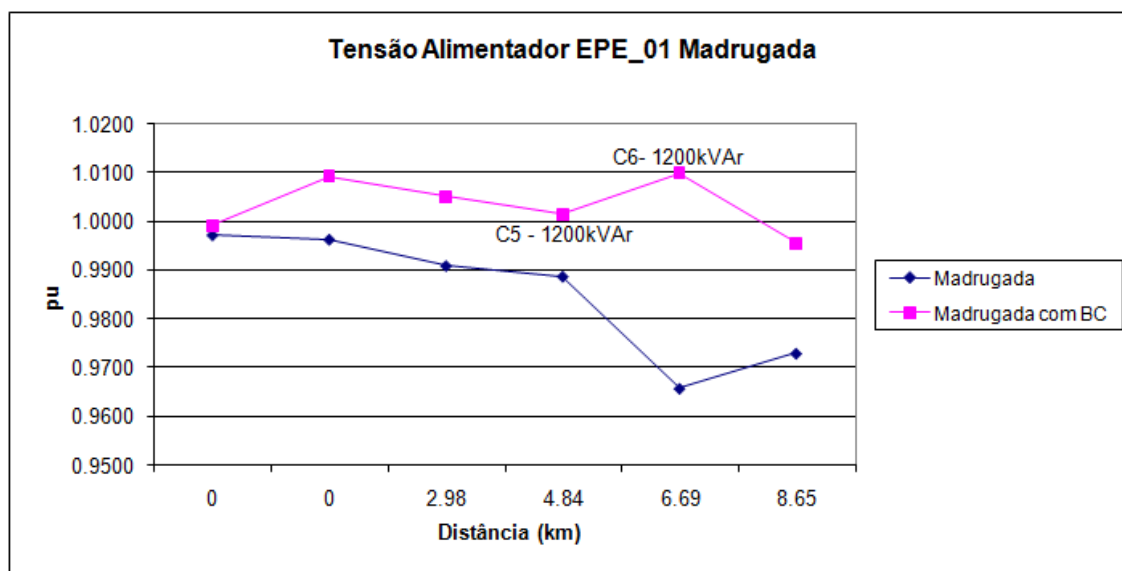


Figura 28. Tensões no alimentador CPC_01 na madrugada com e sem BC

Existem cargas relativamente grandes, com alta parcela reativa, conectadas ao alimentador EPE_01, assim podemos notar entre o período noturno, de maior carga, e o da madrugada, de menor carga, uma diferença acentuada nos valores de tensão principalmente depois das barras onde estão instalados os capacitores. Esta é uma dificuldade típica da instalação de

bancos de capacitores, em períodos de pouca carga a tensão pode subir para valores além daqueles considerados adequados pela ANEE.

Na barra 1042, no período de maior carga, encontramos uma tensão de 0,9233 que é considerada precária pela ANEEL.

O Grupo 2 de geradores possui dois ramos radiais, o CPC_02 e o EPE_02. As Figuras 29 e 30 mostram as tensões no alimentador CPC_02 nos períodos de carga em estudo.

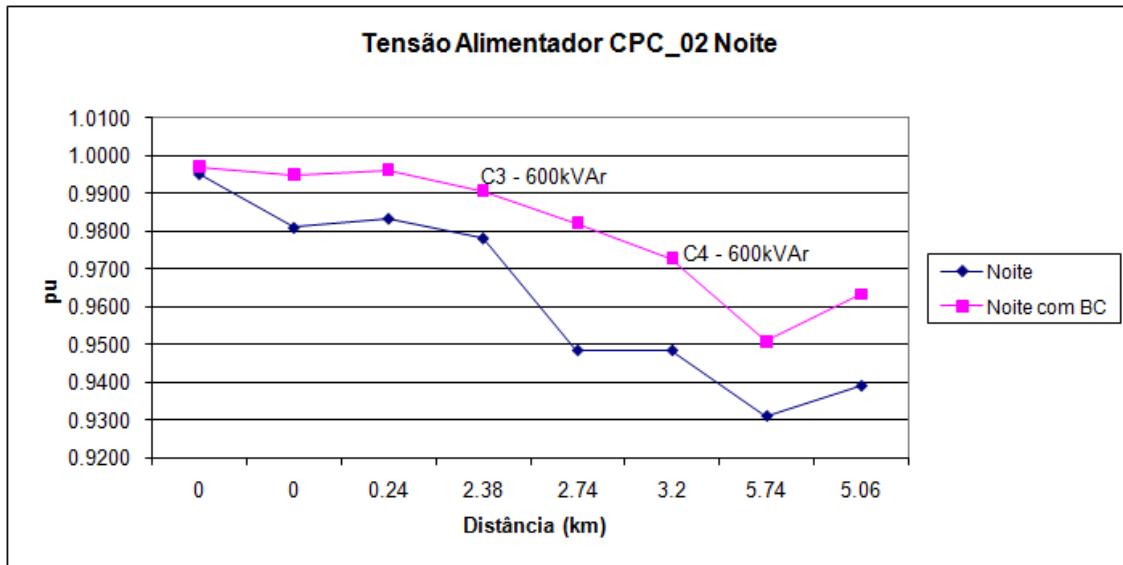


Figura 29. Tensões no alimentador CPC_02 à noite com e sem BC

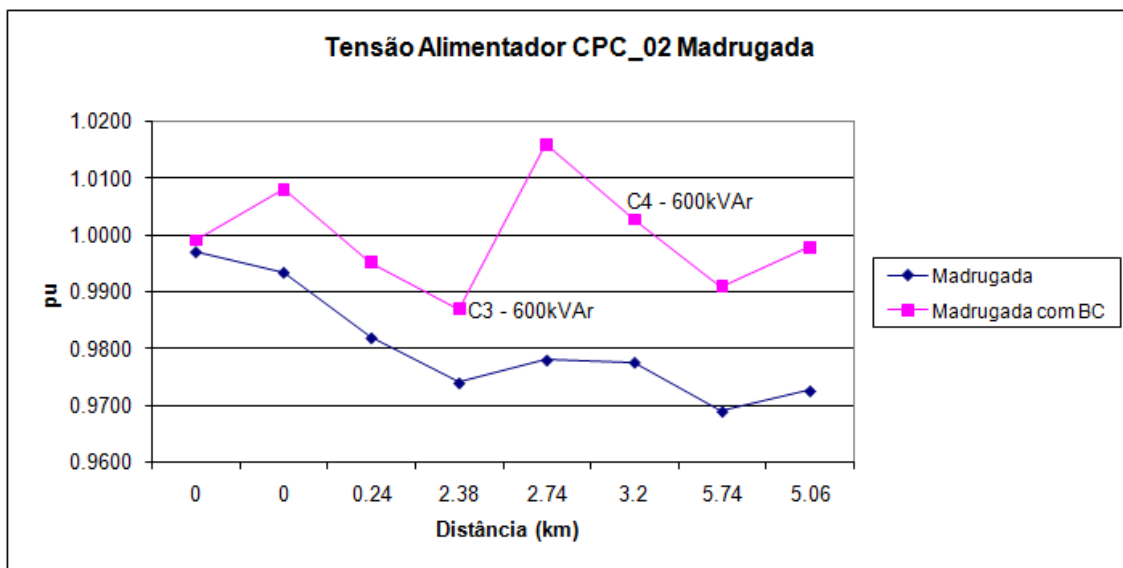


Figura 30. Tensões no alimentador CPC_02 na madrugada com e sem BC

Como pode ser constatado, a atuação dos bancos de capacitores C3 e C4 de 600kVAr, conectados às barras 1921 e 1922, respectivamente, provoca elevados picos de tensão em períodos de menor carga. Todavia, o limites de tensão considerados adequados pela ANEEL foram respeitados.

A barra 1022, por exemplo, apresenta tensão de 1,0159pu na madrugada, enquanto a tensão neste mesmo ponto, se não existissem os bancos de capacitores, seria de 0,9779pu no mesmo período; já no período da noite, de maior carga, a tensão verificada no mesmo barramento, com os bancos de capacitores, é de 0,9822pu. Ou seja, a instalação dos capacitores provoca uma grande elevação da tensão nos períodos de pouca demanda, enquanto nos períodos de alta carga, a tensão fica mais próxima do que seria sem os capacitores.

As Figuras 31 e 32 finalizam o circuito mostrando as tensões no grupo alimentador EPE_02 que em sua configuração original possui um banco de capacitores de 1200kVAr na barra 1991 e um de 600kVAr conectado à barra 1092.

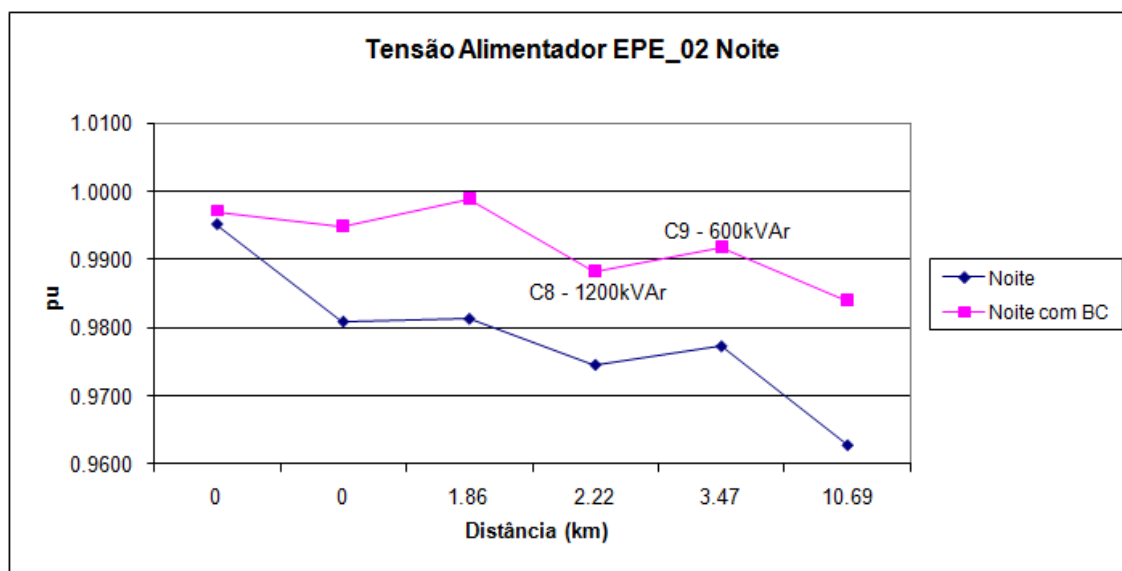


Figura 31. Tensões no alimentador EPE_02 à noite com e sem BC

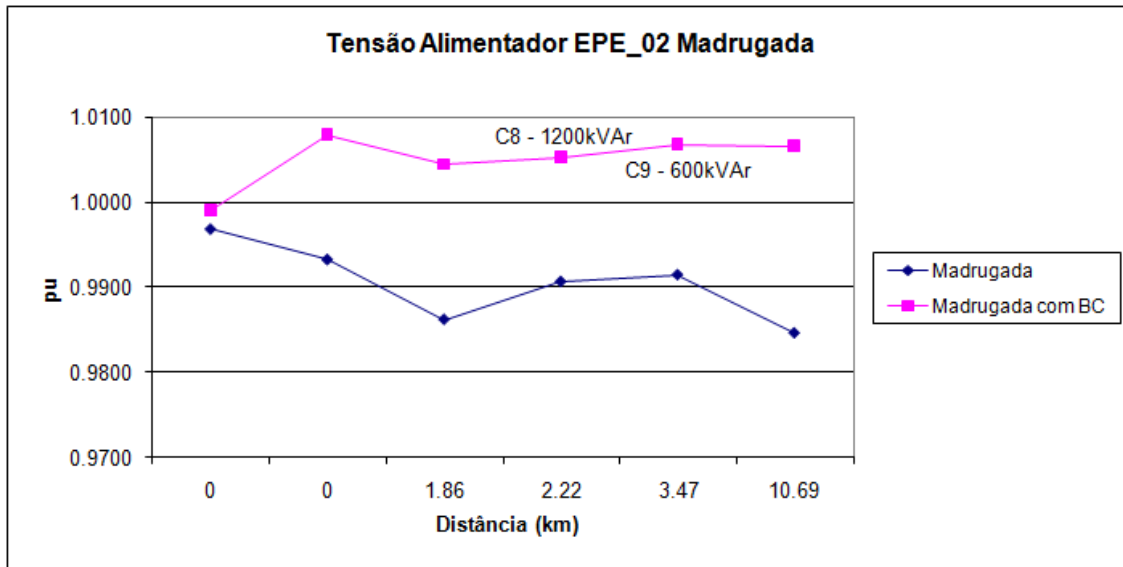


Figura 32. Tensões no alimentador EPE_02 na madrugada com e sem BC

Para este alimentador também é possível observar não somente o efeito de aumento da tensão devido à inclusão dos bancos de capacitores, mas também perfis de tensão com menos variações no decorrer do alimentador. Mais uma vez a faixa de tensão considerada adequada foi respeitada.

De forma geral podemos concluir que a presença dos capacitores é fundamental para manutenção dos valores de tensão em níveis adequados. Como visto, ao retirar-se os bancos de capacitores do sistema, é observada queda de tensão em todos os ramos alimentadores, inclusive naqueles que não possuem capacitores. Em alguns casos, no período de maior demanda, os níveis de tensão sem BCs chegam a valores menores que 0,90pu, considerados críticos pela ANEEL.

4.3. Situação Sem Geração Distribuída

Nesta seção mostraremos os perfis de tensão nos alimentadores do circuito sem a presença dos grupos geradores. Comparando os resultados com os obtidos para a configuração original, será possibilitada a verificação dos efeitos da inserção de cogeradores nos valores de tensão de um sistema.

Para compreensão e estudo dos efeitos da inserção de geradores distribuídos no sistema, foram levantados os valores de tensão em todos os barramentos de interesse nos quatro períodos de carga com os geradores desligados. No *OpenDSS* isso pode ser feito mudando-se o valor do parâmetro “enable” de “y” para “n” nas linhas de declaração dos grupos geradores. Os resultados são mostrados na Tabela 12:

Tabela 12 – Tensões nos circuito sem os geradores distribuídos

Barra	Madrugada [pu]	Manhã [pu]	Tarde [pu]	Noite [pu]
1000	1.0029	0.9953	0.9978	0.9850
1300	1.0214	0.9998	1.0069	0.9727
1200	1.0220	1.0041	1.0101	0.9771
2300	1.0121	0.9783	0.9894	0.9285
2400	1.0058	0.9644	0.9779	0.9168
2100	1.0121	0.9783	0.9894	0.9285
2200	1.0058	0.9644	0.9779	0.9168
1021	1.0158	0.9883	0.9973	0.9544
1041	1.0072	0.9701	0.9822	0.9267
1051	1.0111	0.9756	0.9872	0.9339
1091	1.0144	0.9814	0.9922	0.9423
1031	1.0184	0.9920	1.0007	0.9599
1061	1.0138	0.9861	0.9952	0.9444
1971	1.0149	0.9903	0.9984	0.9529
1081	1.0177	0.9955	1.0029	0.9617
1921	1.0195	0.9985	1.0055	0.9667
1941	1.0130	0.9824	0.9926	0.9366
1052	1.0099	0.9743	0.9860	0.9214
1991	1.0082	0.9720	0.9839	0.9177
1931	1.0093	0.9735	0.9852	0.9201
1062	1.0091	0.9733	0.9850	0.9197
1071	1.0158	0.9753	0.9884	0.9176
1022	1.0189	0.9748	0.9890	0.9124
1042	1.0130	0.9629	0.9790	0.8931
1053	1.0071	0.9545	0.9715	0.8802
1092	1.0047	0.9625	0.9763	0.9140
1032	0.9961	0.9469	0.9630	0.8908
1072	0.9941	0.9438	0.9603	0.8865
1023	0.9887	0.9356	0.9530	0.8758
1043	0.9933	0.9424	0.9591	0.8844
1054	0.9851	0.9304	0.9483	0.8684
1093	1.0043	0.9580	0.9730	0.9059
1073	1.0043	0.9571	0.9724	0.9042
1922	1.0005	0.9508	0.9670	0.8950
1024	0.9956	0.9435	0.9601	0.8862

Da Tabela 12 acima podemos concluir que, principalmente no período da noite, os níveis de tensão caem bastante, chegando ao valor de 0.8684pu na barra 1054, simplesmente pela retirada dos geradores, valor este considerado crítico pelos padrões da ANEEL.

Para esta configuração foi assumida que toda potência requerida pelo sistema é fornecida pelo barramento infinito da SE-01. Mostraremos aqui os efeitos na tensão da retirada dos Grupos 1 e 2 apenas para os períodos da noite e madrugada que são os mais críticos pois possuem a maior e menor carga do sistema, respectivamente.

As Figuras 33 a 40 mostram a comparação das tensões do circuito original com e sem GD para os alimentadores que partem da SE-01.

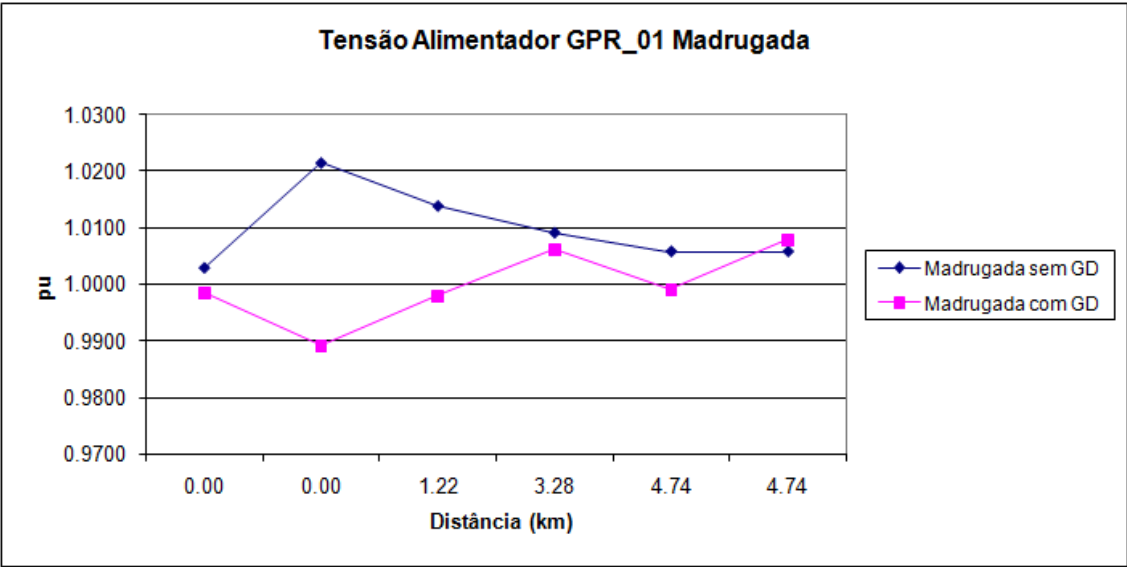


Figura 33. Tensões no alimentador GPR_01 na madrugada com e sem GD

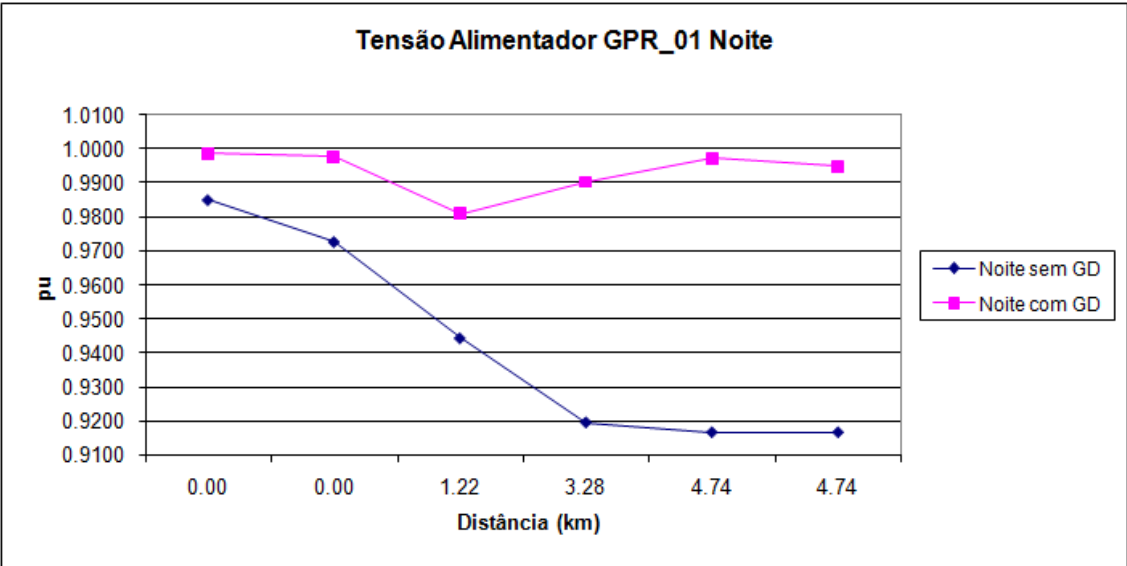


Figura 34. Tensões no alimentador GPR_01 à noite com e sem GD

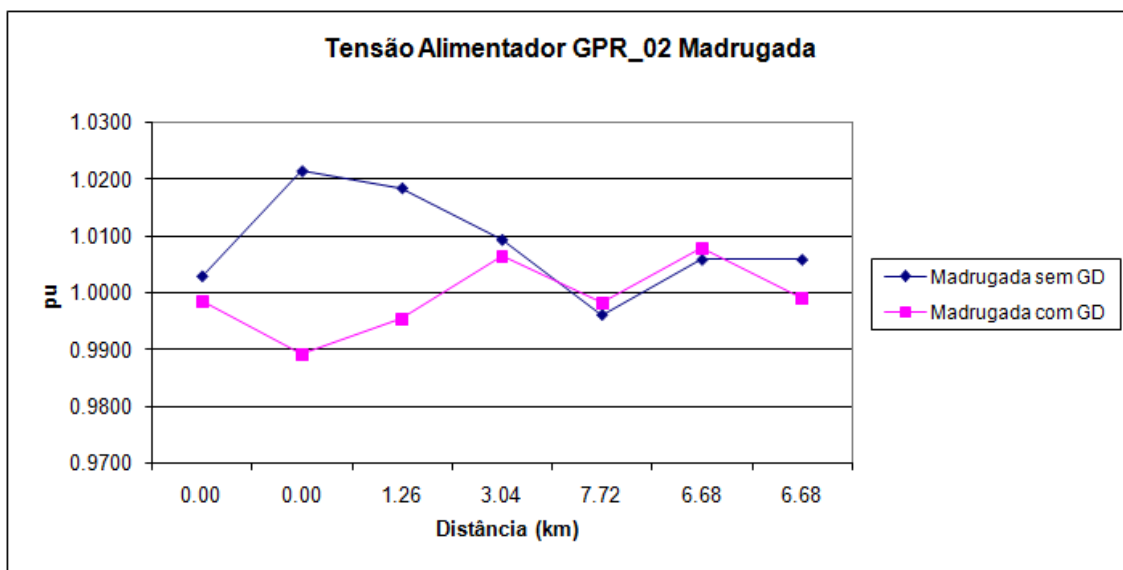


Figura 35. Tensões no alimentador GPR_02 na madrugada com e sem GD

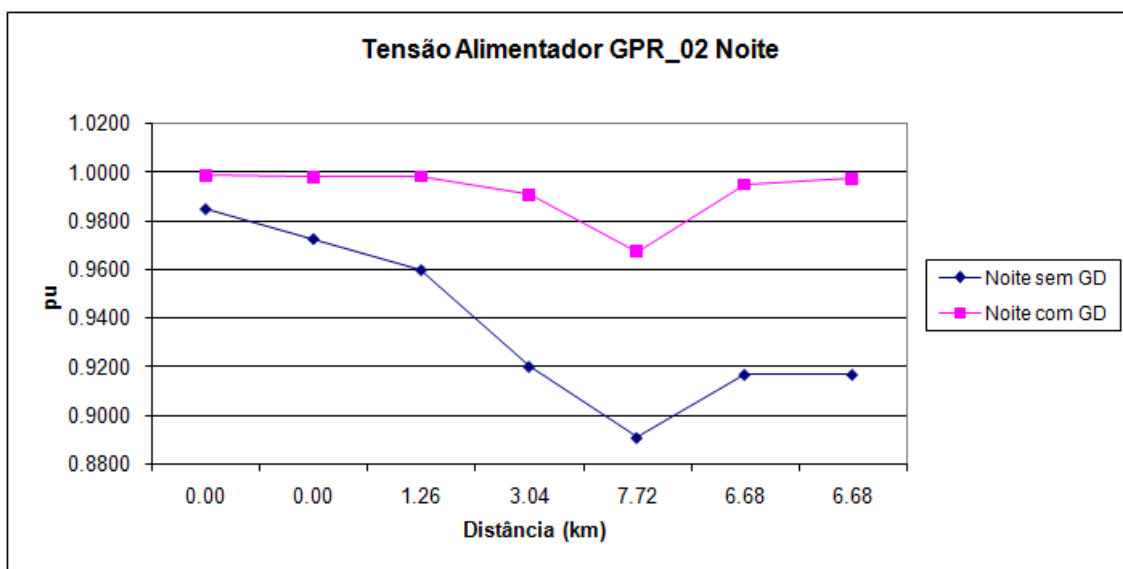


Figura 36. Tensões no alimentador GPR_02 à noite com e sem GD

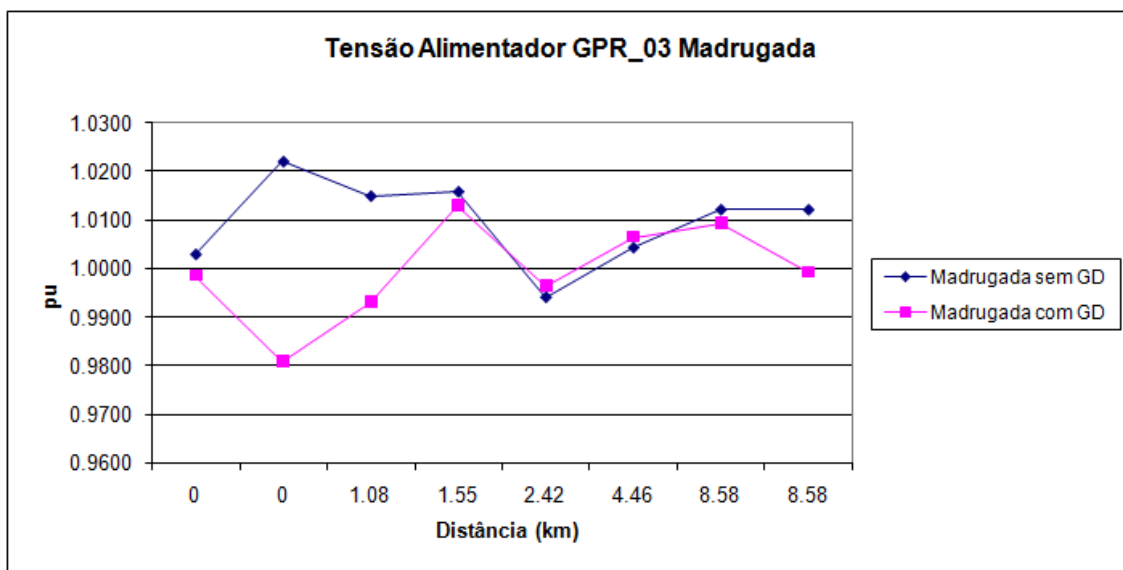


Figura 37. Tensões no alimentador GPR_03 na madrugada com e sem GD

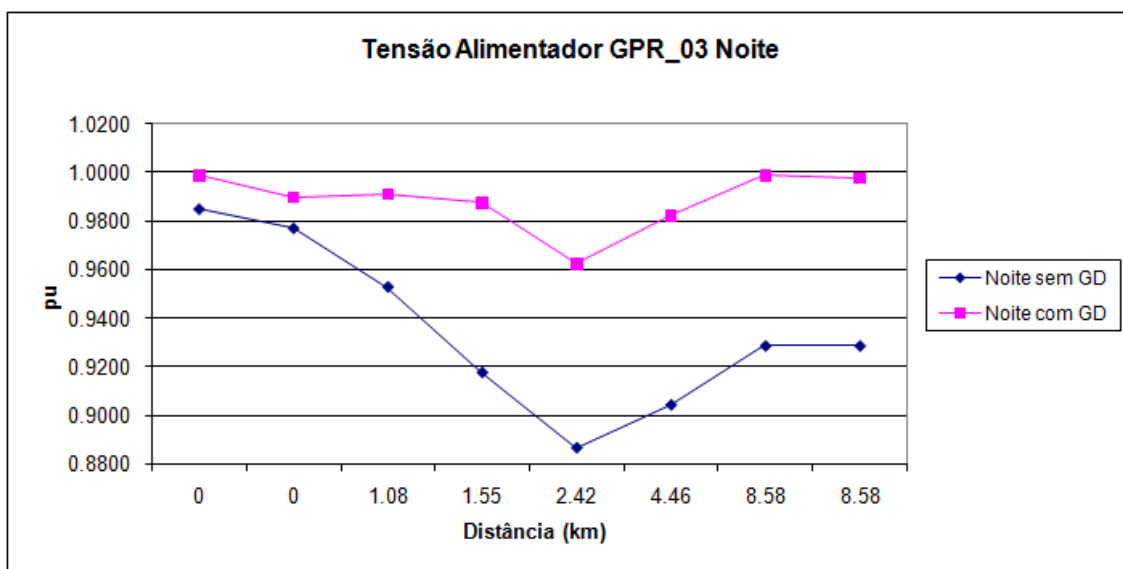


Figura 38. Tensões no alimentador GPR_03 à noite com e sem GD

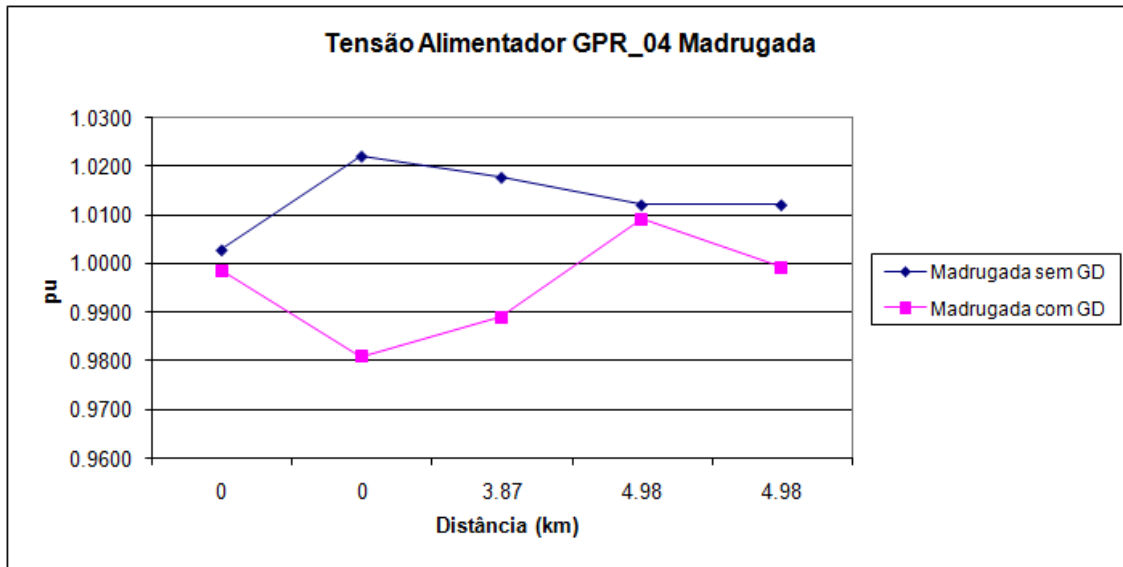


Figura 39. Tensões no alimentador GPR_04 na madrugada com e sem GD

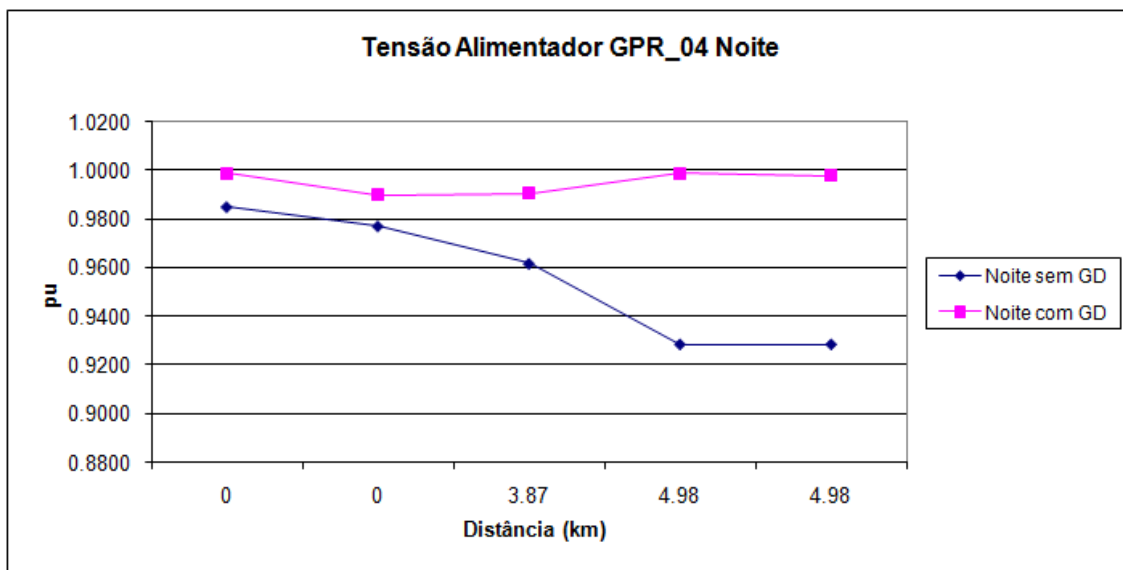


Figura 40. Tensões no alimentador GPR_04 à noite com e sem GD

Podemos observar que nos períodos de menor carga, os valores de tensão se aproximam para ambas configurações nas distâncias mais longas da SE-01, em outras palavras, os valores de tensão nas barras próximas aos geradores são parecidos quando retiramos os geradores. Porém, nestes mesmos períodos, a tensão próxima à SE-01 é maior do que seria com os geradores, isso se deve ao fato de ser a SE-01 a fonte de potência para o sistema, a fim de manter os níveis de tensão nos lugares mais distantes, a tensão nos barramentos mais próximos fica mais alta.

Já nos períodos de maior carga, na noite por exemplo, a retirada dos geradores provoca queda de tensão em todos os barramentos. Em várias localidades são observadas tensões

menores que 0,93pu, consideradas precárias; em algumas barras a tensão cai abaixo de 0,90pu entrando na faixa de valores considerada crítica pela ANEEL. Esse fato demonstra claramente os benefícios da cogeração auxiliando o sistema existente a manter melhores níveis de tensão.

As Figuras 41 a 44 mostram, nos períodos críticos, as tensões nos ramos alimentadores CPC_01 e EPE_01 que partem do Grupo 1 de geradores, agora desligados.

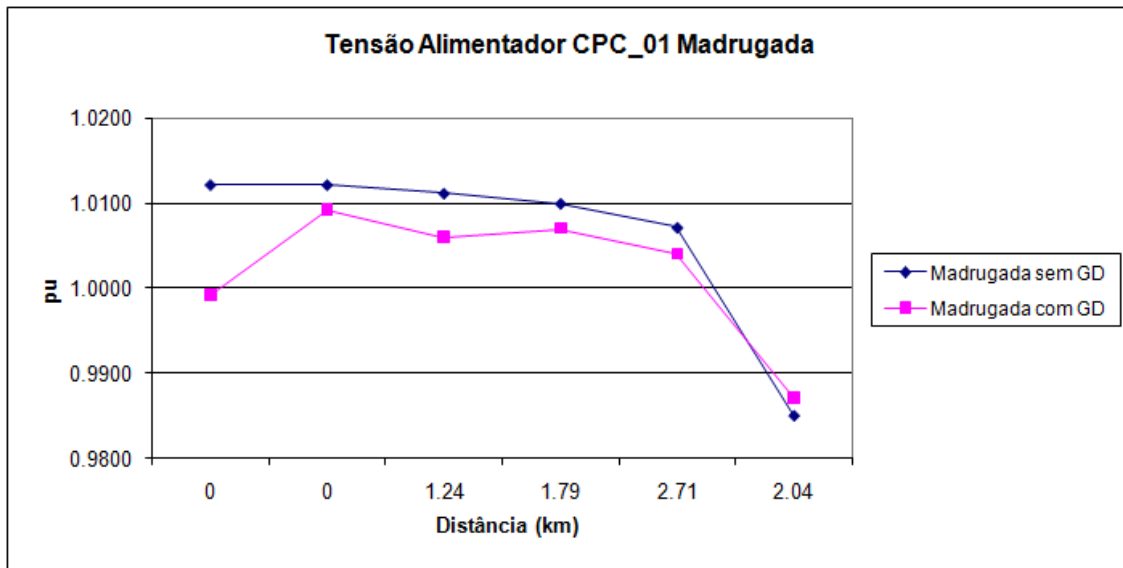


Figura 41. Tensões no alimentador CPC_01 na madrugada com e sem GD

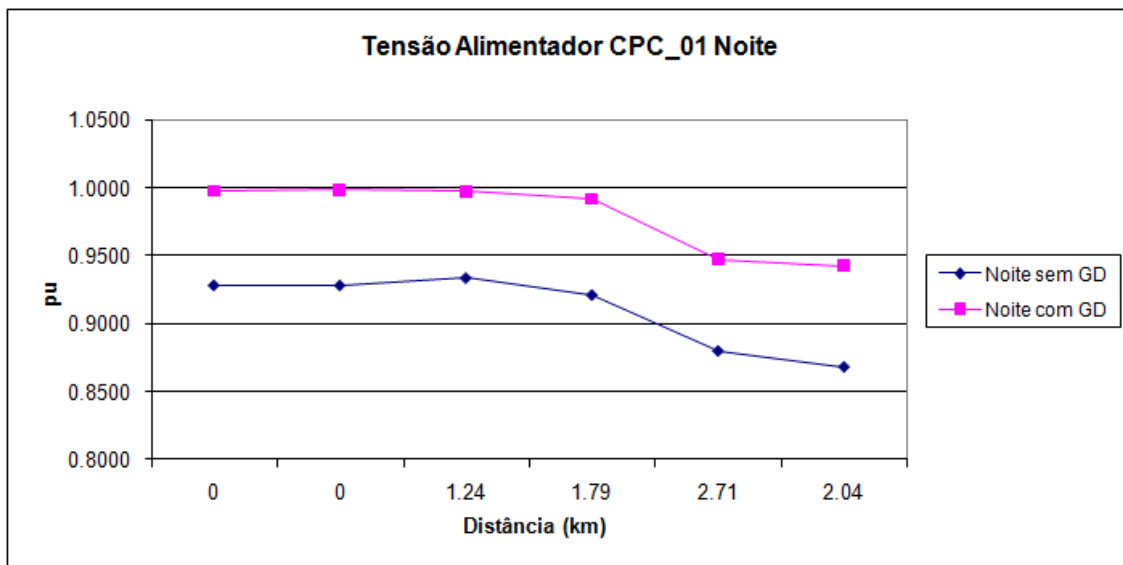


Figura 42. Tensões no alimentador CPC_01 à noite com e sem GD

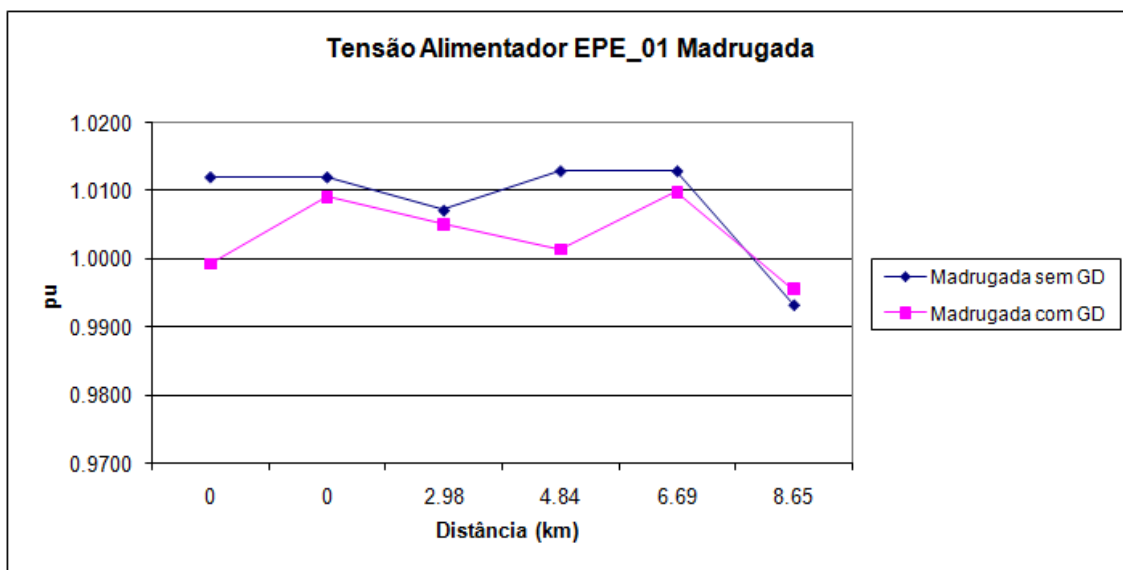


Figura 43. Tensões no alimentador EPE_01 na madrugada com e sem GD

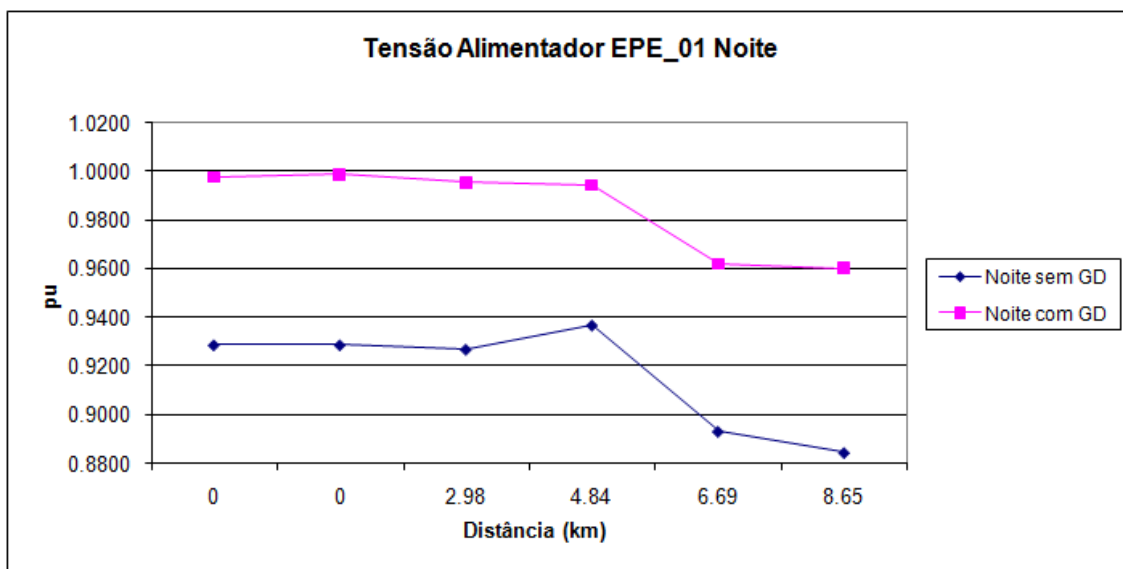


Figura 44. Tensões no alimentador EPE_01 à noite com e sem GD

É interessante notar que no período de menor carga, o sistema sem os geradores responde com perfil de tensão acima ou muito próximo do que seria com os geradores. Porém, no período de maior demanda podemos observar que o sistema sem os geradores apresenta níveis de tensão bem mais baixos, quase sempre encontrados na faixa precária de operação e, em alguns barramentos, na faixa crítica, abaixo de 0,90pu.

As tensões nos ramos CPC_02 e EPE_02 são mostradas nas Figuras 45 a 48 para os períodos de menor e maior carga, comparando os valores do circuito com os geradores distribuídos ativos e inativos.

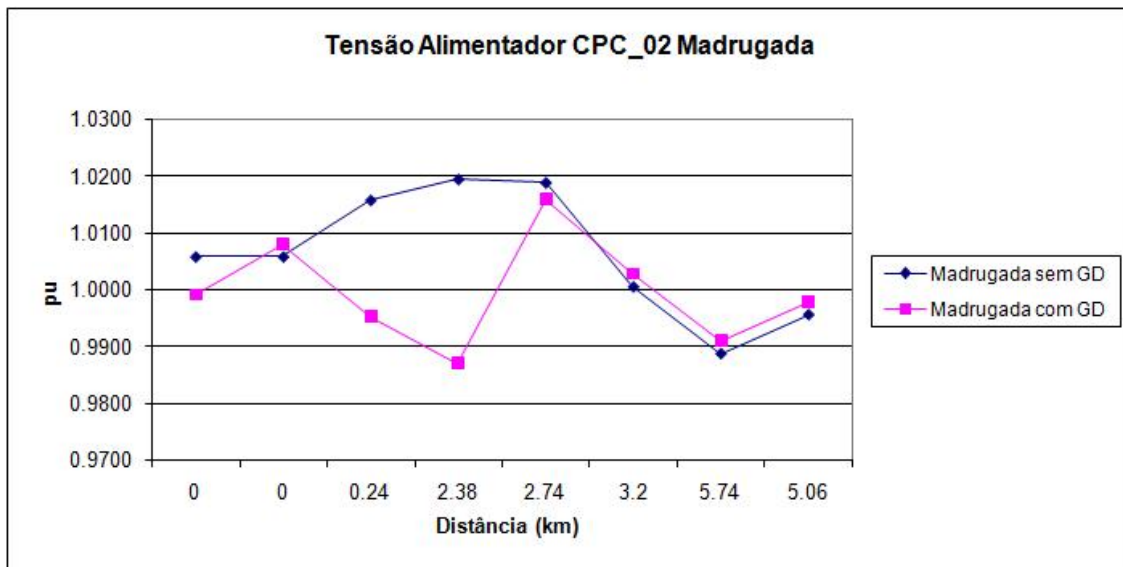


Figura 45. Tensões no alimentador CPC_02 na madrugada com e sem GD

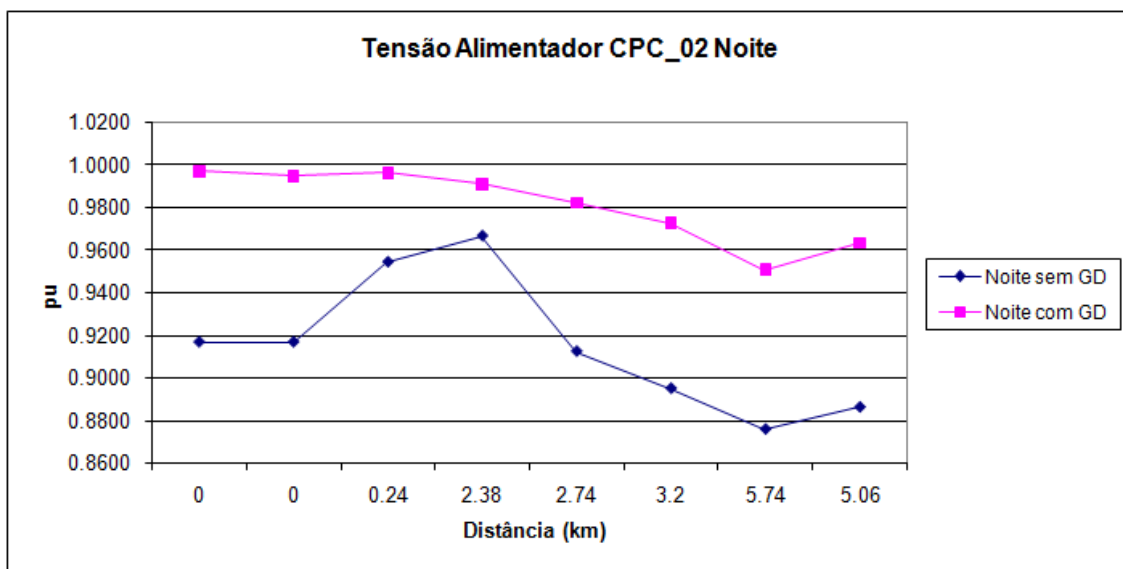


Figura 46. Tensões no alimentador CPC_02 à noite com e sem GD

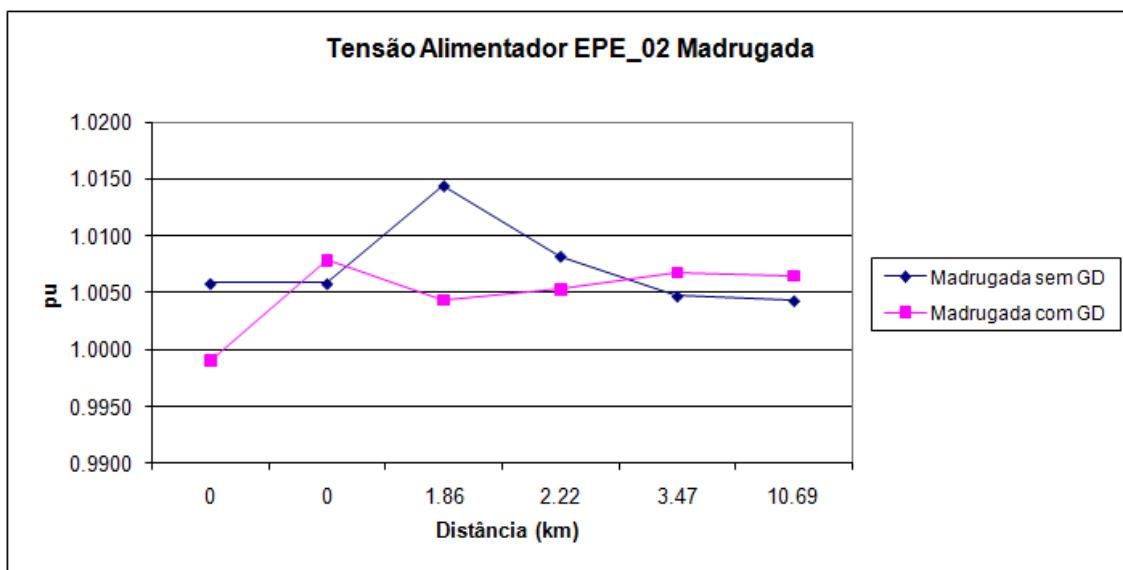


Figura 47. Tensões no alimentador EPE_02 na madrugada com e sem GD

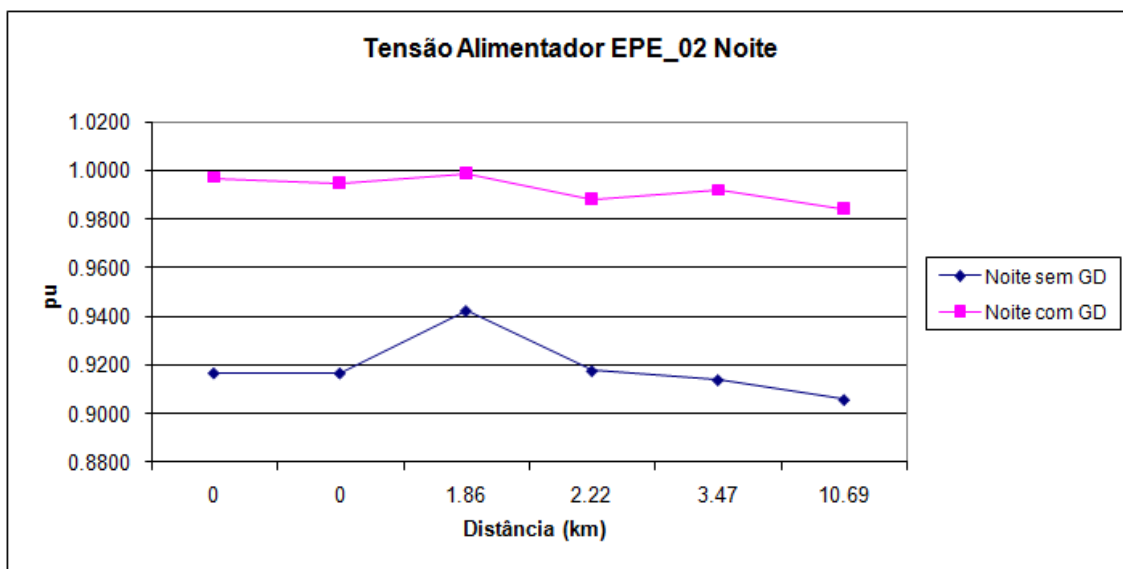


Figura 48. Tensões no alimentador EPE_02 à noite com e sem GD

De forma análoga, os mesmos efeitos observados nos alimentadores CPC_01 e EPE_01 podem ser observados nos alimentadores CPC_02 e EPE_02. O sistema representado pelo barramento infinito da SE-01 não consegue manter os níveis de tensão nos períodos de carga máxima sem a atuação dos geradores.

Também nestes alimentadores, em muitos barramentos, pela retirada dos geradores distribuídos, as tensões atingiram a faixa precária e crítica, tornando a operação do sistema impraticável nestas condições.

Como esperado, a presença de cogeradores auxilia a suprir a demanda do circuito em uma localização mais próxima às cargas. Já que a distância das cargas às fontes alimentadoras é fator de influencia no valor de tensão, a inserção de cogeradores próximos às unidades consumidoras diminui essa distância e fornece potência com melhores níveis de tensão, principalmente nos períodos de alta demanda.

5. Fluxo de Potência

Após realizada a solução do circuito no *OpenDSS*, a execução do comando “*Show Powers*” cria um arquivo texto (*.TXT) que é automaticamente exibido na tela. Esse arquivo mostra, para todos os elementos existentes no circuito ativo, o valor das potências ativas (kW) e reativas (kVAr), potências ativas e reativas de sequência negativa e zero, potências ativas e reativas em excesso, ou seja, quando ultrapassados os limites de operação normal do circuito declarados previamente e as perdas totais no sistema. Os valores das potências são exibidos por terminal, na entrada e na saída de cada elemento. Para as análises foi considerado que os grupos geradores estão sempre despachados em seu valor máximo.

Nas simulações apresentadas neste capítulo serão mostradas as potências circulantes no sistema, bem como a direção em que estas fluem. Assim serão verificadas as alterações nos valores de ativos e reativos e seus respectivos sentidos de fluxo, provocadas pela retirada dos bancos de capacitores ou dos cogeradores.

5.1. Situação Normal de Operação

Nesta seção serão mostrados os fluxos de potência e as perdas verificadas no circuito em sua configuração original. Será possível verificar que a presença dos bancos de capacitores se subtrai aos valores reativos das cargas, bem como qual o tipo de participação do restante do sistema e dos cogeradores no circuito sob análise.

A Tabela 13, retirada do arquivo texto gerado pelo *OpenDSS*, mostra as tensões que entram (sentido positivo) ou saem dos terminais das linhas, dos geradores e da SE-01 (*Vsource.source*) no período da manhã.

Tabela 13 – Potências em situação normal de operação no período da manhã

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]
Vsource.source	1	7592.8	-2392.8	Line.line28b	1	-1683.2	944.2
Vsource.source	2	0	0	Line.line28b	2	1683.9	-943
Line.line6	1	-1758.1	700.2	Line.line28a	1	-1671.1	965.4
Line.line6	2	1768.4	-690.5	Line.line28a	2	1683.2	-944.2
Line.line14a	1	-1768.4	690.5	Line.line21c	1	-1238.3	1108
Line.line14a	2	1784.2	-675.6	Line.line21c	2	1241.1	-1105.4
Line.line14b	1	-1784.2	675.6	Line.line21b	1	-1237.5	1108.7
Line.line14b	2	1785	-674.3	Line.line21b	2	1238.3	-1108
Line.line22a	1	-1885	644.3	Line.line13b	1	-1235.9	-96.2
Line.line22a	2	1888.6	-638	Line.line13b	2	1236.8	97
Line.line22b	1	-1888.6	638	Line.line21a	1	-1236.8	1109.4
Line.line22b	2	1891.7	-632.5	Line.line21a	2	1237.5	-1108.7

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]
Line.line13a	1	-1230.4	-91.3	Line.line10b	1	2653.4	-1472.8
Line.line13a	2	1235.9	96.2	Line.line10b	2	-2641.3	1494.6
Line.line5	1	-1206.1	-77.4	Line.line18	1	2641.3	-285.6
Line.line5	2	1210.4	81.3	Line.line18	2	-2607.7	317.6
Line.line31b	1	-2557.1	390.8	Line.line25	1	1027.7	344.5
Line.line31b	2	2573.2	-362.2	Line.line25	2	-1020	-340
Line.line31a	1	-2541.1	419.3	Line.line1	1	3336.4	-15.9
Line.line31a	2	2557.1	-390.8	Line.line1	2	-3330.2	21.8
Line.line29b	1	-2468.3	462.1	Line.line9a	1	3150.2	-81.8
Line.line29b	2	2481.1	-439.3	Line.line9a	2	-3120.2	110.5
Line.line29a	1	-2465.9	466.3	Line.line9b	1	3120.2	-110.5
Line.line29a	2	2468.3	-462.1	Line.line9b	2	-3100.8	129
Line.line23	1	-1957.2	634.5	Line.line17	1	3100.8	454
Line.line23	2	1965.9	-626.3	Line.line17	2	-3092.4	-446
Line.line15	1	-1813	688.5	Line.line24	1	594.5	192.2
Line.line15	2	1817.2	-684.5	Line.line24	2	-590	-190
Line.line7b	1	-1807.7	106.8	Line.line30	1	1407.9	-106.2
Line.line7b	2	1813	-101.8	Line.line30	2	-1405.7	108.2
Line.line7a	1	-1804.5	109.7	Line.line32	1	1405.7	469.6
Line.line7a	2	1807.7	-106.8	Line.line32	2	-1390	-460
Line.line16b	1	-3489.2	1051.2	Line.line4a	1	3626.5	-543.4
Line.line16b	2	3508.3	-1032.9	Line.line4a	2	-3609.4	574.2
Line.line16a	1	-3474.2	1065.6	Line.line4b	1	3609.4	-574.2
Line.line16a	2	3489.2	-1051.2	Line.line4b	2	-3597.6	595.5
Line.line8b	1	-2909.6	1259.5	Line.line12	1	1987.6	-1125.5
Line.line8b	2	2924.2	-1245.6	Line.line12	2	-1983.2	1129.7
Line.line8a	1	-2833.1	1332.6	Line.line20	1	1983.2	61.8
Line.line8a	2	2909.6	-1259.5	Line.line20	2	-1971.6	-50.9
Line.line3a	1	1437.5	-116.4	Line.line27a	1	261.7	79.6
Line.line3a	2	-1432.8	120.7	Line.line27a	2	-261	-79.8
Line.line3b	1	1432.8	-120.7	Line.line27b	1	261	79.8
Line.line3b	2	-1431.6	121.9	Line.line27b	2	-260	-80
Line.line26	1	641.3	210.7	Generator.g1	1	-10599.9	2277.7
Line.line26	2	-640	-210	Generator.g2	1	-10599.9	1619.7
Line.line11	1	320.2	109.8				
Line.line11	2	-320	-109.8				
Line.line19	1	50	19.8				
Line.line19	2	-50	-20				
Line.line2a	1	3018.1	-1292.8				
Line.line2a	2	-3003.4	1319.1				
Line.line2b	1	3003.4	-1319.1				
Line.line2b	2	-2981.1	1359.1				
Line.line10a	1	2661.1	-1459.1				
Line.line10a	2	-2653.4	1472.8				

A Figura 49 mostra os sentidos e valores, retirados da tabela acima, dos fluxos de potência ativa e reativa em pontos estratégicos do circuito.

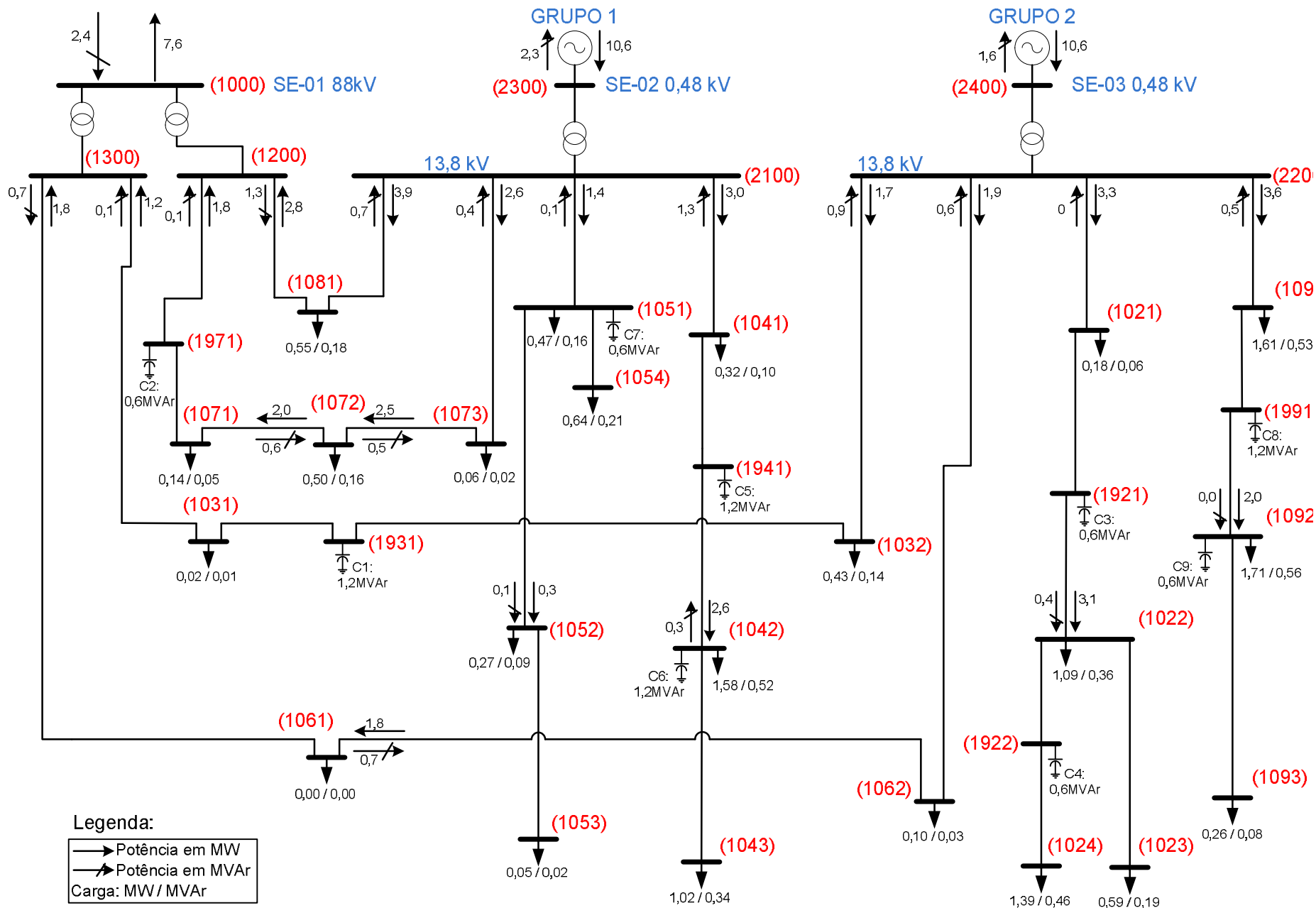


Figura 49. Fluxos de potência em operação normal no período da manhã

Pode-se observar que os geradores estão entregando sua máxima potência ativa ao sistema, enquanto absorvem potência reativa proveniente do circuito. Também é interessante notar que o restante do sistema, representado pela SE-01, está absorvendo parte da potência ativa produzida pelos geradores que não está sendo consumida pelo circuito. Pode-se também visualizar o efeito dos bancos de capacitores nos pontos onde estão instalados, colocando-se opostos aos valores reativos das cargas e diminuindo o fluxo de reativos nas linhas.

A Tabela 14 mostra os valores das potências no período da tarde.

Tabela 14 – Potências em situação normal de operação no período da tarde

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]
Vsource.source	1	8819.8	-2711.9	Line.line31a	2	2727	-407.6
Vsource.source	2	0	0	Line.line29b	1	-2634.2	486
Line.line6	1	-2183.9	784.7	Line.line29b	2	2648.8	-460
Line.line6	2	2199.5	-770	Line.line29a	1	-2631.5	490.8
Line.line14a	1	-2199.5	770	Line.line29a	2	2634.2	-486
Line.line14a	2	2223.4	-747.3	Line.line23	1	-2170.9	650.9
Line.line14b	1	-2223.4	747.3	Line.line23	2	2181.5	-640.8
Line.line14b	2	2224.6	-745.2	Line.line15	1	-2035.7	695.8
Line.line22a	1	-2314.6	715.2	Line.line15	2	2040.9	-690.9
Line.line22a	2	2319.9	-705.8	Line.line7b	1	-2029	115.9
Line.line22b	1	-2319.9	705.8	Line.line7b	2	2035.7	-109.6
Line.line22b	2	2324.5	-697.6	Line.line7a	1	-2025	119.7
Line.line28b	1	-1976.7	994.2	Line.line7a	2	2029	-115.9
Line.line28b	2	1977.6	-992.6	Line.line16b	1	-3698.8	1125.2
Line.line28a	1	-1960.9	1022.1	Line.line16b	2	3720.2	-1104.7
Line.line28a	2	1976.7	-994.2	Line.line16a	1	-3681.9	1141.5
Line.line21c	1	-1577	1155.8	Line.line16a	2	3698.8	-1125.2
Line.line21c	2	1580.9	-1152.1	Line.line8b	1	-3174.7	1317.9
Line.line21b	1	-1575.9	1156.8	Line.line8b	2	3191.9	-1301.5
Line.line21b	2	1577	-1155.8	Line.line8a	1	-3085	1403.8
Line.line13b	1	-1573.5	-48.9	Line.line8a	2	3174.7	-1317.9
Line.line13b	2	1574.9	50.2	Line.line3a	1	1316.3	-169.5
Line.line21a	1	-1574.9	1157.8	Line.line3a	2	-1312.4	173.1
Line.line21a	2	1575.9	-1156.8	Line.line3b	1	1312.4	-173.1
Line.line13a	1	-1564.7	-40.7	Line.line3b	2	-1311.3	174
Line.line13a	2	1573.5	48.9	Line.line26	1	581.1	190.5
Line.line5	1	-1537.6	-24.2	Line.line26	2	-580	-190
Line.line5	2	1544.7	30.7	Line.line11	1	300.2	99.8
Line.line31b	1	-2727	407.6	Line.line11	2	-300	-99.8
Line.line31b	2	2745.1	-375.2	Line.line19	1	50	19.8
Line.line31a	1	-2708.8	440	Line.line19	2	-50	-20

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]
Line.line2a	1	2755.2	-1411.8	Line.line24	2	-520	-170
Line.line2a	2	-2742.2	1435.1	Line.line30	1	1243.8	-175.2
Line.line2b	1	2742.2	-1435.1	Line.line30	2	-1242.1	176.8
Line.line2b	2	-2722.3	1470.5	Line.line32	1	1242.1	407.3
Line.line10a	1	2422.3	-1570.5	Line.line32	2	-1230	-400
Line.line10a	2	-2415.4	1582.8	Line.line4a	1	3288.8	-667.5
Line.line10b	1	2415.4	-1582.8	Line.line4a	2	-3274.4	693.1
Line.line10b	2	-2404.5	1602.4	Line.line4b	1	3274.4	-693.1
Line.line18	1	2404.5	-384.5	Line.line4b	2	-3264.6	710.9
Line.line18	2	-2376.5	411.1	Line.line12	1	1784.5	-1200.9
Line.line25	1	946.5	313.7	Line.line12	2	-1780.7	1204.5
Line.line25	2	-940	-310	Line.line20	1	1780.7	-5.4
Line.line1	1	2947.2	-174.7	Line.line20	2	-1771.4	14
Line.line1	2	-2942.4	179.3	Line.line27a	1	241.4	79.4
Line.line9a	1	2782.4	-229.3	Line.line27a	2	-240.9	-79.7
Line.line9a	2	-2759	251.6	Line.line27b	1	240.9	79.7
Line.line9b	1	2759	-251.6	Line.line27b	2	-240	-80
Line.line9b	2	-2743.8	266	Generator.g1	1	-10600.1	2529.1
Line.line17	1	2743.8	322.5	Generator.g2	1	-10600.1	2010.8
Line.line17	2	-2737.3	-316.3				
Line.line24	1	523.5	171.5				

Os valores da Tabela 14 estão transcritos em pontos estratégicos da Figura 50, na qual pode-se observar que a SE-01 continua absorvendo potência ativa e entregando reativa ao sistema sob análise.

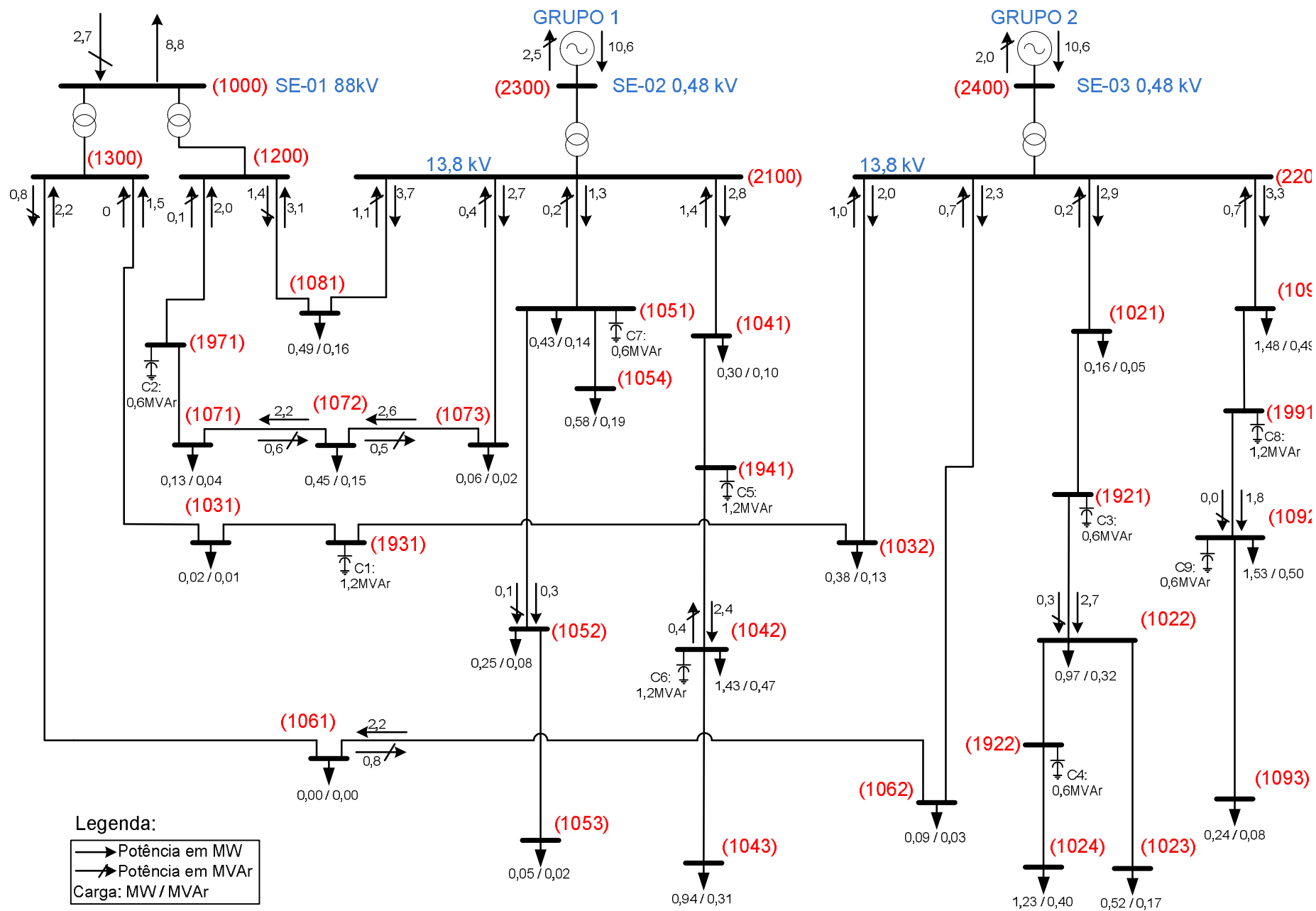


Figura 50. Fluxos de potência em operação normal no período da tarde

A Tabela 15 mostra as potências ativa e reativa que entram e saem dos elementos de interesse do circuito no período de maior carga, o da noite.

Tabela 15 – Potências em situação normal de operação no período da noite

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]
Vsource.source	1	1550.6	-1066.3	Line.line15	2	478.6	-625.7
Vsource.source	2	0	0	Line.line7b	1	-477.5	37.4
Line.line6	1	119.5	397.7	Line.line7b	2	477.9	-37.3
Line.line6	2	-119	-397.5	Line.line7a	1	-477.3	37.6
Line.line14a	1	-81	297.5	Line.line7a	2	477.5	-37.4
Line.line14a	2	81.4	-297.6	Line.line16b	1	-2283.7	563.8
Line.line14b	1	-81.4	297.6	Line.line16b	2	2291.8	-556.2
Line.line14b	2	81.4	-297.6	Line.line16a	1	-2277.4	569.8
Line.line22a	1	-211.4	257.6	Line.line16a	2	2283.7	-563.8
Line.line22a	2	211.5	-257.6	Line.line8b	1	-1363.6	873.4
Line.line22b	1	-211.5	257.6	Line.line8b	2	1367.4	-869.8
Line.line22b	2	211.6	-257.6	Line.line8a	1	-1343.5	892
Line.line28b	1	-505	678.6	Line.line8a	2	1363.6	-873.4
Line.line28b	2	505.1	-678.4	Line.line3a	1	2228.7	155.5
Line.line28a	1	-502.6	682.2	Line.line3a	2	-2217.3	-144.7
Line.line28a	2	505	-678.6	Line.line3b	1	2217.3	144.7
Line.line21c	1	118.2	882.9	Line.line3b	2	-2214.2	-141.9
Line.line21c	2	-117.4	-882.2	Line.line26	1	1033.6	342.1
Line.line21b	1	118.4	883.1	Line.line26	2	-1030	-340
Line.line21b	2	-118.2	-882.9	Line.line11	1	540.7	180.1
Line.line13b	1	118.7	-314	Line.line11	2	-540	-179.8
Line.line13b	2	-118.6	314	Line.line19	1	90	29.8
Line.line21a	1	118.6	883.3	Line.line19	2	-90	-30
Line.line21a	2	-118.4	-883.1	Line.line2a	1	4431	-597.2
Line.line13a	1	119.1	-314	Line.line2a	2	-4403.5	646.9
Line.line13a	2	-118.7	314	Line.line2b	1	4403.5	-646.9
Line.line5	1	149.4	-304	Line.line2b	2	-4361.4	722.6
Line.line5	2	-149.1	304	Line.line10a	1	4021.4	-832.6
Line.line31b	1	-1581.9	244.1	Line.line10a	2	-4006.9	858.7
Line.line31b	2	1588.1	-233.4	Line.line10b	1	4006.9	-858.7
Line.line31a	1	-1575.7	254.8	Line.line10b	2	-3983.9	900
Line.line31a	2	1581.9	-244.1	Line.line18	1	3983.9	257.6
Line.line29b	1	-1481	292.8	Line.line18	2	-3904.8	-181.6
Line.line29b	2	1485.7	-284.8	Line.line25	1	1694.8	561.4
Line.line29a	1	-1480.2	294.3	Line.line25	2	-1672.5	-547.5
Line.line29a	2	1481	-292.8	Line.line1	1	4813.2	568
Line.line23	1	-688.6	555.7	Line.line1	2	-4800	-555.2
Line.line23	2	690.2	-554.3	Line.line9a	1	4540	465.2
Line.line15	1	-477.9	626.2	Line.line9a	2	-4475.9	-403.7

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kVAr]
Line.line9b	1	4475.9	403.7	Line.line4b	1	4977.5	-43.8
Line.line9b	2	-4434.6	-363.9	Line.line4b	2	-4955	84.3
Line.line17	1	4434.6	924.9	Line.line12	1	2845	-774.3
Line.line17	2	-4416.2	-907.2	Line.line12	2	-2837.5	781.5
Line.line24	1	829.1	275.2	Line.line20	1	2837.5	376.3
Line.line24	2	-820	-270	Line.line20	2	-2812.8	-352.7
Line.line30	1	1997.1	112	Line.line27a	1	332.8	110.5
Line.line30	2	-1992.4	-107.7	Line.line27a	2	-331.7	-110.3
Line.line32	1	1992.4	660.6	Line.line27b	1	331.7	110.3
Line.line32	2	-1959.5	-640	Line.line27b	2	-330	-110
Line.line4a	1	5010	14.8	Generator.g1	1	-10599.9	725.5
Line.line4a	2	-4977.5	43.8	Generator.g2	1	-10599.9	-150.3

A Figura 51 mostra as potências ativas e reativas e seus sentidos para as cargas do período da noite.

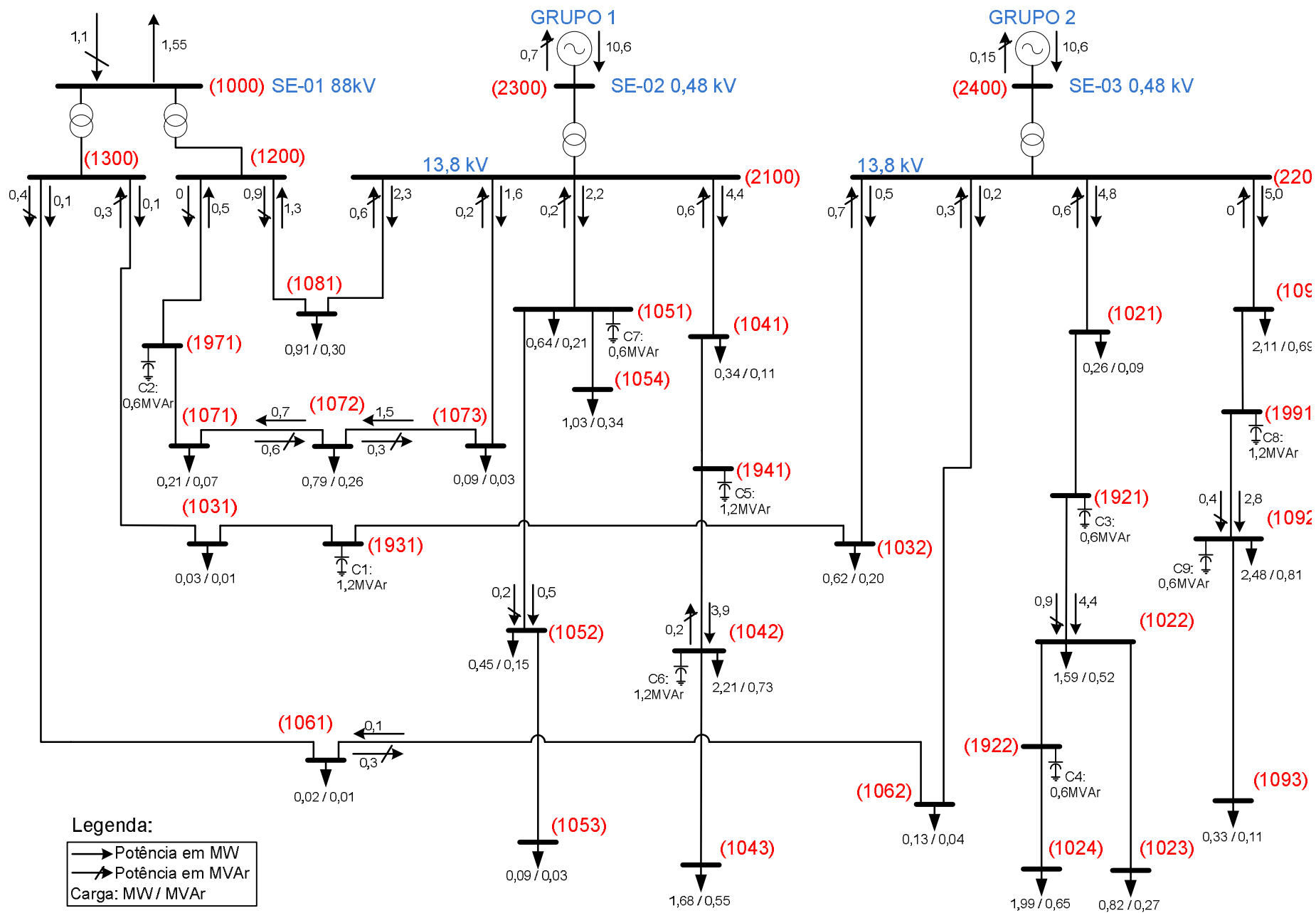


Figura 51. Fluxos de potência em operação normal no período da noite

Da Figura 51 acima, que mostra o circuito com a máxima carga, podemos observar que a SE-01 continua absorvendo potência ativa do sistema e os geradores estão absorvendo menos reativos em comparação com os outros períodos pois esta é a condição de operação ótima dos bancos de capacitores.

Para efeito de visualização, a Figura 52 abaixo mostra um dos usos da função “Plot” do *OpenDSS*. Nela, as espessuras das linhas são proporcionais às potências transportadas pelas mesmas.

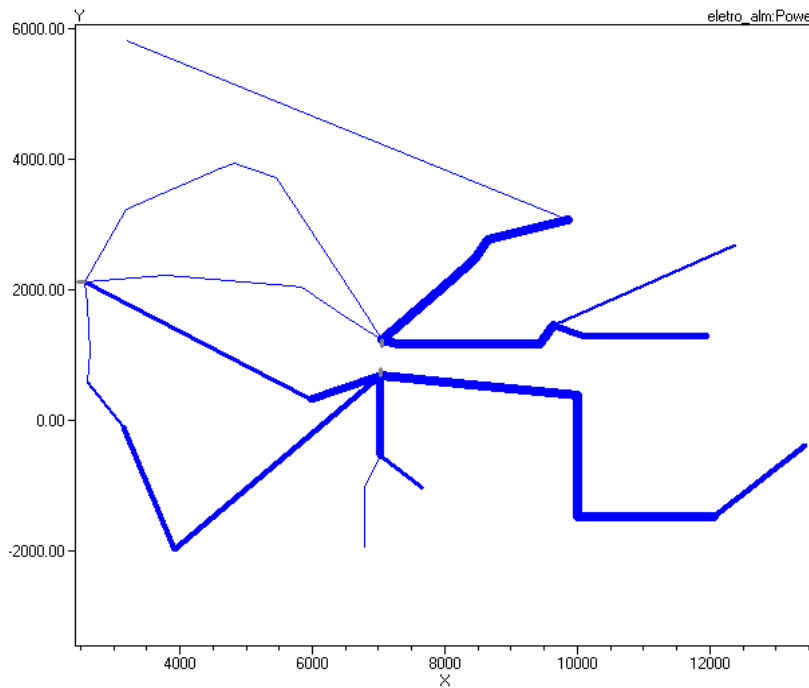


Figura 52. Fluxo de potência no período da noite utilizando-se o “Plot”

Os fluxos de potência no último período em operação normal, o da madrugada, que apresenta a menor demanda, são mostrados na Tabela 16:

Tabela 16 – Potências em situação normal de operação no período da madrugada

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Vsource.source	1	11298.8	-3421.1	Line.line22a	2	3157.1	-831.8
Vsource.source	2	0	0	Line.line22b	1	-3157.1	831.8
Line.line6	1	-3002.2	942.8	Line.line22b	2	3165.5	-816.9
Line.line6	2	3030.9	-915.3	Line.line28b	1	-2561.7	1085.6
Line.line14a	1	-3040.9	915.3	Line.line28b	2	2563.1	-1083
Line.line14a	2	3085.4	-872.7	Line.line28a	1	-2536.8	1129.9
Line.line14b	1	-3085.4	872.7	Line.line28a	2	2561.7	-1085.6
Line.line14b	2	3087.5	-868.9	Line.line21c	1	-2230.2	1236.2
Line.line22a	1	-3147.5	848.9	Line.line21c	2	2236.8	-1229.9

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Line.line21b	1	-2228.4	1237.9	Line.line2a	1	2070.6	-1704.5
Line.line21b	2	2230.2	-1236.2	Line.line2a	2	-2060.9	1721.8
Line.line13b	1	-2223.9	31.7	Line.line2b	1	2060.9	-1721.8
Line.line13b	2	2226.6	-29.1	Line.line2b	2	-2046.1	1748.2
Line.line21a	1	-2226.6	1239.6	Line.line10a	1	1876.1	-1808.2
Line.line21a	2	2228.4	-1237.9	Line.line10a	2	-1870.5	1818
Line.line13a	1	-2206.3	48.3	Line.line10b	1	1870.5	-1818
Line.line13a	2	2223.9	-31.7	Line.line10b	2	-1861.7	1833.7
Line.line5	1	-2172.1	71.7	Line.line18	1	1861.7	-595.2
Line.line5	2	2186.3	-58.3	Line.line18	2	-1844	611.8
Line.line31b	1	-3121.3	435.7	Line.line25	1	754	252.1
Line.line31b	2	3144.9	-393.3	Line.line25	2	-750	-250
Line.line31a	1	-3097.6	478.1	Line.line1	1	2342.5	-406.4
Line.line31a	2	3121.3	-435.7	Line.line1	2	-2339.4	409.4
Line.line29b	1	-3028.4	532.4	Line.line9a	1	2199.4	-459.4
Line.line29b	2	3047.6	-498.1	Line.line9a	2	-2184.3	473.6
Line.line29a	1	-3024.8	538.8	Line.line9b	1	2184.3	-473.6
Line.line29a	2	3028.4	-532.4	Line.line9b	2	-2174.6	482.8
Line.line23	1	-2639.5	673.4	Line.line17	1	2174.6	115
Line.line23	2	2654.8	-658.8	Line.line17	2	-2170.6	-111.3
Line.line15	1	-2521.7	720.8	Line.line24	1	402	130.6
Line.line15	2	2529.5	-713.4	Line.line24	2	-400	-130
Line.line7b	1	-2511.4	146.2	Line.line30	1	988.6	-269.3
Line.line7b	2	2521.7	-136.4	Line.line30	2	-987.5	270.3
Line.line7a	1	-2505.3	152	Line.line32	1	987.5	324.3
Line.line7a	2	2511.4	-146.2	Line.line32	2	-980	-320
Line.line16b	1	-4247.2	1257.8	Line.line4a	1	2464.8	-984.7
Line.line16b	2	4275.2	-1230.9	Line.line4a	2	-2455.9	1000.5
Line.line16a	1	-4225	1279.1	Line.line4b	1	2455.9	-1000.5
Line.line16a	2	4247.2	-1257.8	Line.line4b	2	-2449.8	1011.5
Line.line8b	1	-3761.5	1451.7	Line.line12	1	1419.8	-1351.5
Line.line8b	2	3785	-1429.1	Line.line12	2	-1416.6	1354.4
Line.line8a	1	-3638.1	1570.2	Line.line20	1	1416.6	-139.1
Line.line8a	2	3761.5	-1451.7	Line.line20	2	-1410.8	144.4
Line.line3a	1	1044.1	-265.5	Line.line27a	1	180.8	58.8
Line.line3a	2	-1041.5	267.8	Line.line27a	2	-180.5	-59.4
Line.line3b	1	1041.5	-267.8	Line.line27b	1	180.5	59.4
Line.line3b	2	-1040.8	268.4	Line.line27b	2	-180	-60
Line.line26	1	470.7	150.3	Generator.g1	1	-10599.9	3049.2
Line.line26	2	-470	-150	Generator.g2	1	-10599.9	2753.6
Line.line11	1	240.1	79.7				
Line.line11	2	-240	-79.8				
Line.line19	1	40	9.8				
Line.line19	2	-40	-10				

Utilizando novamente o comando “Plot”, pode-se visualizar na Figura 53, onde a espessura das linhas é proporcional à potência que estas transportam, que a energia flui mais uniformemente nas linhas quando comparada ao período da noite.

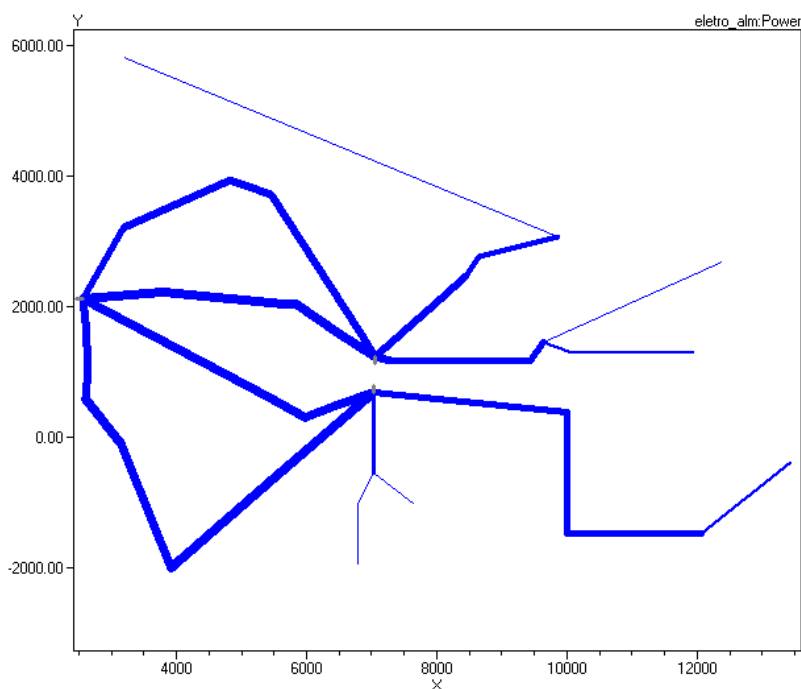


Figura 53. Fluxo de potência no período da madrugada utilizando-se o “Plot”

A Figura 54 mostra os fluxos de potência com as menores cargas em condição normal. Nestas circunstâncias podemos notar que ocorrem as mais altas potências reativas encontradas, bem como a maior absorção de potência pelo sistema da SE-01.

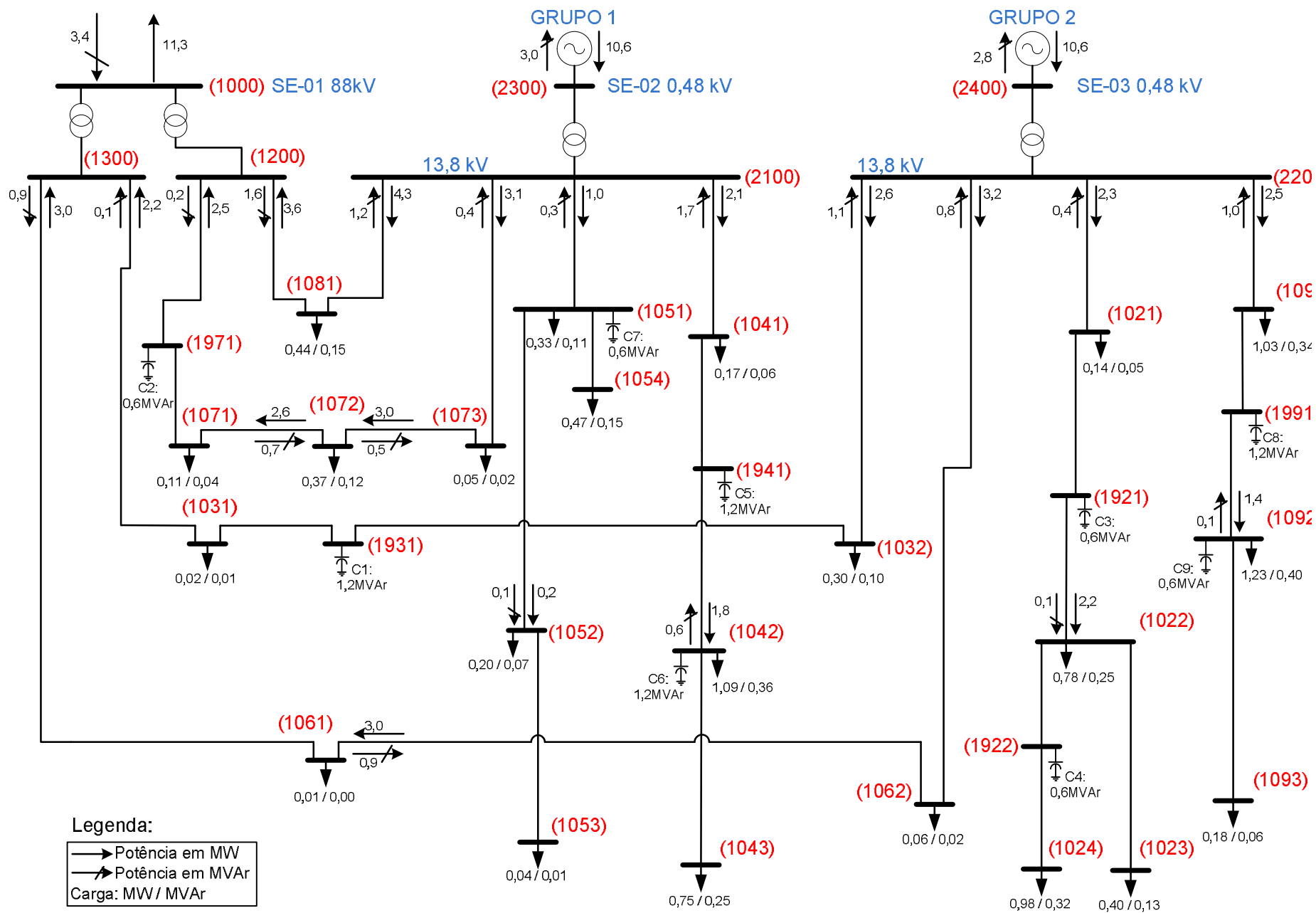


Figura 54. Fluxos de potência em operação normal no período da madrugada

Para o circuito na configuração original, utilizamos o comando “*Show Losses*” que mostra todas as perdas no circuito de interesse. Pode-se observar, da Tabela 17 abaixo, que o período em que ocorrem as maiores perdas é o da madrugada que, como visto, é o período que possui maior fluxo saindo dos geradores para a SE-01 e os mais elevados níveis de tensão.

Tabela 17 – Perdas no sistema em operação normal

Período	Perdas nos Cabos [kW]	Perdas nos Transformadores [kW]	Perdas Totais [kW]	Perdas Reativas [kVAr]	Potência Total das Cargas [kW]	Percentual Total de Perdas [%]
Madrugada	603.2	147.7	750.8	2475.1	9150.0	8.21%
Manhã	494.0	132.9	629.9	1952.9	12979.9	4.83%
Tarde	513.3	137.2	650.6	2088.0	11730.1	5.55%
Noite	565.9	121.3	687.2	1717.1	18961.9	3.62%

Pode-se observar que em todos os períodos o restante do sistema, representado pela SE-01, absorve potência ativa produzida pelos geradores. Como os geradores estão despachados ao máximo em todos os períodos, podemos verificar que na madrugada, período de menor demanda, os ramos em anel possuem maior fluxo de potência pois, como a carga é baixa, potência reativa é exportada do sistema e há aumento das perdas dada a maior distância percorrida pela energia. Já no período noturno, de alta demanda, os fluxos de potência que partem dos cogeradores são direcionados às cargas e quase totalmente consumidos pelas mesmas, restando pouca potência a ser exportada do sistema.

5.2. Situação Sem Bancos de Capacitores

Assim como fizemos para os estudos de tensão, todos os bancos de capacitores foram desligados. Procederemos agora à análise dos fluxos de potência do sistema nessas condições. A retirada dos bancos de capacitores deve provocar aumento de reativos circulantes no sistema.

A Tabela 18 mostra as potências nos terminais de entrada e saída das linhas e também as potências que saem dos geradores e entram no sistema da SE-01 no período da madrugada que possui a menor demanda.

Tabela 18 – Potências no período da madrugada sem BC

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Vsource.source	1	11288.5	-5208.1	Line.line7a	2	2512.3	-745.0
Vsource.source	2	-0.0	0.0	Line.line16b	1	-4256.9	1401.9
Line.line6	1	-3039.7	1163.0	Line.line16b	2	4286.3	-1373.7
Line.line6	2	3071.2	-1132.8	Line.line16a	1	-4233.7	1424.3
Line.line14a	1	-3081.2	1132.8	Line.line16a	2	4256.9	-1401.9
Line.line14a	2	3130.1	-1086.0	Line.line8b	1	-3768.8	1598.2
Line.line14b	1	-3130.1	1086.0	Line.line8b	2	3793.7	-1574.3
Line.line14b	2	3132.5	-1081.8	Line.line8a	1	-3638.3	1723.5
Line.line22a	1	-3192.5	1061.8	Line.line8a	2	3768.8	-1598.2
Line.line22a	2	3202.9	-1043.0	Line.line3a	1	1044.4	343.1
Line.line22b	1	-3202.9	1043.0	Line.line3a	2	-1041.6	-340.7
Line.line22b	2	3212.1	-1026.6	Line.line3b	1	1041.6	340.7
Line.line28b	1	-2515.6	613.7	Line.line3b	2	-1040.9	-340.0
Line.line28b	2	2516.9	-611.4	Line.line26	1	470.7	150.3
Line.line28a	1	-2493.4	653.2	Line.line26	2	-470.0	-150.0
Line.line28a	2	2515.6	-613.7	Line.line11	1	240.1	79.7
Line.line21c	1	-2187.8	758.6	Line.line11	2	-240.0	-79.8
Line.line21c	2	2193.4	-753.2	Line.line19	1	40.0	9.8
Line.line21b	1	-2186.2	760.0	Line.line19	2	-40.0	-10.0
Line.line21b	2	2187.8	-758.6	Line.line2a	1	2059.3	735.7
Line.line13b	1	-2181.6	764.4	Line.line2a	2	-2052.7	-724.0
Line.line13b	2	2184.7	-761.5	Line.line2b	1	2052.7	724.0
Line.line21a	1	-2184.7	761.5	Line.line2b	2	-2042.5	-706.1
Line.line21a	2	2186.2	-760.0	Line.line10a	1	1872.5	646.1
Line.line13a	1	-2161.9	783.1	Line.line10a	2	-1869.2	-640.1
Line.line13a	2	2181.6	-764.4	Line.line10b	1	1869.2	640.1
Line.line5	1	-2126.0	808.1	Line.line10b	2	-1863.8	-630.7
Line.line5	2	2141.9	-793.1	Line.line18	1	1863.8	630.7
Line.line31b	1	-3125.4	445.7	Line.line18	2	-1844.4	-612.4
Line.line31b	2	3149.8	-402.0	Line.line25	1	754.4	252.4
Line.line31a	1	-3101.0	489.3	Line.line25	2	-750.0	-250.0
Line.line31a	2	3125.4	-445.7	Line.line1	1	2346.5	789.8
Line.line29b	1	-3031.3	544.7	Line.line1	2	-2343.1	-786.6
Line.line29b	2	3051.0	-509.3	Line.line9a	1	2203.1	736.6
Line.line29a	1	-3027.6	551.3	Line.line9a	2	-2186.5	-720.8
Line.line29a	2	3031.3	-544.7	Line.line9b	1	2186.5	720.8
Line.line23	1	-2641.8	686.4	Line.line9b	2	-2175.8	-710.7
Line.line23	2	2657.6	-671.3	Line.line17	1	2175.8	710.7
Line.line15	1	-2523.8	734.0	Line.line17	2	-2171.2	-706.3
Line.line15	2	2531.8	-726.4	Line.line24	1	402.1	130.6
Line.line7b	1	-2512.3	745.0	Line.line24	2	-400.0	-130.0
Line.line7b	2	2523.8	-734.0	Line.line30	1	989.1	325.7
Line.line7a	1	-2505.5	751.4	Line.line30	2	-987.9	-324.6

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Line.line32	1	987.9	324.6	Line.line20	1	1417.5	465.1
Line.line32	2	-980.0	-320.0	Line.line20	2	-1410.8	-459.0
Line.line4a	1	2464.3	833.4	Line.line27a	1	180.8	59.0
Line.line4a	2	-2455.5	-817.7	Line.line27a	2	-180.5	-59.5
Line.line4b	1	2455.5	817.7	Line.line27b	1	180.5	59.5
Line.line4b	2	-2449.4	-806.9	Line.line27b	2	-180.0	-60.0
Line.line12	1	1419.4	466.9	Generator.g1	1	-10599.9	193.3
Line.line12	2	-1417.5	-465.1	Generator.g2	1	-10599.9	-489.7

Na Tabela 19 são exibidos os valores de potência ativa e reativa do circuito sem bancos de capacitores com as cargas representadas no período da noite, no qual a demanda é máxima.

Tabela 19 – Potências no período da noite sem BC

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Vsource.source	1	1910.3	-2857.6	Line.line5	1	131.2	436.3
Vsource.source	2	-0.0	0.0	Line.line5	2	-130.6	-436.0
Line.line6	1	7.6	621.4	Line.line31b	1	-1684.4	255.3
Line.line6	2	-6.5	-620.6	Line.line31b	2	1691.6	-242.8
Line.line14a	1	-193.5	520.6	Line.line31a	1	-1677.2	267.9
Line.line14a	2	194.9	-519.7	Line.line31a	2	1684.4	-255.3
Line.line14b	1	-194.9	519.7	Line.line29b	1	-1581.8	307.3
Line.line14b	2	195.0	-519.6	Line.line29b	2	1587.2	-297.9
Line.line22a	1	-325.0	479.6	Line.line29a	1	-1580.8	309.1
Line.line22a	2	325.3	-479.2	Line.line29a	2	1581.8	-307.3
Line.line22b	1	-325.3	479.2	Line.line23	1	-788.8	570.8
Line.line22b	2	325.6	-478.9	Line.line23	2	790.8	-569.1
Line.line28b	1	-521.7	224.1	Line.line15	1	-577.9	641.5
Line.line28b	2	521.7	-224.1	Line.line15	2	578.8	-640.8
Line.line28a	1	-520.6	225.5	Line.line7b	1	-576.7	642.6
Line.line28a	2	521.7	-224.1	Line.line7b	2	577.9	-641.5
Line.line21c	1	99.6	425.6	Line.line7a	1	-575.9	643.2
Line.line21c	2	-99.4	-425.5	Line.line7a	2	576.7	-642.6
Line.line21b	1	99.7	425.6	Line.line16b	1	-2424.3	735.4
Line.line21b	2	-99.6	-425.6	Line.line16b	2	2433.9	-726.3
Line.line13b	1	99.9	425.7	Line.line16a	1	-2416.8	742.5
Line.line13b	2	-99.7	-425.6	Line.line16a	2	2424.3	-735.4
Line.line21a	1	99.7	425.6	Line.line8b	1	-1501.7	1047.2
Line.line21a	2	-99.7	-425.6	Line.line8b	2	1506.8	-1042.5
Line.line13a	1	100.6	426.0	Line.line8a	1	-1475.5	1071.9
Line.line13a	2	-99.9	-425.7	Line.line8a	2	1501.7	-1047.2

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Line.line3a	1	2230.8	747.8	Line.line17	1	4293.1	1431.7
Line.line3a	2	-2217.8	-735.5	Line.line17	2	-4274.0	-1413.3
Line.line3b	1	2217.8	735.5	Line.line24	1	796.3	264.3
Line.line3b	2	-2214.4	-732.3	Line.line24	2	-787.5	-259.3
Line.line26	1	1033.7	342.2	Line.line30	1	1913.1	637.4
Line.line26	2	-1030.0	-340.0	Line.line30	2	-1908.2	-632.7
Line.line11	1	540.7	180.1	Line.line32	1	1908.2	632.7
Line.line11	2	-540.0	-179.8	Line.line32	2	-1876.7	-613.0
Line.line19	1	90.0	29.8	Line.line4a	1	5006.1	1754.1
Line.line19	2	-90.0	-30.0	Line.line4a	2	-4968.6	-1686.5
Line.line2a	1	4181.9	1593.1	Line.line4b	1	4968.6	1686.5
Line.line2a	2	-4153.6	-1542.2	Line.line4b	2	-4942.7	-1639.7
Line.line2b	1	4153.6	1542.2	Line.line12	1	2832.7	949.7
Line.line2b	2	-4110.5	-1464.5	Line.line12	2	-2824.7	-942.0
Line.line10a	1	3770.5	1354.5	Line.line20	1	2824.7	942.0
Line.line10a	2	-3755.9	-1328.3	Line.line20	2	-2796.7	-915.3
Line.line10b	1	3755.9	1328.3	Line.line27a	1	325.2	108.1
Line.line10b	2	-3732.9	-1286.9	Line.line27a	2	-324.1	-107.8
Line.line18	1	3732.9	1286.9	Line.line27b	1	324.1	107.8
Line.line18	2	-3649.8	-1207.1	Line.line27b	2	-322.4	-107.5
Line.line25	1	1562.2	517.5	Generator.g1	1	-10599.9	11247.5
Line.line25	2	-1541.6	-504.7	Generator.g2	1	-10599.9	9892.1
Line.line1	1	4680.9	1644.7				
Line.line1	2	-4666.6	-1630.9				
Line.line9a	1	4406.6	1540.9				
Line.line9a	2	-4337.6	-1474.6				
Line.line9b	1	4337.6	1474.6				
Line.line9b	2	-4293.1	-1431.7				

Nas Figuras 55 a 58 são mostrados os diagramas unifilares com indicação dos fluxos de potência, sem os bancos de capacitores, para todos os períodos de carga. Como pode-se notar, praticamente não há mudanças na potência ativa entregue às cargas e a quantidade de reativos circulantes no sistema sem bancos de capacitores é bem maior do que quando comparada à configuração original. Para este caso exige-se mais potência reativa do sistema representado pela SE-01. Também é importante observar que na ausência dos bancos de capacitores, os geradores também passam a fornecer potência reativa ao sistema, com exceção do período da noite.

A Tabela 20 mostra as perdas no sistema. Mais uma vez podemos observar que as perdas são maiores no período da madrugada, de menor demanda.

Tabela 20 – Perdas no sistema sem bancos de capacitores

Período	Perdas nos Cabos [kW]	Perdas nos Transformadores [kW]	Perdas Totais [kW]	Perdas Reativas [kVAr]	Potência Total das Cargas [kW]	Percentual Total de Perdas [%]
Madrugada	620.2	140.9	761.1	2484.7	9150.0	8.32%
Manhã	529.8	131.9	661.6	2023	12947.2	5.11%
Tarde	542.8	134.1	676.9	2136.2	11722.4	5.77%
Noite	608.1	129.7	737.8	1872.6	18551.8	3.98%

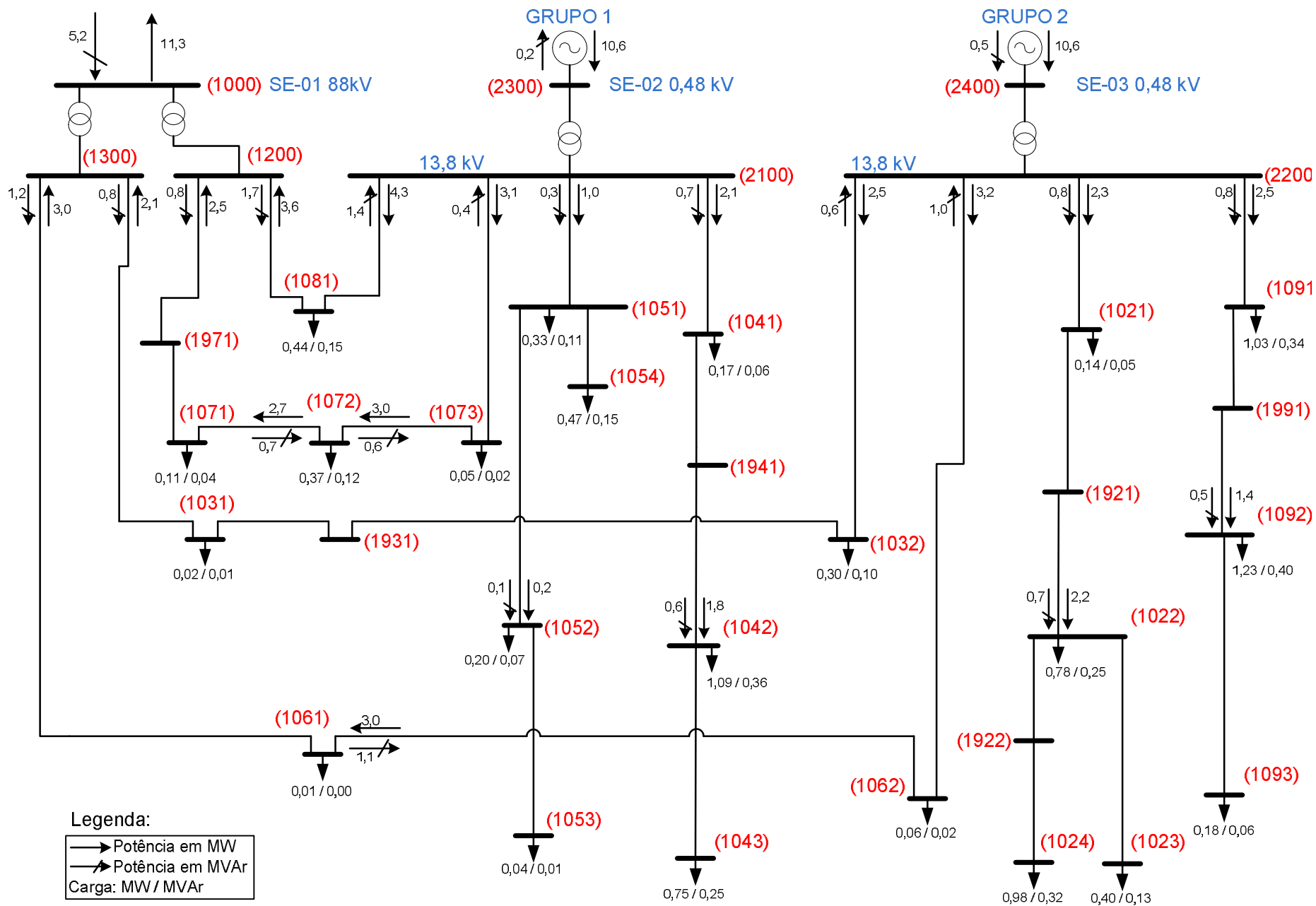


Figura 55. Fluxos de potência no período da madrugada sem bancos de capacitores

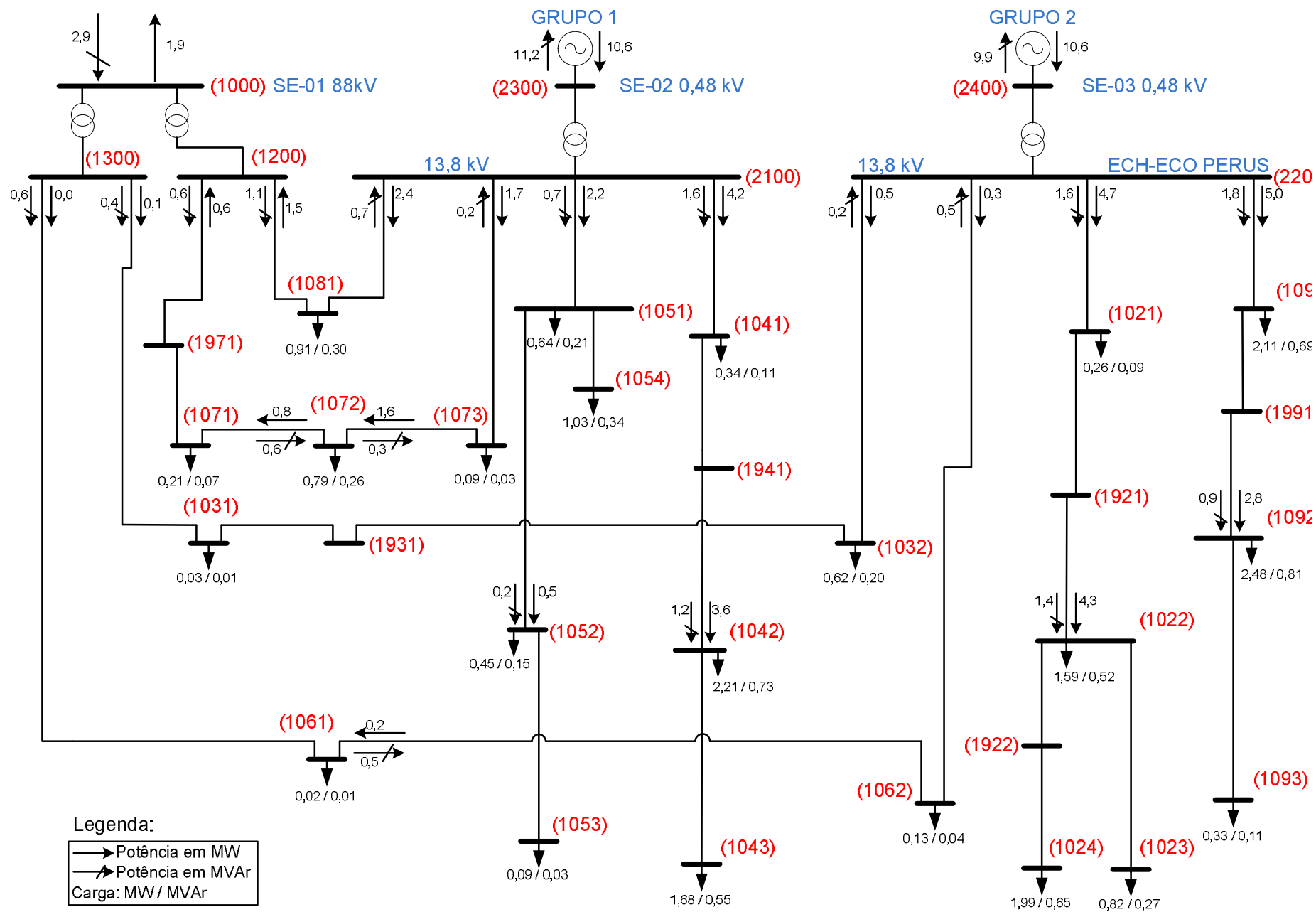


Figura 56. Fluxos de potência no período da noite sem bancos de capacitores

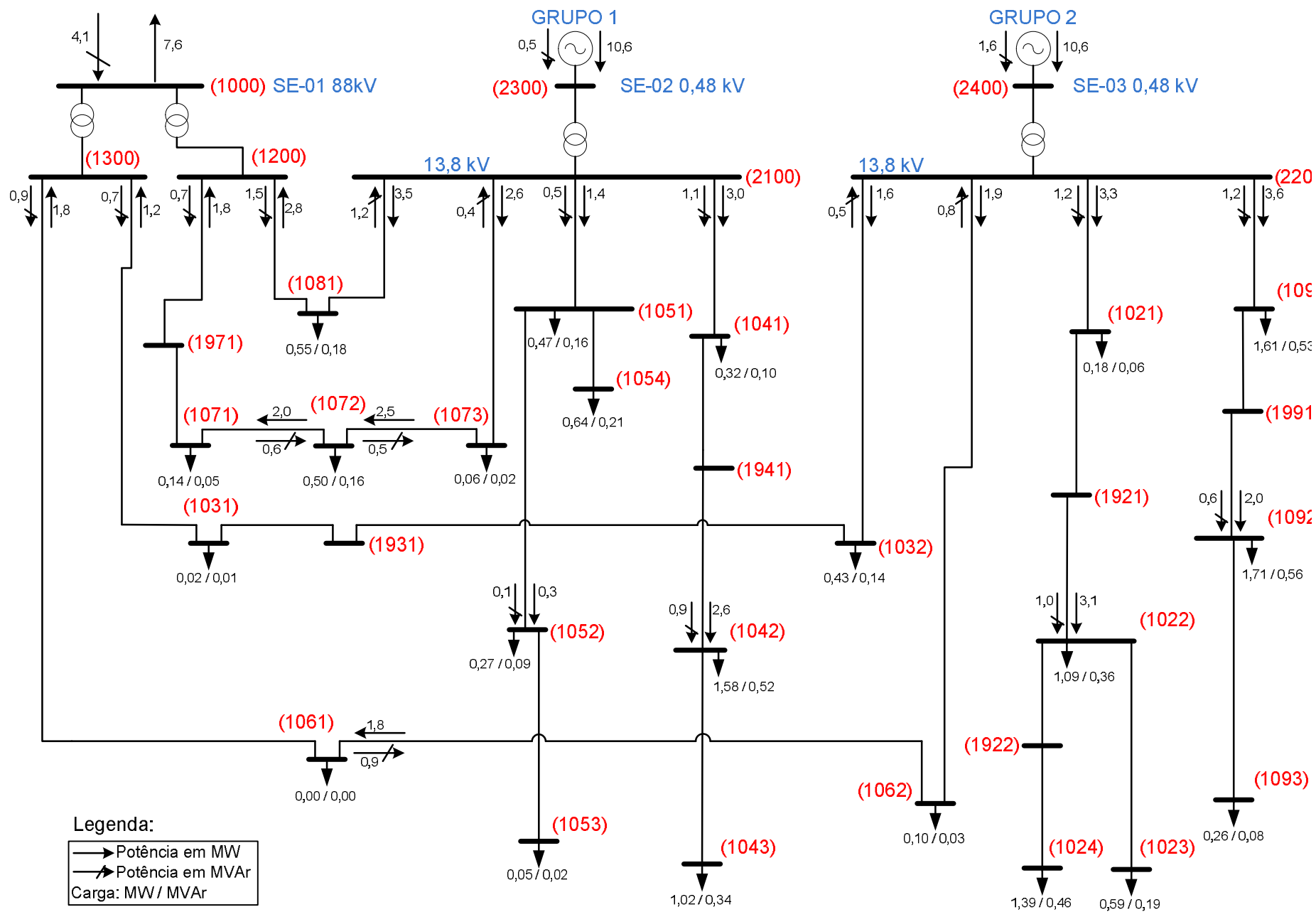


Figura 57. Fluxos de potência no período da manhã sem bancos de capacitores

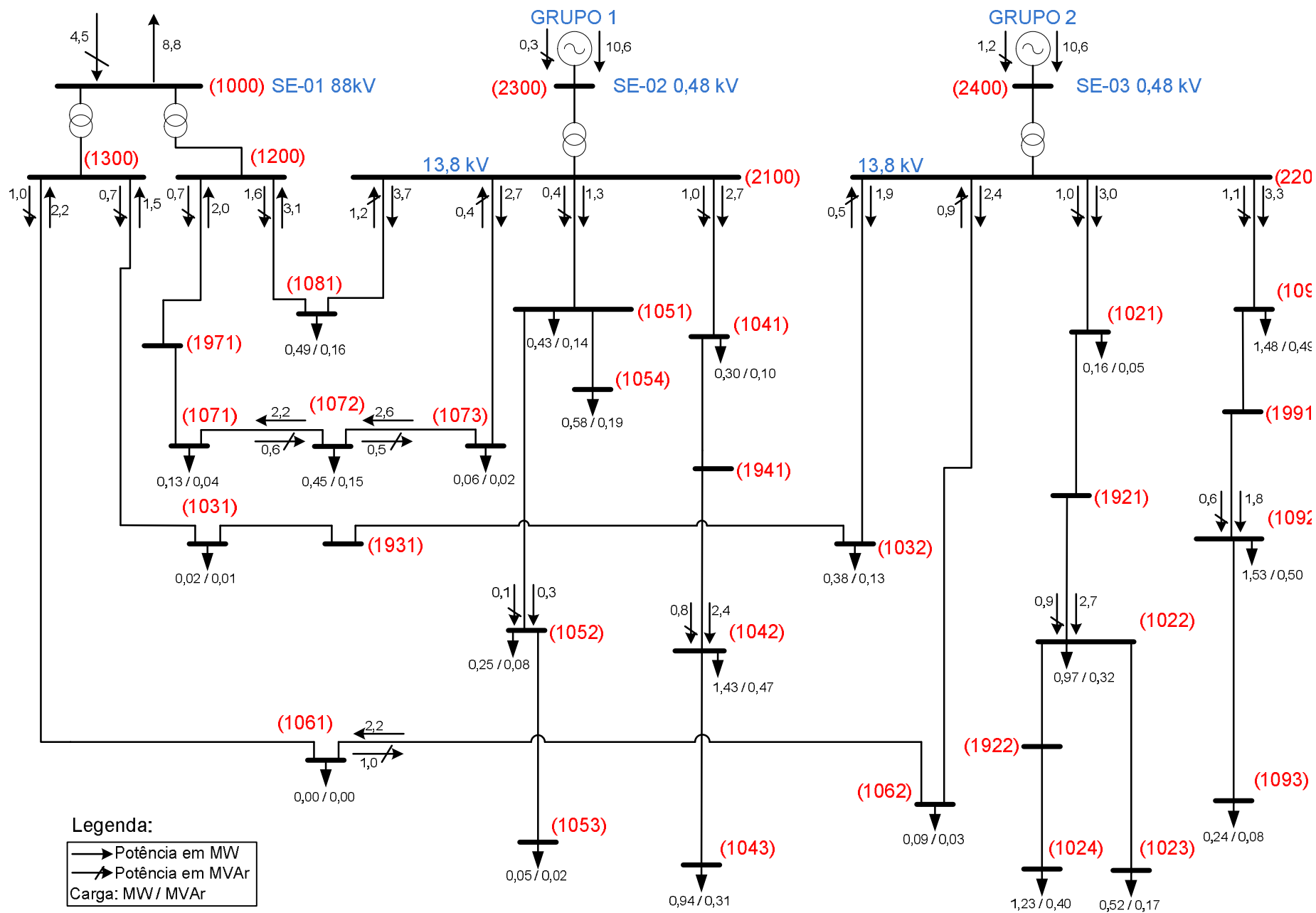


Figura 58. Fluxos de potência no período da tarde sem bancos de capacitores

5.3. Situação Sem Geração Distribuída

Para as simulações desta seção, os cogeradores dos Grupos 1 e 2 foram desabilitados da mesma forma como realizado na seção 4.3. Nosso objetivo é estudar os impactos da inserção destes geradores nas potências que fluem pelo circuito através da comparação com os resultados obtidos na seção 5.1 para os períodos de menor e maior demandas, madrugada e noite, respectivamente.

A Tabela 21 mostra os valores ativos e reativos das potências entrando e saindo das linhas no período da madrugada, bem como a potência total inserida no sistema pela SE-01 que é a única fonte de potência para o sistema.

Tabela 21 – Potências no período da madrugada sem GD

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Vsource.source	1	-9559.5	3960.6	Line.line31b	2	-1423.1	604.0
Vsource.source	2	0.0	0.0	Line.line31a	1	1434.4	-584.7
Line.line6	1	3048.1	-1033.2	Line.line31a	2	-1428.7	594.4
Line.line6	2	-3019.9	1060.2	Line.line29b	1	1489.3	-556.2
Line.line14a	1	3009.9	-1060.2	Line.line29b	2	-1484.4	564.7
Line.line14a	2	-2966.8	1101.4	Line.line29a	1	1490.2	-554.7
Line.line14b	1	2966.8	-1101.4	Line.line29a	2	-1489.3	556.2
Line.line14b	2	-2964.7	1105.1	Line.line23	1	1867.4	-428.0
Line.line22a	1	2904.7	-1125.1	Line.line23	2	-1860.2	434.7
Line.line22a	2	-2896.0	1140.7	Line.line15	1	1981.7	-383.9
Line.line22b	1	2896.0	-1140.7	Line.line15	2	-1977.4	388.0
Line.line22b	2	-2888.4	1154.2	Line.line7b	1	1989.2	-1000.4
Line.line28b	1	1919.8	-222.6	Line.line7b	2	-1981.7	1007.5
Line.line28b	2	-1919.1	223.8	Line.line7a	1	1993.6	-996.3
Line.line28a	1	1931.8	-201.5	Line.line7a	2	-1989.2	1000.4
Line.line28a	2	-1919.8	222.6	Line.line16b	1	1698.3	-1378.0
Line.line21c	1	2236.8	-96.8	Line.line16b	2	-1691.6	1384.3
Line.line21c	2	-2231.8	101.5	Line.line16a	1	1703.6	-1372.9
Line.line21b	1	2238.2	-95.5	Line.line16a	2	-1698.3	1378.0
Line.line21b	2	-2236.8	96.8	Line.line8b	1	2152.2	-1214.8
Line.line13b	1	2243.3	-1325.5	Line.line8b	2	-2143.6	1222.9
Line.line13b	2	-2239.6	1329.0	Line.line8a	1	2197.1	-1172.3
Line.line21a	1	2239.6	-94.2	Line.line8a	2	-2152.2	1214.8
Line.line21a	2	-2238.2	95.5	Line.line3a	1	1044.1	-269.1
Line.line13a	1	2266.9	-1303.1	Line.line3a	2	-1041.5	271.3
Line.line13a	2	-2243.3	1325.5	Line.line3b	1	1041.5	-271.3
Line.line5	1	2306.4	-1274.5	Line.line3b	2	-1040.8	271.9
Line.line5	2	-2286.9	1293.1	Line.line26	1	470.7	150.3
Line.line31b	1	1428.7	-594.4	Line.line26	2	-470.0	-150.0

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Line.line11	1	240.1	79.7	Line.line17	2	-2170.7	-113.9
Line.line11	2	-240.0	-79.8	Line.line24	1	402.0	130.6
Line.line19	1	40.0	9.8	Line.line24	2	-400.0	-130.0
Line.line19	2	-40.0	-10.0	Line.line30	1	988.7	-266.7
Line.line2a	1	2070.6	-1719.3	Line.line30	2	-987.5	267.7
Line.line2a	2	-2060.9	1736.6	Line.line32	1	987.5	324.4
Line.line2b	1	2060.9	-1736.6	Line.line32	2	-980.0	-320.0
Line.line2b	2	-2046.1	1763.0	Line.line4a	1	2464.9	-976.9
Line.line10a	1	1876.1	-1823.0	Line.line4a	2	-2456.0	992.8
Line.line10a	2	-1870.5	1832.9	Line.line4b	1	2456.0	-992.8
Line.line10b	1	1870.5	-1832.9	Line.line4b	2	-2449.8	1003.7
Line.line10b	2	-1861.7	1848.6	Line.line12	1	1419.8	-1343.7
Line.line18	1	1861.7	-602.7	Line.line12	2	-1416.6	1346.7
Line.line18	2	-1844.0	619.2	Line.line20	1	1416.6	-136.5
Line.line25	1	754.0	252.1	Line.line20	2	-1410.8	141.8
Line.line25	2	-750.0	-250.0	Line.line27a	1	180.8	58.8
Line.line1	1	2342.7	-401.2	Line.line27a	2	-180.5	-59.4
Line.line1	2	-2339.6	404.1	Line.line27b	1	180.5	59.4
Line.line9a	1	2199.6	-454.1	Line.line27b	2	-180.0	-60.0
Line.line9a	2	-2184.4	468.4				
Line.line9b	1	2184.4	-468.4				
Line.line9b	2	-2174.7	477.6				
Line.line17	1	2174.7	117.7				

A Figura 59 traz o diagrama unifilar com as potências ativas e reativas representadas para o período da madrugada. Nela podemos observar a inversão da direção do fluxo de potência ativa na SE-01 que agora é quem alimenta o circuito, todavia ainda absorve potência reativa.

Já no período da noite, que possui a maior demanda, os fluxos de potência são como mostrados na Tabela 22:

Tabela 22 – Potências no período da noite sem GD

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Vsource.source	1	-18495.0	-2417.6	Line.line15	2	-3748.5	-740.4
Vsource.source	2	0.0	0.0	Line.line7b	1	3789.8	219.3
Line.line6	1	5801.5	530.8	Line.line7b	2	-3765.7	-196.2
Line.line6	2	-5699.7	-432.7	Line.line7a	1	3804.0	232.9
Line.line14a	1	5499.7	332.7	Line.line7a	2	-3789.8	-219.3
Line.line14a	2	-5354.0	-192.3	Line.line16b	1	3431.9	-527.2
Line.line14b	1	5354.0	192.3	Line.line16b	2	-3411.9	546.4
Line.line14b	2	-5347.0	-179.6	Line.line16a	1	3447.7	-512.1
Line.line22a	1	5223.3	141.6	Line.line16a	2	-3431.9	527.2
Line.line22a	2	-5194.4	-89.4	Line.line8b	1	4363.0	-190.7
Line.line22b	1	5194.4	89.4	Line.line8b	2	-4332.1	220.5
Line.line22b	2	-5169.2	-43.9	Line.line8a	1	4525.2	-34.8
Line.line28b	1	3468.8	567.6	Line.line8a	2	-4363.0	190.7
Line.line28b	2	-3466.0	-562.7	Line.line3a	1	2088.6	190.5
Line.line28a	1	3516.7	653.7	Line.line3a	2	-2077.0	-179.4
Line.line28a	2	-3468.8	-567.6	Line.line3b	1	2077.0	179.4
Line.line21c	1	4136.6	866.9	Line.line3b	2	-2073.9	-176.5
Line.line21c	2	-4115.9	-847.0	Line.line26	1	964.7	319.4
Line.line21b	1	4142.2	872.4	Line.line26	2	-961.1	-317.3
Line.line21b	2	-4136.6	-866.9	Line.line11	1	507.2	169.0
Line.line13b	1	4158.7	-177.3	Line.line11	2	-506.5	-168.6
Line.line13b	2	-4147.9	187.7	Line.line19	1	84.4	27.9
Line.line21a	1	4147.9	877.8	Line.line19	2	-84.3	-28.1
Line.line21a	2	-4142.2	-872.4	Line.line2a	1	3897.4	-485.3
Line.line13a	1	4228.3	-110.5	Line.line2a	2	-3872.8	529.6
Line.line13a	2	-4158.7	177.3	Line.line2b	1	3872.8	-529.6
Line.line5	1	4316.0	-45.0	Line.line2b	2	-3835.2	597.2
Line.line5	2	-4258.3	100.5	Line.line10a	1	3518.0	-699.8
Line.line31b	1	2592.8	284.9	Line.line10a	2	-3505.2	722.9
Line.line31b	2	-2574.1	-251.6	Line.line10b	1	3505.2	-722.9
Line.line31a	1	2611.4	318.2	Line.line10b	2	-3484.9	759.4
Line.line31a	2	-2592.8	-284.9	Line.line18	1	3484.9	239.6
Line.line29b	1	2717.0	377.6	Line.line18	2	-3414.6	-172.2
Line.line29b	2	-2700.3	-347.9	Line.line25	1	1461.6	484.1
Line.line29a	1	2720.1	383.2	Line.line25	2	-1442.3	-472.2
Line.line29a	2	-2717.0	-377.6	Line.line1	1	4143.7	503.1
Line.line23	1	3538.5	670.4	Line.line1	2	-4132.1	-492.0
Line.line23	2	-3510.1	-643.2	Line.line9a	1	3891.4	408.7
Line.line15	1	3765.7	757.0	Line.line9a	2	-3836.0	-355.4

Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]	Elemento	Term	P1 [kW]	Q1 [kvar]
Line.line9b	1	3836.0	355.4	Line.line4a	2	-4460.7	-47.9
Line.line9b	2	-3800.2	-321.0	Line.line4b	1	4460.7	47.9
Line.line17	1	3800.2	797.1	Line.line4b	2	-4439.5	-9.5
Line.line17	2	-3784.3	-781.8	Line.line12	1	2520.6	-618.0
Line.line24	1	704.8	233.9	Line.line12	2	-2513.8	624.6
Line.line24	2	-697.0	-229.5	Line.line20	1	2513.8	356.5
Line.line30	1	1694.8	95.1	Line.line20	2	-2490.8	-334.6
Line.line30	2	-1690.9	-91.4	Line.line27a	1	289.7	96.3
Line.line32	1	1690.9	560.7	Line.line27a	2	-288.7	-96.0
Line.line32	2	-1663.0	-543.2	Line.line27b	1	288.7	96.0
Line.line4a	1	4491.5	103.4	Line.line27b	2	-287.1	-95.7

O diagrama mostrado na Figura 60 apresenta os fluxos relativos aos dados da Tabela 22 onde podemos observar que a SE-01 também passa a fornecer potência reativa ao sistema.

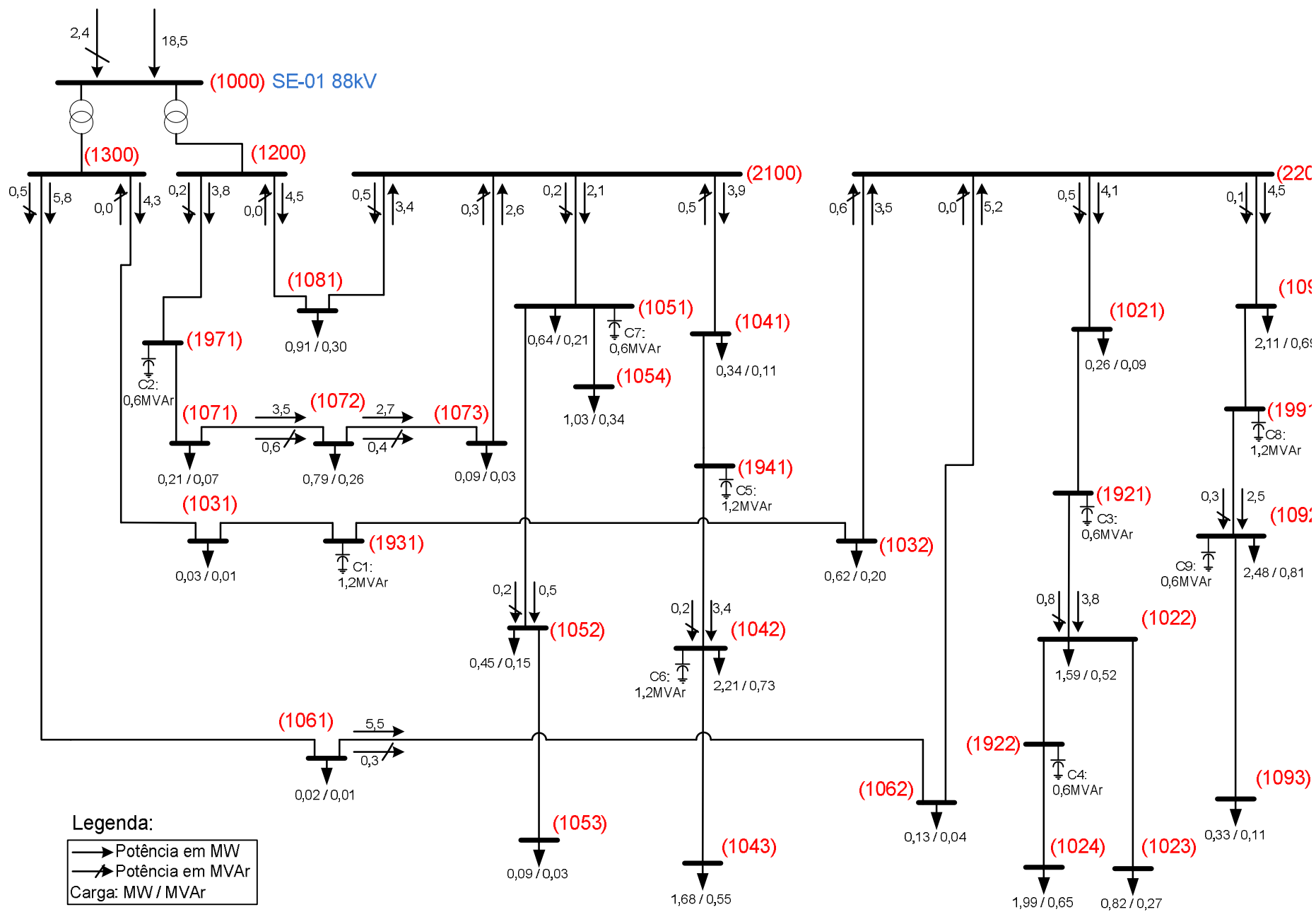


Figura 60. Fluxos de potência no período da noite sem cogeração

Podemos concluir, como esperado, que nos ramos radiais não houve mudança nos fluxos de potência ativa, já que na configuração normal, a potência ativa que fluía nestes ramos era somente a consumida pelas cargas, as quais não sofreram modificações. Todavia, a potência ativa que passa pelos ramos em anel é muito maior e com mudança de sentido quando comparada à configuração normal, visto que é a SE-01 que agora alimenta o sistema. Quanto aos reativos é observada inversão de sentido no período da madrugada, com leve aumento em módulo, já no período da noite verificamos aumento da potência reativa fornecida ao sistema pela SE-01, porém há diminuição nos módulos em alguns ramos.

As perdas no sistema para a configuração sem geração distribuída estão mostradas na Tabela 23:

Tabela 23 – Perdas nos sistema sem cogeração

Período	Perdas nos Cabos [kW]	Perdas nos Transformadores [kW]	Perdas Totais [kW]	Perdas Reativas [kVAr]	Potência Total das Cargas [kW]	Percentual Total de Perdas [%]
Madrugada	395.1	14.4	409.5	965.1	9150.0	4.48%
Manhã	734.3	25.8	760	1764.1	11887.9	5.90%
Tarde	607.0	21.4	628.5	1462.7	11725.7	5.36%
Noite	1354.7	48.3	1393.9	3269.4	17100.9	8.15%

A inibição dos cogeneradores aumentou significativamente as perdas no circuito no período da noite como pode ser visto na Figura 61 que mostra as perdas reais totais no sistema nas três configurações estudadas nos quatro períodos de carga. Também é possível observar uma redução considerável nas perdas no período da madrugada sem GD, já que não há a exportação de potência ativa da subestação principal, uma vez que os geradores estão desconectados.

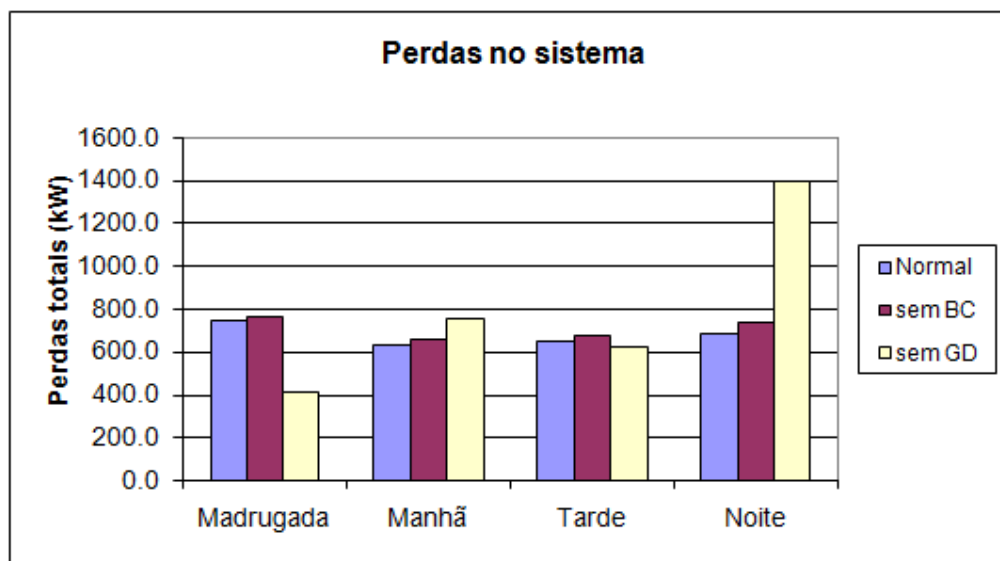


Figura 61. Perdas totais no sistema

6. Correntes de Falta

Para o circuito em sua configuração original, como descrito no Capítulo 3, realizamos estudos a respeito das correntes de falta e seu comportamento no decorrer de determinado alimentador seja trifásica, fase-fase ou fase-terra em todos os períodos de carga. O *OpenDSS* permite realizar tal estudo de algumas maneiras diferentes, todavia as mais completas necessitam que o circuito seja primeiro solucionado em algum modo não dinâmico, como o *snapshot*, por exemplo, que vem sendo utilizado até o momento. Caso este procedimento não seja cumprido, o algoritmo não terá de onde partir, portanto não haverá solução e o programa apresentará mensagens de erro.

Desta forma, após realizar a solução em modo padrão, o trecho de código exibido a seguir executará a análise de faltas, exibindo na tela um arquivo *.TXT com várias informações como a relação X/R de faltas polifásicas, tensões fase-neutro para faltas fase-terra e fase-fase e etc para todas as barras do circuito ativo. Este trecho de comando também cria um arquivo do tipo *.CSV que exhibe simplesmente os valores das correntes de falta trifásica, fase-terra e fase-fase.

```
//Modo de faltas  
set mode = faultstudy !Seleciona o modo "FaultStudy" para solução  
solve  
show faults !Gera e exhibe o arquivo "eletro_alm_FaultStudy.Txt"  
export faults !Gera o arquivo "eletro_alm_EXP_FAULTS.CSV"
```

Após a realização desta solução para os quatro períodos de carga: manhã, tarde, noite e madrugada; os resultados foram resumidos e aglutinados na Tabela 24. Podemos observar correntes de falta muito maiores nas barras 2300 e 2400 que são as barras diretamente ligadas aos grupos geradores, antes dos transformadores elevadores.

Para visualização e comparação de tais valores de corrente de falta, escolhemos o alimentador GPR_01 mostrado na Figura 62, na qual são exibidas as correntes de falta para os quatro períodos na barras ordenadas por sua respectiva distância da SE-01, onde o alimentador se inicia, até o Grupo 1 da SE-02 na 2300, onde podemos verificar uma potência de curto-circuito bem maior quando comparada ao resto do sistema. As altas correntes de falta na barra 2300, e também na 2400, são explicadas pela potência que pode ser gerada pelos grupos geradores, entregues diretamente a esse barramentos; a queda nas correntes de falta observada nas barras localizadas após os transformadores TG1 e TG2 deve-se à limitação da máxima potência que estes podem transmitir.

Tabela 24 – Correntes de falta

Barra	Manhã			Tarde			Noite			Madrugada		
	3F	Fase-Terra	Fase-Fase	3F	Fase-Terra	Fase-Fase	3F	Fase-Terra	Fase-Fase	3F	Fase-Terra	Fase-Fase
1000	3441	1609	2980	3448	1613	2986	3396	1586	2941	3464	1622	3000
1300	4755	5002	4118	4791	5042	4149	4534	4764	3927	4868	5125	4216
1200	4597	4796	3981	4630	4831	4010	4402	4587	3812	4700	4905	4070
2300	100364	144477	86585	101519	146180	87587	93292	134093	80455	104015	149867	89753
2400	102016	146526	87985	103340	148492	89137	93920	134668	80970	106086	152567	91523
2100	3555	4637	3079	3589	4683	3108	3347	4361	2899	3662	4781	3171
2200	3693	4785	3198	3731	4836	3231	3457	4473	2994	3810	4942	3299
1061	3924	3526	3398	3959	3560	3429	3715	3332	3217	4033	3630	3493
1062	3514	3378	3043	3550	3416	3074	3300	3160	2858	3625	3495	3139
1032	3195	2690	2767	3228	2720	2795	3003	2520	2601	3296	2782	2854
1931	3240	2671	2806	3273	2700	2834	3050	2507	2642	3341	2759	2893
1031	3779	3273	3273	3813	3304	3302	3580	3095	3100	3884	3368	3363
1073	2987	2366	2587	3014	2388	2610	2823	2230	2445	3074	2438	2662
1072	3224	2582	2792	3251	2605	2816	3063	2450	2653	3310	2653	2866
1071	3528	2944	3056	3557	2968	3080	3360	2800	2909	3618	3020	3133
1971	3764	3266	3260	3793	3292	3285	3589	3110	3108	3857	3348	3340
1081	3399	3441	2944	3432	3476	2972	3204	3234	2775	3502	3551	3033
1051	2722	2657	2358	2751	2685	2382	2551	2484	2209	2813	2749	2436
1054	2273	2024	1968	2298	2047	1990	2122	1887	1838	2354	2098	2038
1052	2398	2186	2076	2424	2211	2099	2240	2038	1940	2482	2265	2149
1053	1981	1678	1715	2004	1698	1735	1843	1559	1596	2055	1742	1779
1041	2211	1741	1915	2234	1757	1935	2075	1644	1797	2282	1789	1976
1941	1784	1241	1545	1802	1251	1561	1672	1178	1448	1842	1271	1595
1042	1412	934	1222	1427	940	1235	1321	891	1144	1459	954	1264
1043	1142	755	989	1155	762	1000	1064	718	921	1185	775	1026

Barra	Manhã			Tarde			Noite			Madrugada		
	3F	Fase-Terra	Fase-Fase	3F	Fase-Terra	Fase-Fase	3F	Fase-Terra	Fase-Fase	3F	Fase-Terra	Fase-Fase
1021	3482	4159	3015	3518	4206	3047	3256	3881	2820	3595	4303	3113
1921	2255	1902	1953	2282	1923	1976	2098	1771	1817	2338	1970	2025
1022	2126	1744	1841	2151	1764	1863	1976	1625	1711	2205	1807	1909
1023	1282	960	1111	1301	973	1127	1179	885	1021	1340	1001	1161
1922	1975	1571	1710	1999	1590	1731	1834	1462	1588	2051	1629	1776
1024	1441	1087	1248	1461	1101	1265	1331	1008	1153	1503	1130	1301
1091	2639	2299	2286	2669	2325	2311	2462	2143	2132	2730	2378	2364
1991	2468	2065	2137	2496	2089	2162	2299	1923	1991	2555	2138	2213
1092	2009	1537	1740	2034	1556	1762	1866	1430	1616	2086	1594	1806
1093	865	587	749	878	596	761	792	539	686	907	615	785

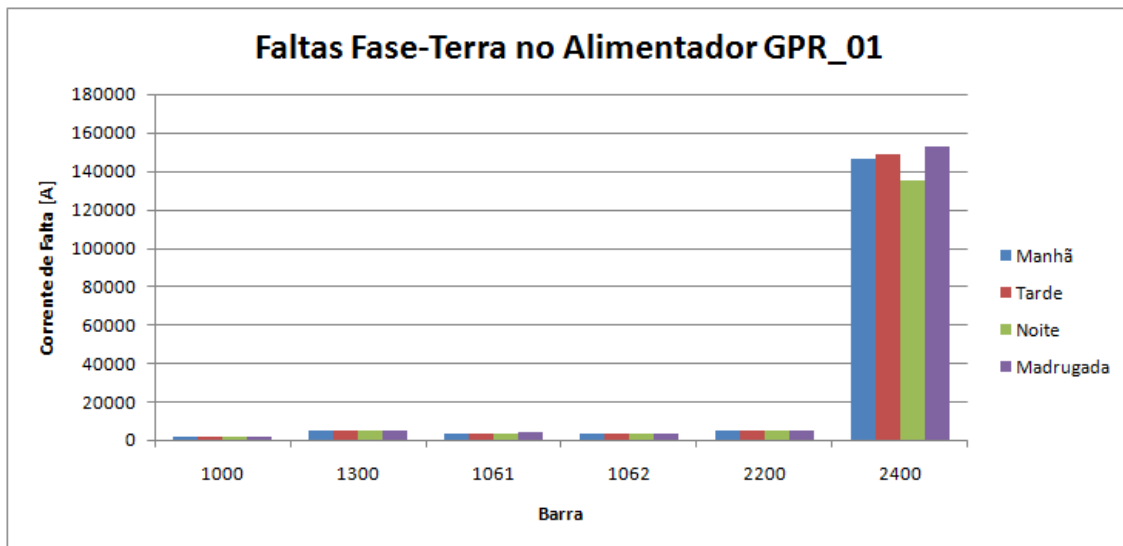


Figura 62. Correntes de falta fase-terra no decorrer do alimentador GPR_01

A Figura 63 abaixo mostra as altas correntes de falta na barra 2400 que está diretamente ligada ao Grupo 2 de geradores. Do gráfico pode-se notar que as maiores correntes de falta ocorrem no período da madrugada, onde a demanda de carga é a menor sobrando, portanto, capacidade de potência para um possível curto-circuito; de maneira análoga as correntes mais baixas são encontradas no período da noite, no qual a cargas consomem uma maior potência dos geradores.

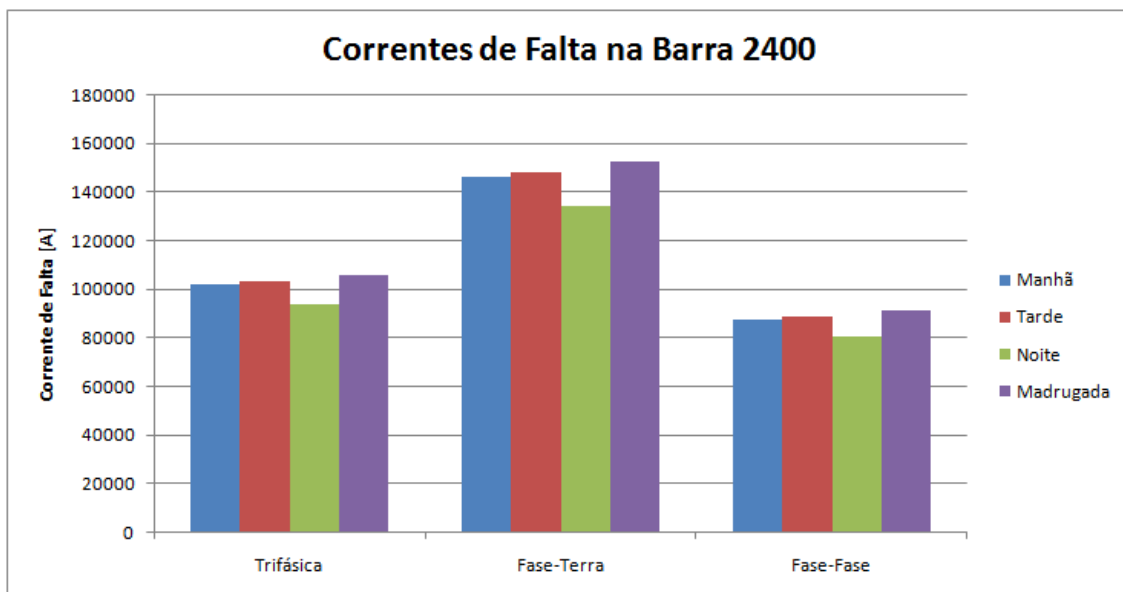


Figura 63. Correntes de falta na barra 2400 nos quatro períodos de carga

Para visualização do efeito da diminuição das correntes de falta com o aumento da distância do alimentador, foi escolhido o alimentador EPE_02 que parte do Grupo 2 de geradores e é o alimentador mais longo do sistema sob nossa análise. A Figura 64 mostra, para o período da madrugada que, como visto possui as maiores potência de curto, as

correntes de falta a partir da barra 2200 que é a barra imediatamente após o transformador TG2 que reduz as correntes de falta calculadas para a barra 2400. Também é possível observar que no decorrer do alimentador as correntes de falta trifásica tornam-se as mais altas, sendo que na barra 1093, localizada a 10,69km da subestação SE-03, a corrente de falta fase-terra é a menor das três.

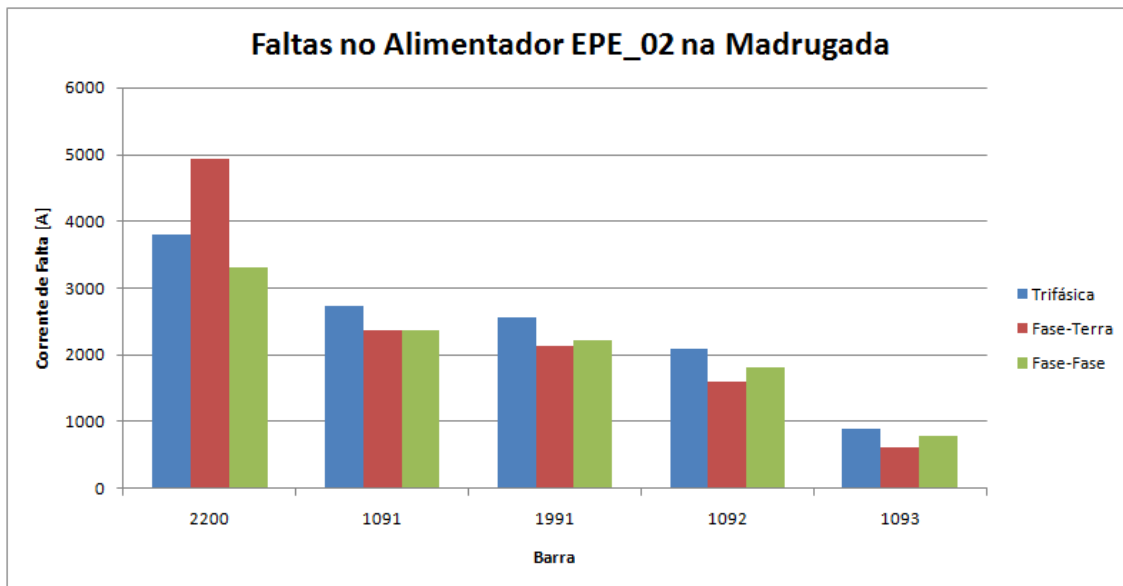


Figura 64. Correntes de falta no alimentador EPE_02 no período da madrugada

Na Figura 65 podemos observar as correntes de falta em todos os períodos calculadas para a barra 1093 que é a mais distante dos geradores e possui as menores correntes de falta observadas no sistema (Tabela 24).

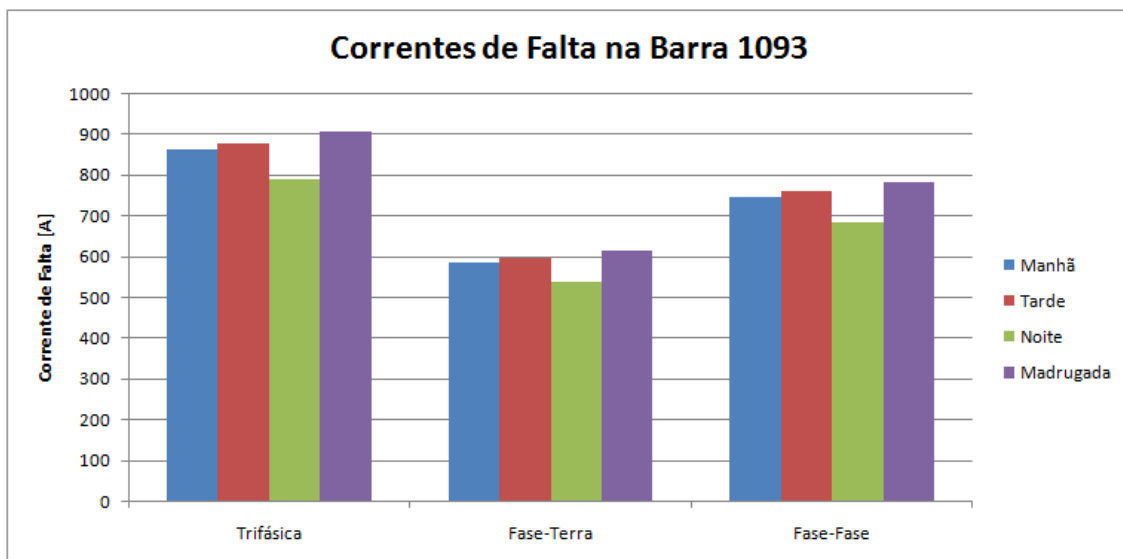


Figura 65. Correntes de falta na barra 1093 nos quatro períodos de carga

Se compararmos a Figura 65, referente à barra mais distante, à Figura 63 que, por sua vez, se refere à barra mais próxima dos geradores, podemos observar que as faltas fase-terra são as mais críticas no início do alimentador, porém, no decorrer do alimentador, este tipo de falta dá lugar aos outros tipos, como podemos observar, na barra 1093, as faltas fase-terra são as menos ofensivas ao sistema, tendo as faltas trifásicas as mais altas potências.

De modo geral podemos concluir que as faltas mais ameaçadoras são as faltas trifásicas e fase-terra ocorrentes em períodos de menor demanda nas barras mais próximas dos geradores, principalmente nas barras anteriores aos transformadores.

7. Realocação dos Bancos de Capacitores

Visando a diminuição das perdas de potência no sistema, melhoria nos perfis de tensão e, consequentemente, economia financeira, foram propostas novas localizações para os bancos de capacitores. Analisaremos aqui a solução proposta dentre os diversos fatores técnicos envolvidos, sabendo dos conflitos entre melhoria de perfil de tensão, redução de perdas, custos de investimentos e etc. O objetivo deste capítulo é dar uma visão geral do problema de alocação de bancos de capacitores levando em consideração as alterações nos valores de tensão, no fluxo de potência e nas perdas do circuito.

A escolha das barras para alocação dos bancos foi baseada na configuração original do circuito. Primeiramente, tomando como base os resultados da seção 4.1, alguns bancos foram realocados para as barras onde havia queda mais acentuada no valor de tensão. Uma nova análise foi executada e, nas barras onde ainda observava-se uma maior queda de tensão, foram adicionados novos bancos de capacitores de valores iguais aos já existentes, conforme a necessidade.

Várias simulações foram realizadas e, dentre essas, a que aqui apresentamos se mostrou mais adequada e muito conveniente para nossa proposta de estudo. A adição de mais bancos de capacitores poderá prejudicar o valor do fator de potência em alguns pontos do circuito, onde haveria mais reativos capacitivos do que indutivos; além disso, a adição de mais bancos torna-se economicamente inviável para a concessionária.

A situação proposta consiste na utilização de capacitores fixos, de uso contínuo e direto, análogos aos que vem sendo utilizados. A Tabela 25 mostra a relação dos capacitores empregados, nota-se o acréscimo de dois bancos, C10 e C11, a troca dos capacitores C8 e C9 entre as barras em que estão localizados, a nova localização dos bancos C1 e C2 e a diminuição da potência do capacitor C6 quando a nova configuração é comparada à configuração original.

Tabela 25 – Novos capacitores do sistema

Capacitor	Nova Configuração		Configuração Original	
	Barra	Q [kVAr]	Barra	Q [kVAr]
C1	1032	1200	1931	1200
C2	1072	600	1971	600
C3	1921	600	1921	600
C4	1922	600	1922	600
C5	1941	1200	1941	1200
C6	1042	600	1042	1200
C7	1052	600	1051	600
C8	1991	600	1991	1200
C9	1092	1200	1092	600
C10	1043	600		
C11	1023	600		

Abaixo mostramos o trecho de código utilizado para declarar a nova configuração dos bancos de capacitores ao *OpenDSS*:

```
//Novos Bancos de Capacitores
```

```
new capacitor.C1 bus1=1032 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C2 bus1=1072 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C3 bus1=1921 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C4 bus1=1922 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C5 bus1=1941 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C6 bus1=1042 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C7 bus1=1052 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C8 bus1=1991 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C9 bus1=1092 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C10 bus1=1043 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C11 bus1=1023 phases=3 kvar=600 kv=13.8
```

As análises de perfis de tensão e fluxo de potência para esta nova situação, em comparação com a configuração original do circuito como descrita no capítulo 3, foram executadas para os períodos da noite e madrugada que, por possuírem a maior e menor demanda, respectivamente, elucidam as análises do sistema por completo.

7.1. Perfis de Tensão

Iniciaremos as análises de tensão no alimentador GPR_01, mostrado nas Figuras 66 e 67, que mesmo não possuindo nenhum capacitor, apresenta melhorias significativas na tensão dos barramentos 1061 e 1062 no período noturno.

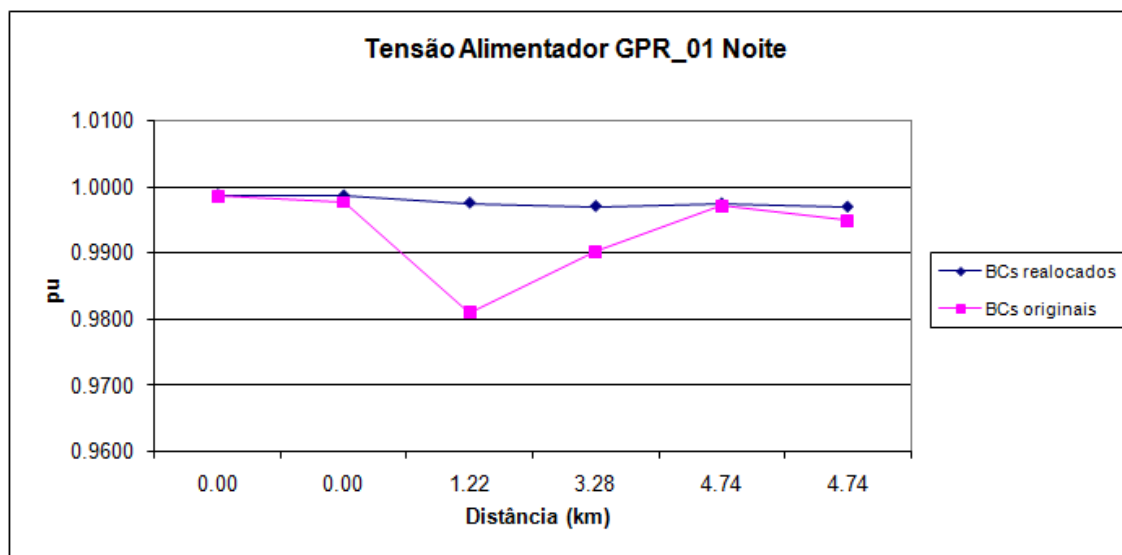


Figura 66. Tensões no alimentador GPR_01 no período da noite com realocação de BCs

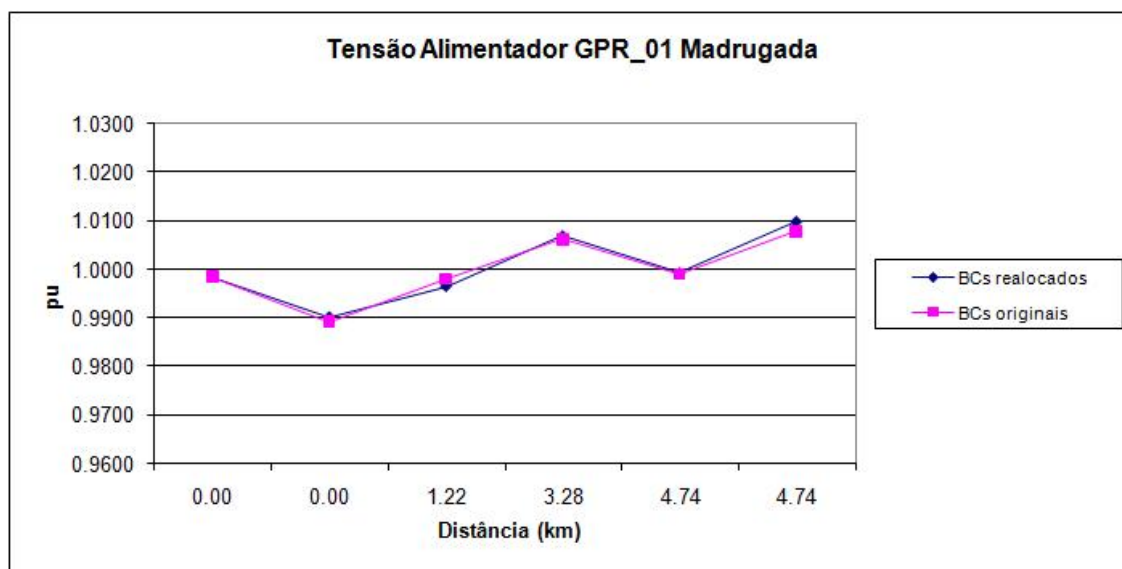


Figura 67. Tensões no alimentador GPR_01 no período da madrugada com realocação de BCs

As tensões no alimentador GPR_02 são mostradas nas Figuras 68 e 69. Semelhantemente ao observado no alimentador GPR_01, as tensões no decorrer do alimentador GPR_02 tornaram-se mais estáveis e em melhores níveis de qualidade pela mudança do banco de capacitores C1 da barra 1931 para a 1032, mais próxima do grupo gerador.

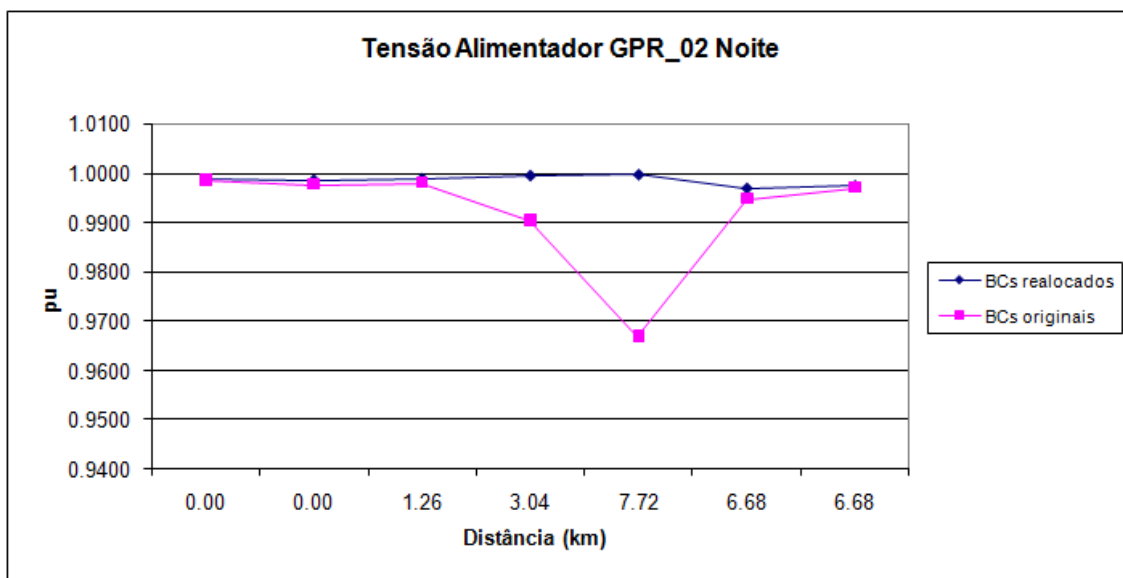


Figura 68. Tensões no alimentador GPR_02 no período da noite com realocação de BCs

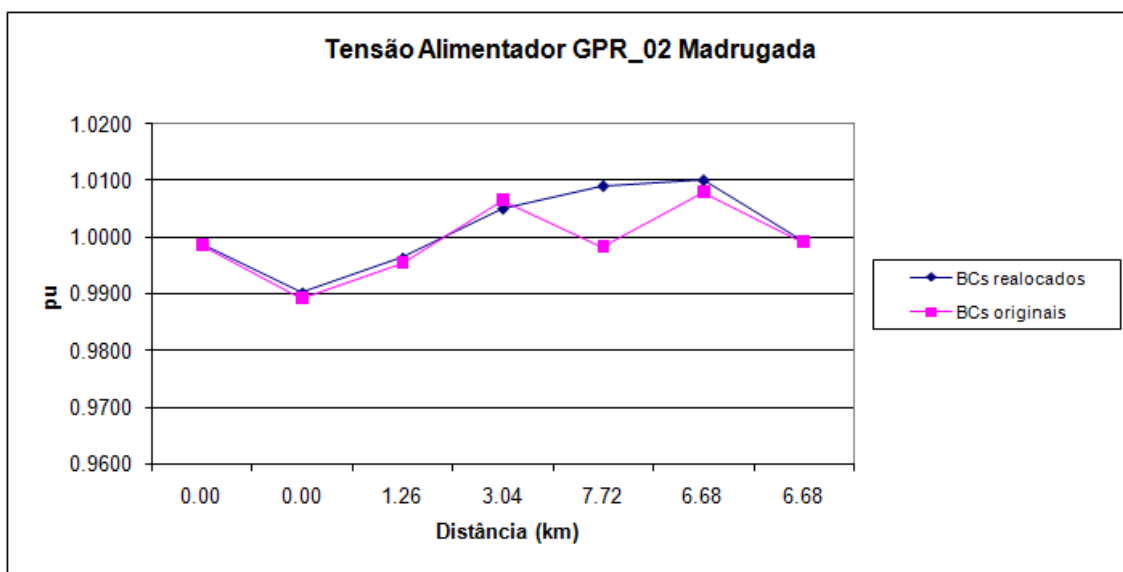


Figura 69. Tensões no alimentador GPR_02 no período da madrugada com realocação de BCs

A Figura 70, por sua vez, mostra as tensões no alimentador GPR_03 no período da noite, no qual o capacitor C2 foi movido da barra 1971 para a barra 1072. Como pode ser visto, ocorreram melhoras expressivas no período da noite, onde a tensão na barra em que o banco de capacitores está instalado subiu de 0,9623pu para 0,9921pu.

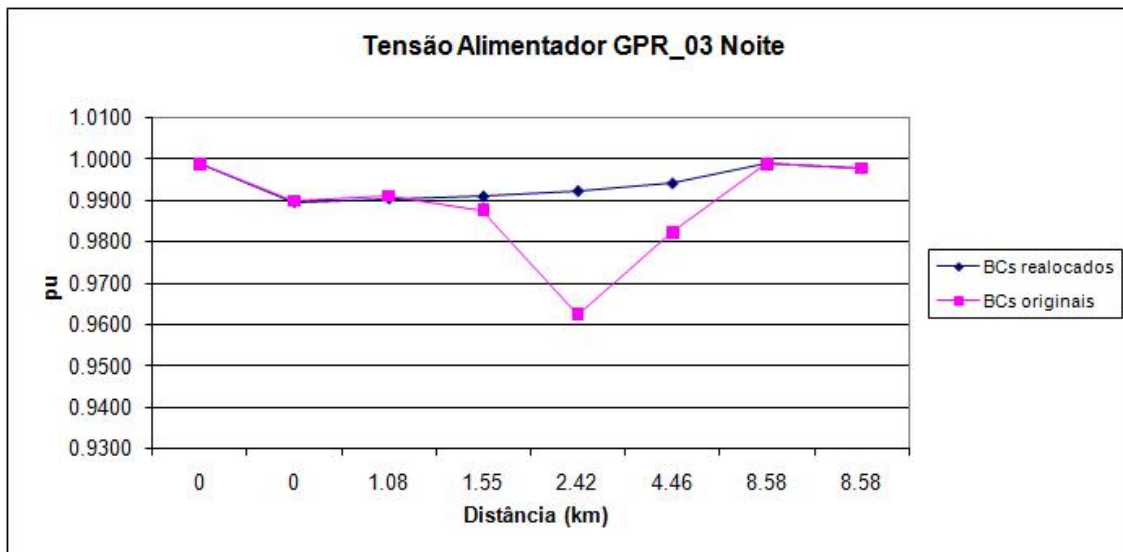


Figura 70. Tensões no alimentador GPR_03 no período da noite com realocação de BCs

No período da madrugada, ainda no alimentador GPR_03, nota-se um perfil menos variante, principalmente devido à queda de tensão na barra 1071 que na configuração original ficava imediatamente antes dos capacitores – seguindo o sentido do fluxo de potência, dos geradores para a SE-01.

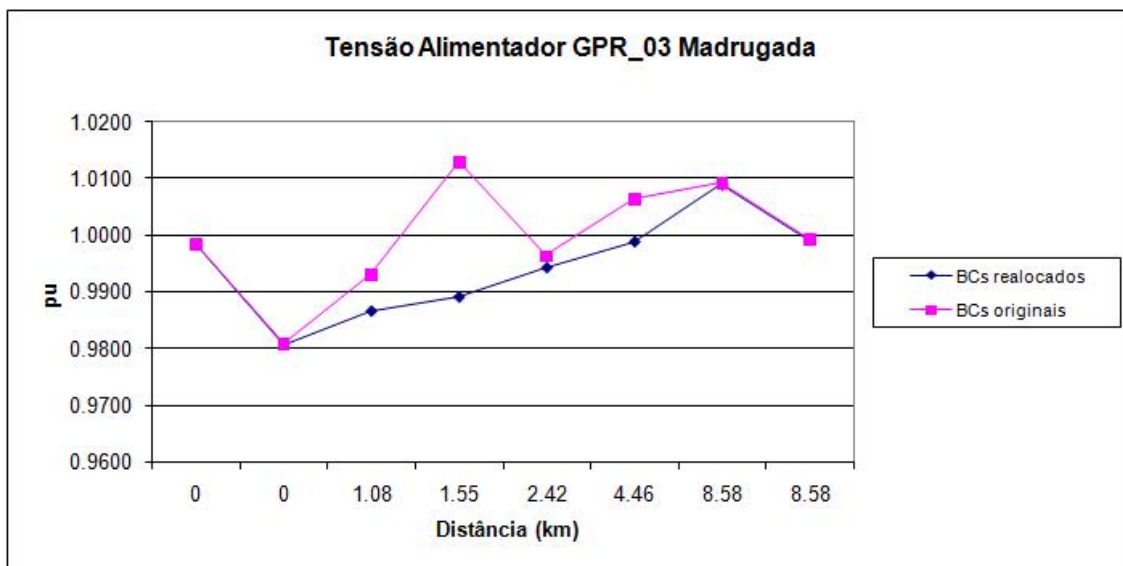


Figura 71. Tensões no alimentador GPR_03 no período da madrugada com realocação de BCs

Analisando as tensões no alimentador GPR_04, que também não possui bancos de capacitores, através das Figuras 72 e 73, podemos verificar que não foram observadas alterações significativas nos valores de tensão. Isso se deve ao fato de existir somente uma barra, a 1081, localizada a pouca distância, entre as subestações transformadoras.

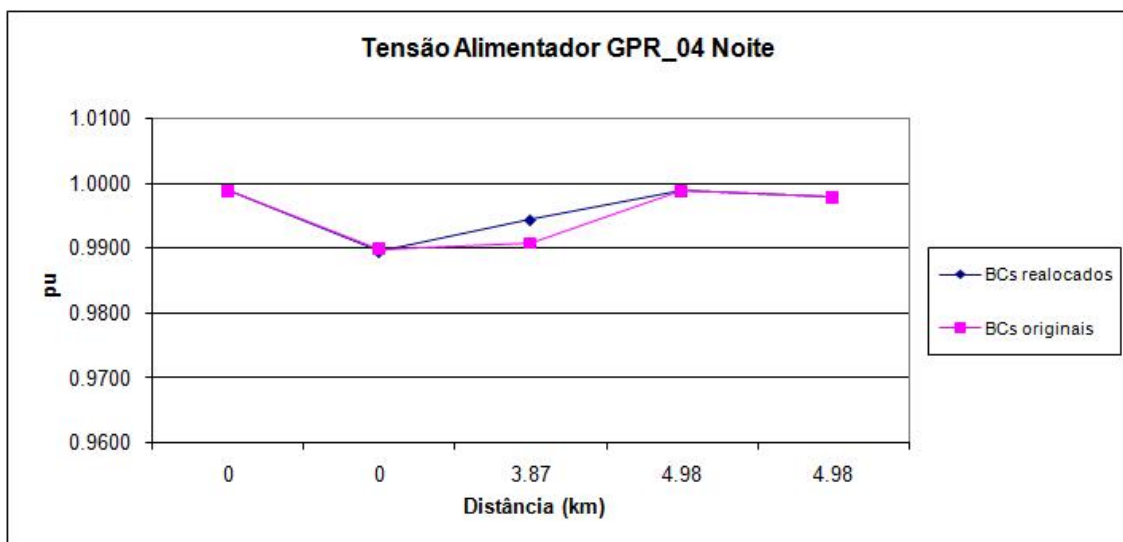


Figura 72. Tensões no alimentador GPR_04 no período da noite com realocação de BCs

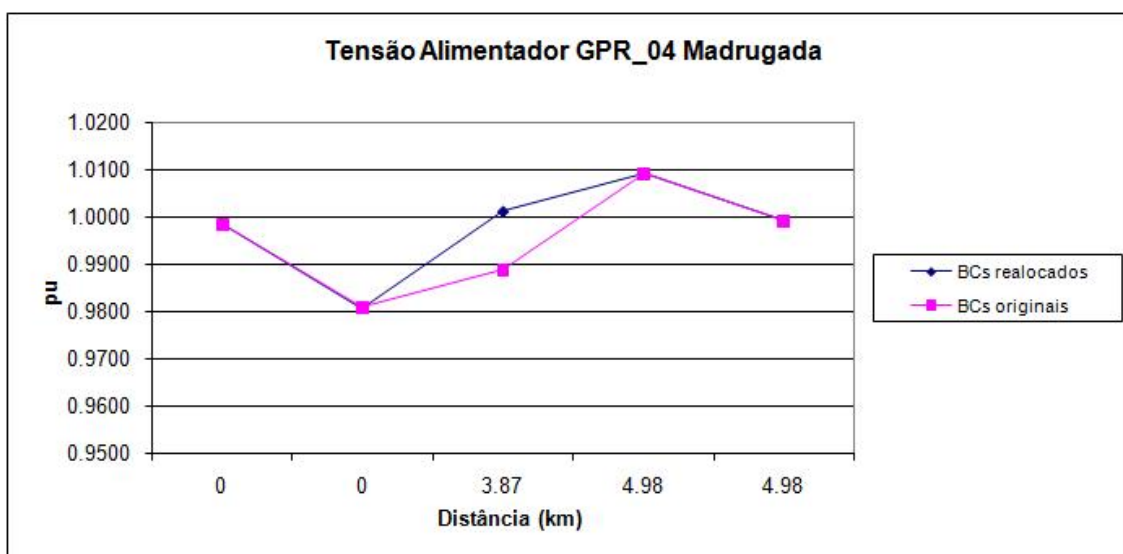


Figura 73. Tensões no alimentador GPR_04 no período da madrugada com realocação de BCs

Iniciando os ramos radiais do circuito, as Figuras 74 e 75 mostram as tensões no alimentador CPC_01 que parte do Grupo 1 de geradores e vai até a barra 1053, localizada a 2,71km de distância dos geradores. Como esperado e já visto anteriormente, as tensões nos barramentos deste alimentador caem significativamente em suas últimas barras. A realocação do banco de capacitores C7, de 600kVAr, da barra 1051 para a 1052, somada às outras modificações nos capacitores do circuito, provocou uma melhora de 0.0456pu na tensão observada na última barra do alimentador.

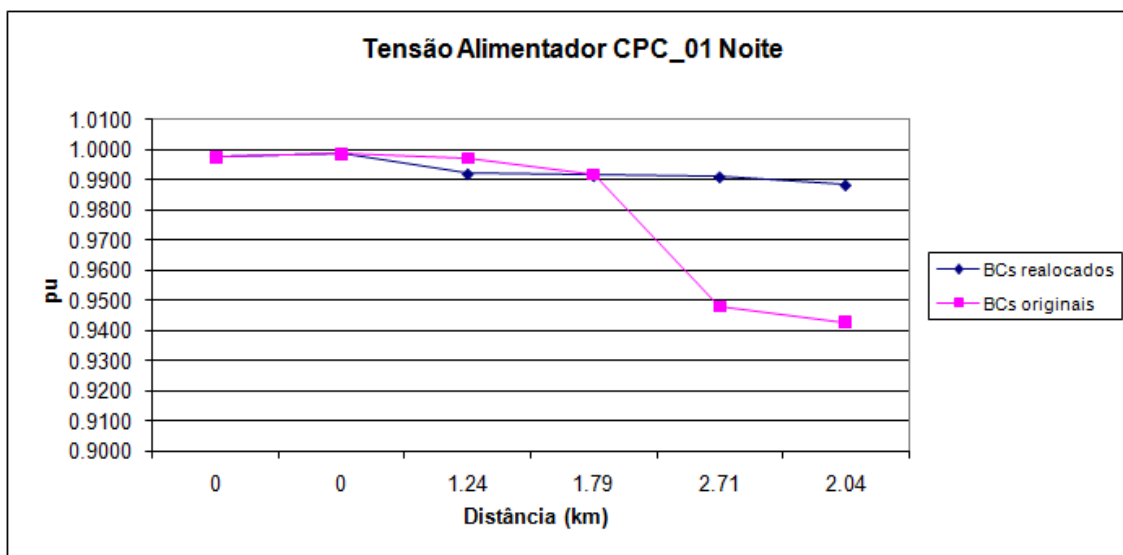


Figura 74. Tensões no alimentador CPC_01 no período da noite com realocação de BCs

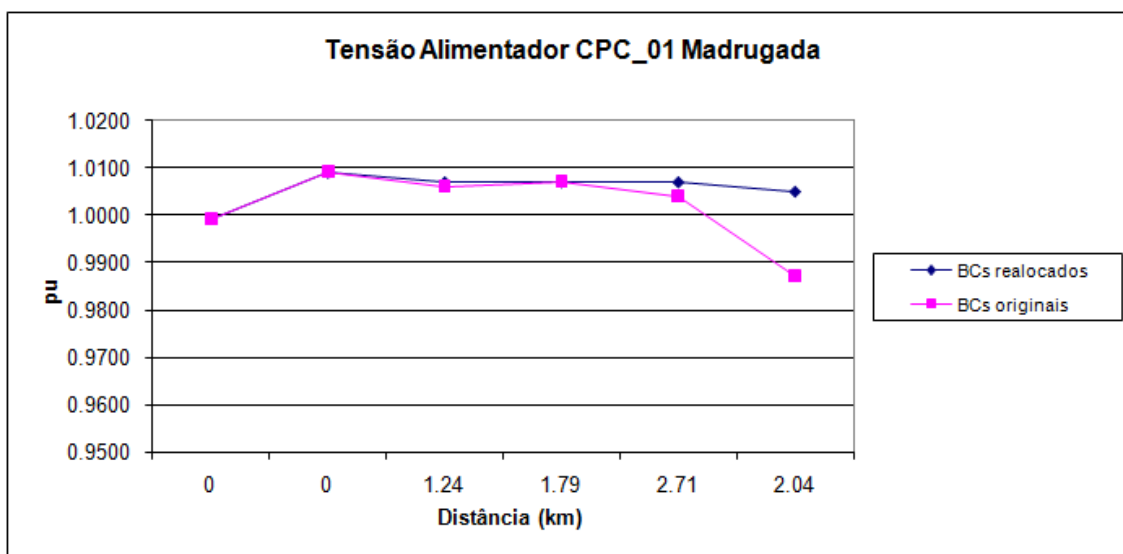


Figura 75. Tensões no alimentador CPC_01 no período da madrugada com realocação de BCs

O segundo alimentador radial que parte do Grupo 1 de geradores é o EPE_01, cujas tensões são mostradas na Figuras 76 e 77. Originalmente este alimentador possuía os capacitores C5 e C6, ambos de 1200kVAr, nas barras 1941 e 1042 respectivamente; para a nova configuração o banco C5 foi mantido, o banco C6 foi reduzido para 600kVAr e foi adicionado o banco C10, também de 600kVAr, na barra1043 que é a mais distante neste alimentador.

Podemos ressaltar que no período da noite, onde a demanda é maior, as tensões com a nova configuração de bancos de capacitores ficaram suavemente menores em relação às tensões do circuito original, atingindo 0,950pu na barra 1043 que dista 8,65km dos

geradores. Em contrapartida, no período da madrugada, com carga bem mais baixa, pode-se notar elevação na tensão quando feita a mesma comparação atingindo um valor de 1,0160 na barra 1941, onde se localiza o banco de capacitores C5. Ambos os valores se encontram na faixa considerada adequada pela ANEEL.

Também é interessante notar que a tensão na barra 1042, penúltima barra no decorrer do alimentador, praticamente não sofreu alteração pela realocação dos bancos de capacitores. Isso pode ser explicado pelo alto valor de carga reunida neste barramento se comparado às outras barras do circuito.

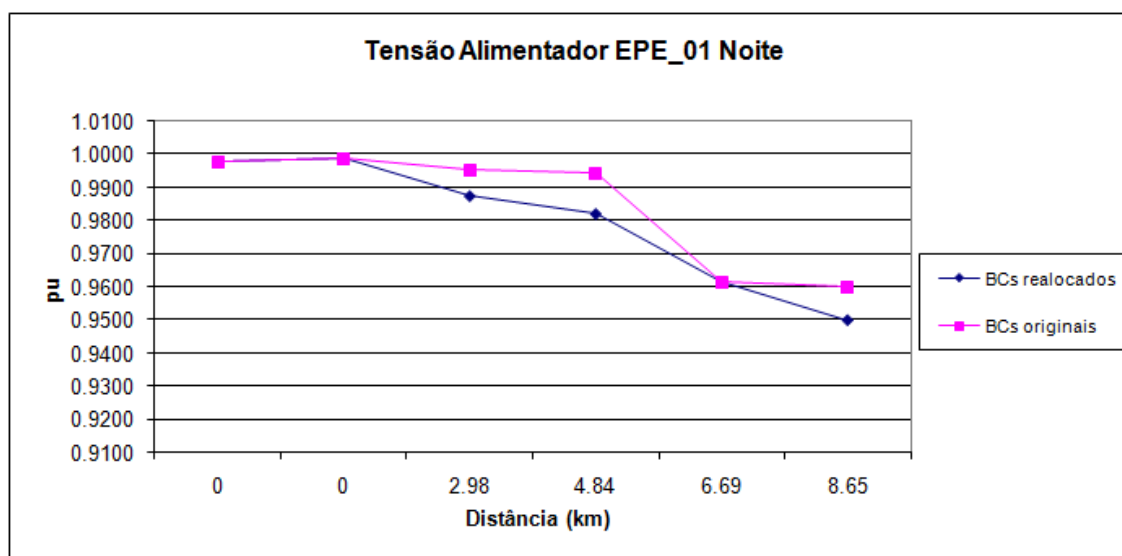


Figura 76. Tensões no alimentador EPE_01 no período da noite com realocação de BCs

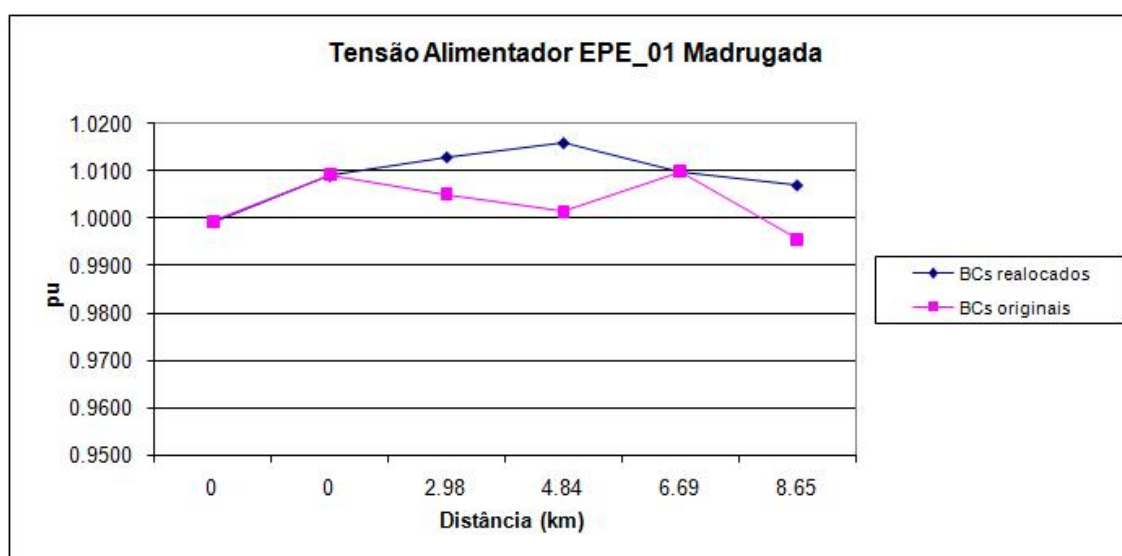


Figura 77. Tensões no alimentador EPE_01 no período da madrugada com realocação de BCs

As Figuras 78 e 79, por sua vez, mostram os perfis de tensão no alimentador CPC_02, nelas podemos verificar, de modo geral, que os níveis de tensão sofreram redução em seus valores observados em alguns pontos de carga. Na nova configuração de BCs, este alimentador manteve seus bancos C3 e C4 como eram originalmente e ainda foi adicionado o banco C11 na barra 1023 que é a mais distante.

No período de menor carga pode-se observar uma suavização no perfil de tensão no decorrer do alimentador e conseqüente melhoria nos valores de tensão observados. O caso mais crítico, contudo, é observado no período da noite; em muitas barras a tensão caiu sendo a menor tensão verificada na barra 1023, de 0,9482pu, todavia, considerada adequada pela ANEEL.

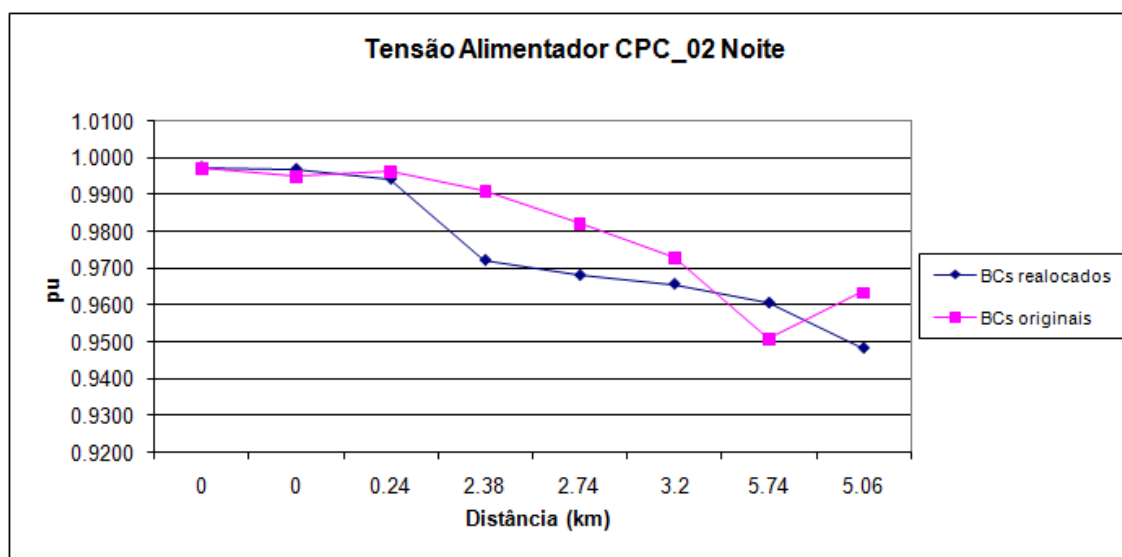


Figura 78. Tensões no alimentador CPC_02 no período da noite com realocação de BCs

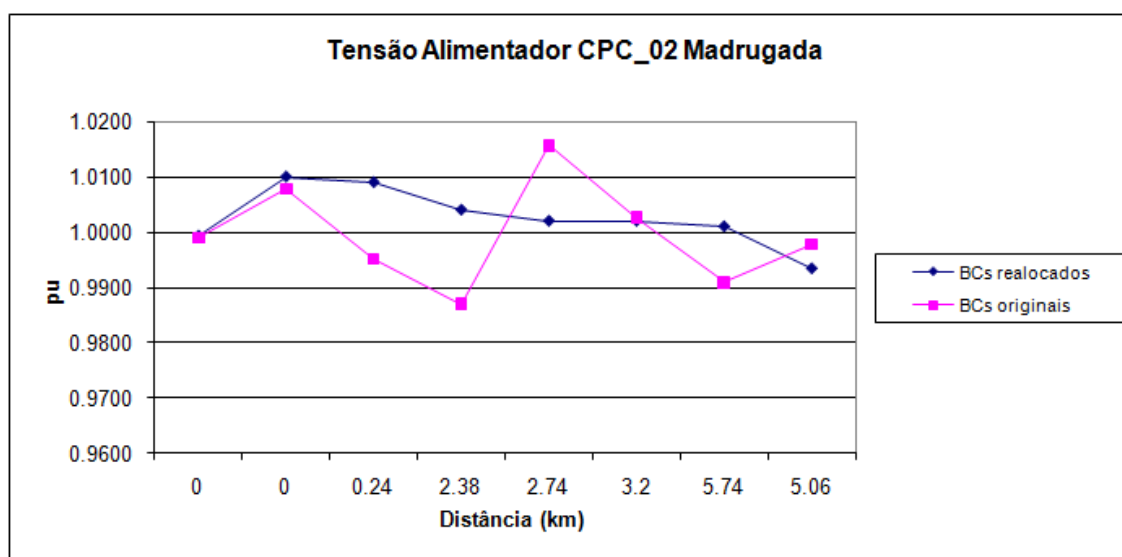


Figura 79. Tensões no alimentador CPC_02 no período da madrugada com realocação de BCs

O último ramo a ser analisado é o EPE_02 que, assim como o CPC_02 visto acima, também é alimentado pelo Grupo 2 de geradores, as Figuras 80 e 81 também ilustram situação semelhante. É verificada elevação de tensão no período de menor carga e queda de tensão no período de maior carga.

O alimentador EPE_02 apresenta o pior cenário encontrado no sistema com a nova configuração dos capacitores, que inclui somente a troca dos bancos C8 e C9 entre si. A última barra deste alimentador se localiza a 10,69km de distância dos geradores e, no período de carga mais crítico, onde possuía tensão de 0,984pu, apresenta agora 0,9673pu, ainda se encontrando na faixa de valores adequados pela ANEEL.

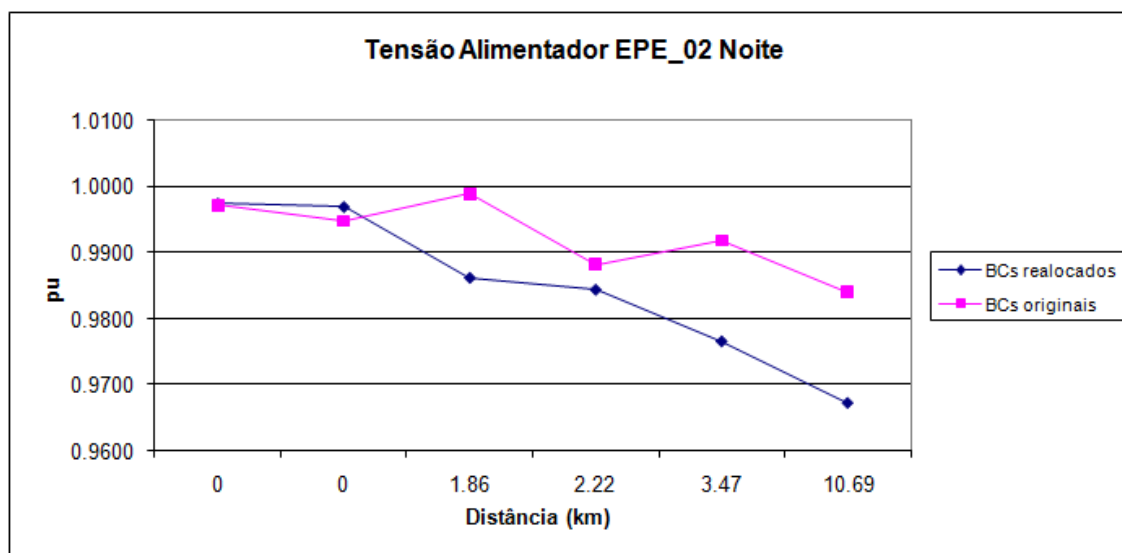


Figura 80. Tensões no alimentador EPE_02 no período da noite com realocação de BCs

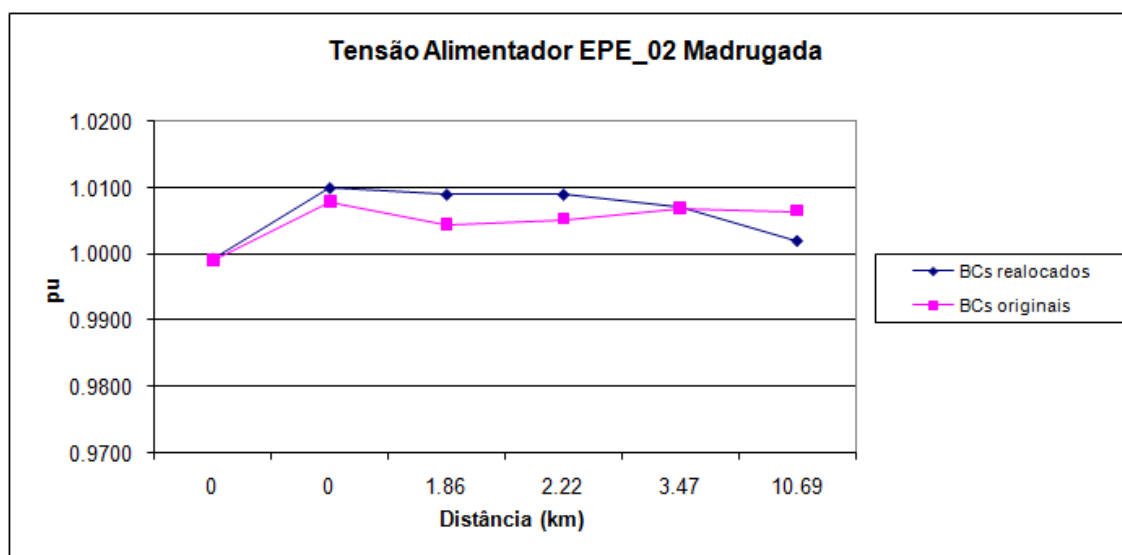


Figura 81. Tensões no alimentador EPE_02 no período da madrugada com realocação de BCs

7.2. Fluxo de Potência

A Figura 82 mostra os sentidos em módulos das potências ativas e reativas circulantes no sistema no período da noite com as novas localizações e valores dos bancos de capacitores.

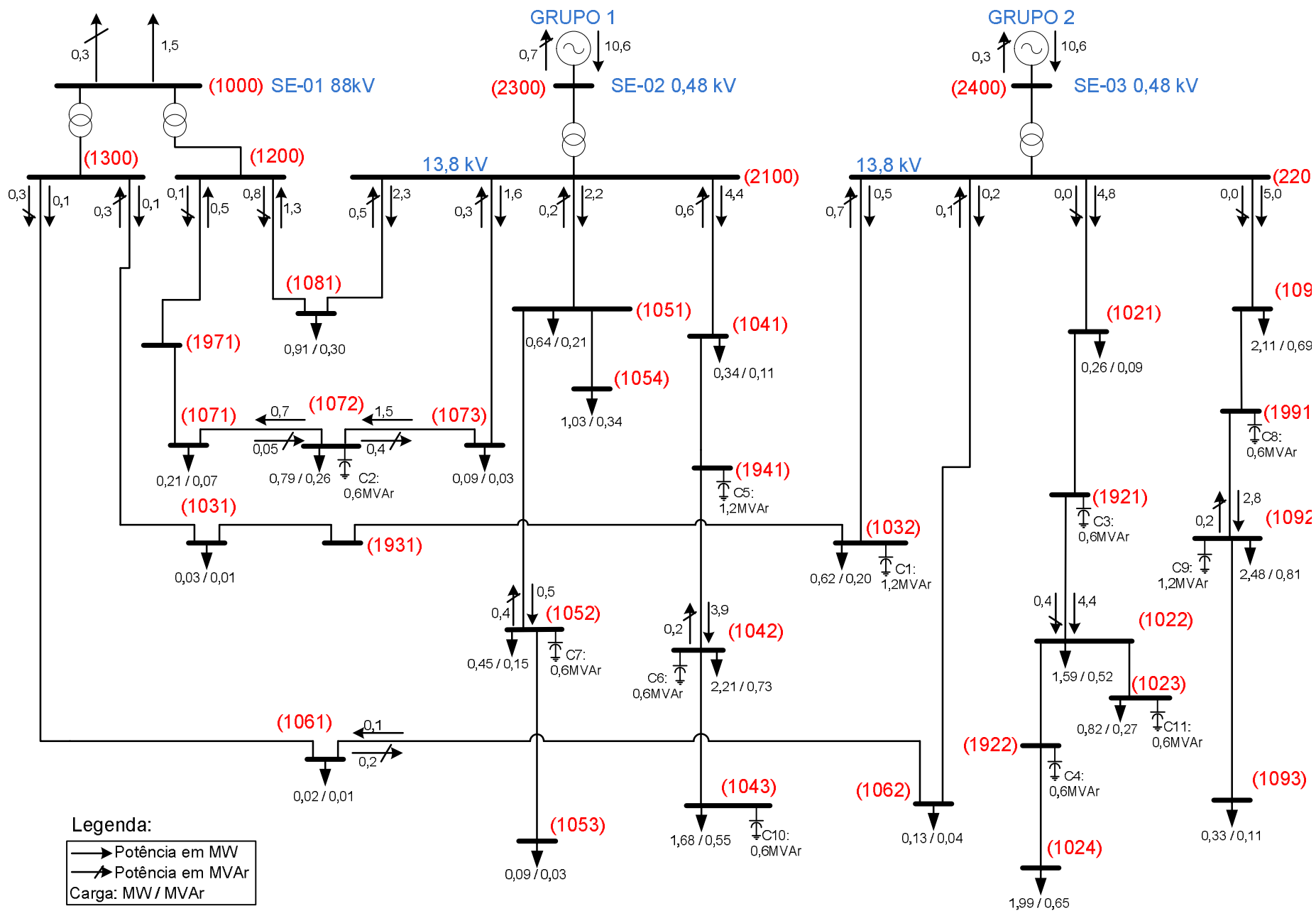


Figura 82. Fluxos de potência no período da noite com nova configuração de BCs

Se compararmos a Figura 82 à Figura 51, poderemos verificar as alterações ocorridas entre os fluxos de potência na configuração original e na nova configuração com realocação dos bancos de capacitores. De modo geral, podemos concluir que houve diminuição na potência reativa circulante no circuito.

Alguns pontos merecem destaque, os reativos consumidos pelo Grupo 2 de geradores aumentaram de 0,15MVar para 0,3MVar, a potência reativa do alimentador CPC_02 na saída da barra 2200 foi de 0,6MVar a 0,0MVar, ocorreu inversão no sentido do fluxo de reativos nas barras 1092 e 1052, bem como na barra 1000, SE-01 que representa o restante do sistema e antes entregava 1,1MVar ao circuito e agora absorve 0,3MVar.

Já a Figura 83 mostra os fluxos no período da madrugada e deve ser comparada à Figura 54 que trata da configuração original. Como este é o período de menor demanda e nenhum capacitor foi desligado, não observamos grandes mudanças. Dentre as principais podemos destacar: a inversão do sentido de fluxo de reativos com aumento de valor modular nas barras 1092, 1022 e 1052 e aumento na potência reativa consumida pelo Grupo 2 de geradores. Não foram observadas alterações significativas nas potências trocadas com a SE-01.

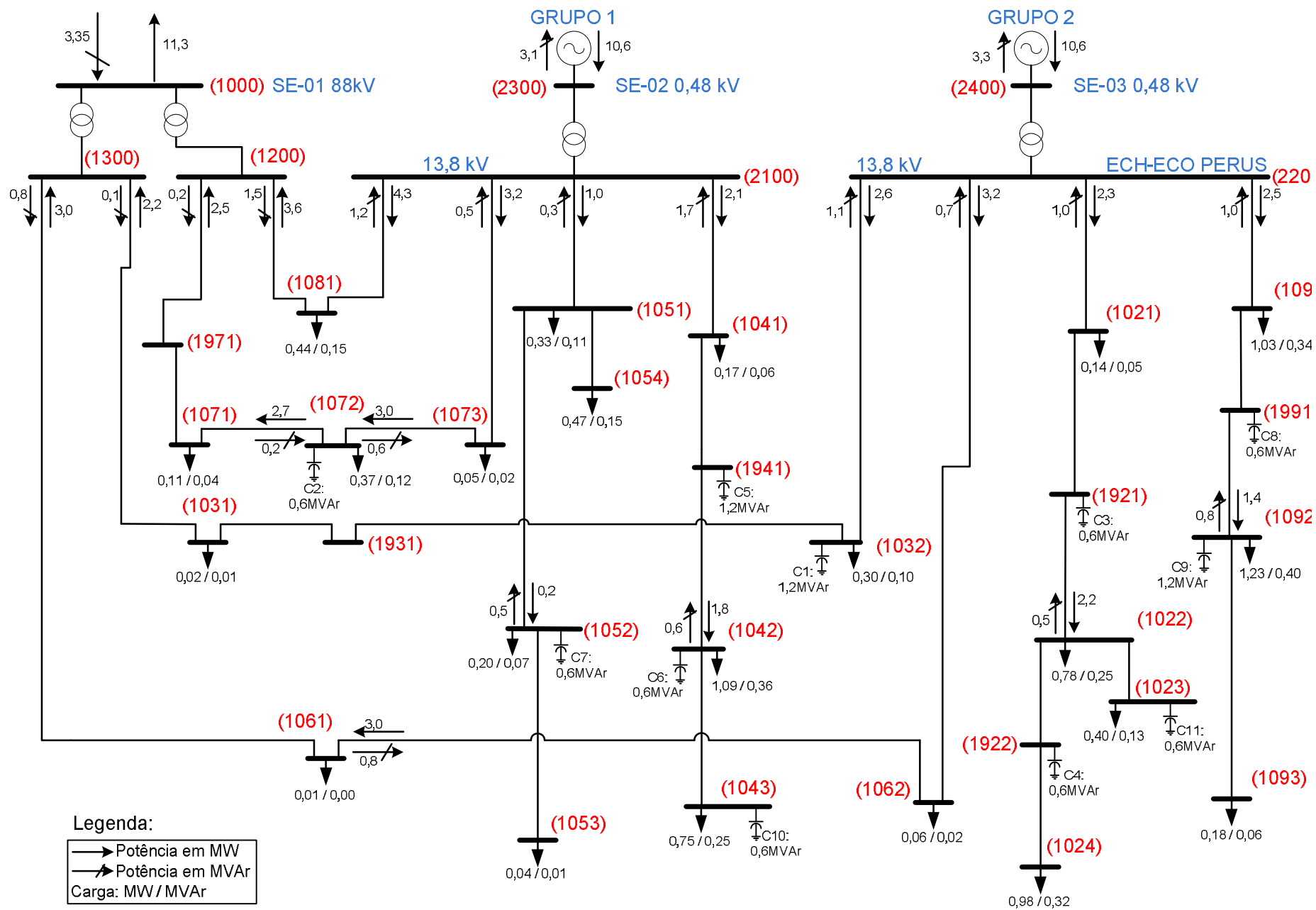


Figura 83. Fluxos de potência no período da madrugada com nova configuração de BCs

7.3. Perdas

Um dos principais objetivos da instalação de bancos de capacitores em um sistema de distribuição de energia elétrica é a diminuição das perdas no sistema. A Tabela 26 abaixo mostra que no período da noite, pela realocação dos bancos de capacitores, houve uma diminuição nas perdas reais de 6,4kW e nas reativas de 4,4kVAr, com uma redução de 0,04% no percentual total de perdas reais.

Já no período da madrugada, dada a baixa demanda e o não desligamento dos capacitores, pode-se observar um aumento das perdas reais de 4,3kW e das perdas reativas de 15,2MVar. O percentual total de perdas reais sofreu um acréscimo de 0,04% pela realocação dos capacitores. Essas perdas no período da madrugada poderiam ser evitadas pela utilização de capacitores automáticos ou semi-automáticos, capazes de se desligarem nos períodos em que se tornam desnecessários ou maléficos para o sistema, como nosso caso.

Tabela 26 – Comparativo entre perdas no sistema com BCs realocados e com a configuração original

Período	Perdas nos Cabos [kW]		Perdas nos Transformadores [kW]		Perdas Totais [kW]		Perdas Reativas [kVAr]		Percentual de Perdas Reais[%]	
	Original	Novos BCs	Original	Novos BCs	Original	Novos BCs	Original	Novos BCs	Original	Novos BCs
Madrugada	603.2	605.5	147.7	149.5	750.8	755.1	2475.1	2490.3	8.21	8.25
Noite	565.9	559.4	121.3	121.4	687.2	680.8	1717.1	1712.7	3.62	3.58

De forma geral podemos observar melhoria nos perfis de tensão em, praticamente, todos os ramos alimentadores em ambos períodos de análise. Com relação ao fluxo de potência, observamos que mudanças mais significativas ocorreram no período da madrugada com uma diminuição geral dos reativos circulantes e exportados do sistema. Também no período de máxima demanda, observamos redução nas perdas ativas e reativas, enquanto no período da madrugada, é observado um leve aumento nesses valores. No cenário apresentado, após ser analisada a viabilidade econômica da solução sugerida frente a uma situação futura de aumento de carga, deve-se estudar a utilização de bancos de capacitores automáticos, capazes de serem inibidos nos períodos de menor carga, onde se tornam prejudiciais ao sistema.

8. Conclusão

Os resultados apresentados neste trabalho de conclusão de curso permitem um entendimento mais amplo e profundo dos sistemas de distribuição de energia elétrica com suas peculiaridades. Estudamos os impactos da adição de geradores distribuídos e bancos de capacitores em um sistema com quatro períodos de carga.

Verificamos que os cogeradores e os bancos de capacitores são realmente úteis e eficientes para a manutenção de níveis de tensão considerados adequados. Sua inibição provocou quedas nos valores de tensão, levando-os a valores precários e até mesmo críticos.

Com relação ao fluxo de potência, também podemos afirmar que os geradores distribuídos e os bancos de capacitores são grandes colaboradores para a manutenção de valores de fator de potência e redução das perdas de potência no sistema.

Foi observado que o período de carga que mais desperta preocupação é o período de maior carga, o noturno. Contudo, precisamos atentar ao fato de que melhorias realizadas para o período de maior demanda podem se refletir como fatores prejudiciais nos períodos de menor demanda. Além disso, quando falamos sobre correntes de curto-circuito, constatamos que a preocupação se concentra nos períodos de menor carga e que a presença de cogeradores provoca aumento significativo nas potências de falta.

Quando da realocação de bancos de capacitores, constatamos que simples mudanças podem provocar alterações em outros pontos e que um super dimensionamento pode ser igualmente prejudicial ao sistema.

Todas as análises foram realizadas através do *software OpenDSS*, que se mostrou simples e muito eficiente para os objetivos propostos.

9. Referências Bibliográficas

- [1] KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C. De B., ROBBA, N. J. **“Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”**.
- [2] PAULA, C. P. **“Geração Distribuída e Cogeração no Setor Elétrico: Avaliação Sistêmica de um Plano de Inserção Incentivada”**. Tese (doutorado em energia – Programa Interunidades de Pós-Graduação EP, FEA, IEE, IF) – Universidade de São Paulo, 2004.
- [3] MIU, K. N., CHIANG, H. D. **“Existence, Uniqueness, and Monotonic Properties of the Feasible Power Flow Solution For Radial Three-Phase Distribution Networks”**. IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 47, No. 10, Outubro 2000.
- [4] CHEN, T. H., CHEN, M. S., INOUE, T., KOTAS, P., CHEBLI, E. A. **“Three-phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis”**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, Outubro 1991.
- [5] BOMPARD, E., CARPANETO, E., CHICCO, G., NAPOLI, R., PIGLIONE, F. **“Computations and Uses of the Energy Flows For the Distribution System Analysis Over Time Intervals”**. IEEE 10th Porto Power Tech Conference, Setembro 2001.
- [6] MCDERMOTT, T. E. **“An Open Source Distribution System Simulator”**. IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, 2006.
- [7] CHENG, C. S., SHIRMOHAMMADI, D. **“A Three-phase Power Flow Method for Real-time Distribution System Analysis”**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, Maio 1995.
- [8] BEE, R. T. **“Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos”**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Março, 2007.
- [9] PEREIRA, B. R., COSSI, M. A., MANTOVANI, J. R. S. **“Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo”**. Grupo de Pesquisa em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista – Unesp.
- [10] SUBRAHMANYAM, J. B. V. **“Optimal Capacitor Placement in Unbalanced Radial Distribution Networks”**. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 6, No. 1, pp 106-105, 2009.
- [11] DUGAN, R. C. **“Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)”**. Electric Power Research Institute, Revision 7, Dezembro 2009.
- [12] DUGAN, R. C. **“OpenDSS Level 2 Training”**. Electric Power Research Institute, Abril 2009.
- [13] **“Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica”**. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, revisado em 01/01/2010.

APÊNDICE A – Código Fonte Completo (*OpenDSS*)

Clear

New object=Circuit.eleto_alm !Nome dado ao circuito ativo

// Método de Solução e parâmetros de convergência

set trapezoidal=true

set algorithm=Newton

set tolerance=0.00001

set maxiterations=100000

// Criando o barramento infinito - representado por uma fonte

Edit Vsource.source basekv=88 pu=1.00 MVAsc1=237.72 MVAsc3=482.25 bus1=1000

Set voltagebases="0.48 13.8 88" !Tensões base encontradas no circuito

// Transformadores da subestação

New Transformer.TR3 Buses=[1000, 1300] Conns=[Delta Wye] kVs= [88 13.8]

~kVAs=[15000 20000] XHL=14.03

New Transformer.TR2 Buses=[1000, 1200] Conns=[Delta Wye] kVs= [88 13.8]

~kVAs=[15000 20000] XHL=14.84

// Geradores Agrupados (Bandeirantes) - Grupos 1 e 2

New Generator.G1 bus1=2300a kW=10600 kV=0.48 PF=-0.85 conn=delta model=3 phases=3

~enable=y status=fixed pvfactor=1

New Generator.G2 bus1=2400a kW=10600 kV=0.48 PF=-0.85 conn=delta model=3 phases=3

~enable=y status=fixed pvfactor=1

//Trafos para modelagem

New Transformer.G1 Buses=[2300a, 2300] Conns=[delta wye] kVs=[0.48 0.48]

~kVAs=[15000 15000] XHL=0.97

New Transformer.G2 Buses=[2400a, 2400] Conns=[delta wye] kVs=[0.48 0.48]

~kVAs=[15000 15000] XHL=0.97

// Transformadores - Grupos 1 e 2

New Transformer.TG1 Buses=[2100, 2300] Conns=[Wye Delta] kVs= [13.8 0.48]

~kVAs=[15000 15000] XHL=5.75

New Transformer.TG2 Buses=[2200, 2400] Conns=[Wye Delta] kVs= [13.8 0.48]

~kVAs=[15000 15000] XHL=5.75

// Definição dos parâmetros dos alimentadores

New Linecode.336.4 R1=0.222 X1=0.402 R0=0.396 X0=1.87 Units=km normamps=322

New Linecode.3/0 R1=0.443 X1=0.428 R0=0.616 X0=1.89 Units=km normamps=204

New Linecode.1/0 R1=0.705 X1=0.450 R0=0.879 X0=1.92 Units=km normamps=151

// Definição física das linhas e cabos que interligam as cargas separadas por alimentador

// GPR_01

New Line.LINE6 Bus1=1300 Bus2=1061 Linecode=3/0 Length=1.22 Units=km

New Line.LINE14a Bus1=1061 Bus2=106114a Linecode=3/0 Length=1.88 Units=km

New Line.LINE14b Bus1=106114a Bus2=1062 Linecode=336.4 Length=0.18 Units=km

New Line.LINE22a Bus1=1062 Bus2=106222a Linecode=336.4 Length=0.78 Units=km

New Line.LINE22b Bus1=106222a Bus2=2200 Linecode=336.4 Length=0.68 Units=km

// GPR_02

New Line.LINE28b Bus1=103228a Bus2=2200 Linecode=336.4 Length=0.16 Units=km

New Line.LINE28a Bus1=1032 Bus2=103228a Linecode=336.4 Length=2.80 Units=km

New Line.LINE21c Bus1=193121b Bus2=1032 Linecode=3/0 Length=0.44 Units=km

New Line.LINE21b Bus1=193121a Bus2=193121b Linecode=3/0 Length=0.12 Units=km

New Line.LINE13b Bus1=193113a Bus2=1931 Linecode=3/0 Length=0.24 Units=km

New Line.LINE21a Bus1=1931 Bus2=193121a Linecode=3/0 Length=0.12 Units=km

New Line.LINE13a Bus1=1031 Bus2=193113a Linecode=3/0 Length=1.54 Units=km

New Line.LINE5 Bus1=1300 Bus2=1031 Linecode=3/0 Length=1.26 Units=km

// GPR_03

New Line.LINE31b Bus1=107331a Bus2=2100 Linecode=336.4 Length=2.06 Units=km

New Line.LINE31a Bus1=1073 Bus2=107331a Linecode=336.4 Length=2.06 Units=km

New Line.LINE29b Bus1=107229a Bus2=1073 Linecode=336.4 Length=1.72 Units=km
 New Line.LINE29a Bus1=1072 Bus2=107229a Linecode=336.4 Length=0.32 Units=km
 New Line.LINE23 Bus1=1071 Bus2=1072 Linecode=3/0 Length=0.87 Units=km
 New Line.LINE15 Bus1=1971 Bus2=1071 Linecode=3/0 Length=0.47 Units=km
 New Line.LINE7b Bus1=12007a Bus2=1971 Linecode=3/0 Length=0.68 Units=km
 New Line.LINE7a Bus1=1200 Bus2=12007a Linecode=3/0 Length=0.40 Units=km

// GPR_04

New Line.LINE16b Bus1=108116a Bus2=2100 Linecode=3/0 Length=0.62 Units=km
 New Line.LINE16a Bus1=1081 Bus2=108116a Linecode=3/0 Length=0.49 Units=km
 New Line.LINE8b Bus1=12008a Bus2=1081 Linecode=3/0 Length=0.62 Units=km
 New Line.LINE8a Bus1=1200 Bus2=12008a Linecode=3/0 Length=3.25 Units=km

// CPC_01

New Line.LINE3a Bus1=2100 Bus2=21003a Linecode=3/0 Length=0.98 Units=km
 New Line.LINE3b Bus1=21003a Bus2=1051 Linecode=3/0 Length=0.26 Units=km
 New Line.LINE26 Bus1=1051 Bus2=1054 Linecode=1/0 Length=0.80 Units=km
 New Line.LINE11 Bus1=1051 Bus2=1052 Linecode=1/0 Length=0.55 Units=km
 New Line.LINE19 Bus1=1052 Bus2=1053 Linecode=1/0 Length=0.92 Units=km

// EPE_01

New Line.LINE2a Bus1=2100 Bus2=21002a Linecode=336.4 Length=1.18 Units=km
 New Line.LINE2b Bus1=21002a Bus2=1041 Linecode=336.4 Length=1.80 Units=km
 New Line.LINE10a Bus1=1041 Bus2=104110a Linecode=336.4 Length=0.72 Units=km
 New Line.LINE10b Bus1=104110a Bus2=1941 Linecode=336.4 Length=1.14 Units=km
 New Line.LINE18 Bus1=1941 Bus2=1042 Linecode=3/0 Length=2.06 Units=km
 New Line.LINE25 Bus1=1042 Bus2=1043 Linecode=1/0 Length=1.75 Units=km

// CPC_02

New Line.LINE1 Bus1=2200 Bus2=1021 Linecode=3/0 Length=0.24 Units=km
 New Line.LINE9a Bus1=1021 Bus2=10219a Linecode=3/0 Length=1.30 Units=km
 New Line.LINE9b Bus1=10219a Bus2=1921 Linecode=3/0 Length=0.84 Units=km
 New Line.LINE17 Bus1=1921 Bus2=1022 Linecode=3/0 Length=0.36 Units=km
 New Line.LINE24 Bus1=1022 Bus2=1023 Linecode=1/0 Length=3.00 Units=km
 New Line.LINE30 Bus1=1022 Bus2=1922 Linecode=3/0 Length=0.46 Units=km
 New Line.LINE32 Bus1=1922 Bus2=1024 Linecode=1/0 Length=1.86 Units=km

```
// EPE_02
New Line.LINE4a Bus1=2200 Bus2=22004a Linecode=336.4 Length=1.10 Units=km
New Line.LINE4b Bus1=22004a Bus2=1091 Linecode=336.4 Length=0.76 Units=km
New Line.LINE12 Bus1=1091 Bus2=1991 Linecode=3/0 Length=0.36 Units=km
New Line.LINE20 Bus1=1991 Bus2=1092 Linecode=3/0 Length=1.25 Units=km
New Line.LINE27a Bus1=1092 Bus2=109227a Linecode=3/0 Length=3.61 Units=km
New Line.LINE27b Bus1=109227a Bus2=1093 Linecode=1/0 Length=3.61 Units=km
```

```
//CARGAS (cargas não ativas são deixadas como comentário)
```

```
//carga - manha
```

```
//New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=20 kvar=10
//New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=430 kvar=140
//New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=0 kvar=0
//New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=100 kvar=30
//New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=140 kvar=50
//New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=500 kvar=160
//New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=60 kvar=20
//New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=550 kvar=180
//New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=180 kvar=60
//New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=1090 kvar=360
//New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=590 kvar=190
//New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=1390 kvar=460
//New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=320 kvar=100
//New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=1580 kvar=520
//New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=1020 kvar=340
//New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=470 kvar=160
//New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=270 kvar=90
//New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=50 kvar=20
//New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=640 kvar=210
//New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=1610 kvar=530
//New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=1710 kvar=560
//New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=260 kvar=80
```

```
//carga - tarde
```

```

//New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=20 kvar=10
//New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=380 kvar=130
//New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=0 kvar=0
//New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=90 kvar=30
//New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=130 kvar=40
//New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=450 kvar=150
//New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=60 kvar=20
//New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=490 kvar=160
//New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=160 kvar=50
//New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=970 kvar=320
//New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=520 kvar=170
//New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=1230 kvar=400
//New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=300 kvar=100
//New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=1430 kvar=470
//New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=940 kvar=310
//New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=430 kvar=140
//New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=250 kvar=80
//New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=50 kvar=20
//New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=580 kvar=190
//New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=1480 kvar=490
//New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=1530 kvar=500
//New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=240 kvar=80

```

//carga - noite

```

//New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=30 kvar=10
//New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=620 kvar=200
//New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=200 kvar=100
//New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=130 kvar=40
//New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=210 kvar=70
//New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=790 kvar=260
//New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=90 kvar=30
//New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=910 kvar=300
//New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=260 kvar=90
//New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=1590 kvar=520
//New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=820 kvar=270
//New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=1990 kvar=650

```

```
//New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=340 kvar=110
//New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=2210 kvar=730
//New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=1680 kvar=550
//New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=640 kvar=210
//New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=450 kvar=150
//New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=90 kvar=30
//New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=1030 kvar=340
//New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=2110 kvar=690
//New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=2480 kvar=810
//New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=330 kvar=110
```

```
//carga - madrugada
```

```
New Load.LOAD1 Bus1=1031 kV=13.8 kW=20 kvar=10
New Load.LOAD2 Bus1=1032 kV=13.8 kW=300 kvar=100
New Load.LOAD3 Bus1=1061 kV=13.8 kW=10 kvar=0
New Load.LOAD4 Bus1=1062 kV=13.8 kW=60 kvar=20
New Load.LOAD5 Bus1=1071 kV=13.8 kW=110 kvar=40
New Load.LOAD6 Bus1=1072 kV=13.8 kW=370 kvar=120
New Load.LOAD7 Bus1=1073 kV=13.8 kW=50 kvar=20
New Load.LOAD8 Bus1=1081 kV=13.8 kW=440 kvar=150
New Load.LOAD9 Bus1=1021 kV=13.8 kW=140 kvar=50
New Load.LOAD10 Bus1=1022 kV=13.8 kW=780 kvar=250
New Load.LOAD11 Bus1=1023 kV=13.8 kW=400 kvar=130
New Load.LOAD12 Bus1=1024 kV=13.8 kW=980 kvar=320
New Load.LOAD13 Bus1=1041 kV=13.8 kW=170 kvar=60
New Load.LOAD14 Bus1=1042 kV=13.8 kW=1090 kvar=360
New Load.LOAD15 Bus1=1043 kV=13.8 kW=750 kvar=250
New Load.LOAD16 Bus1=1051 kV=13.8 kW=330 kvar=110
New Load.LOAD17 Bus1=1052 kV=13.8 kW=200 kvar=70
New Load.LOAD18 Bus1=1053 kV=13.8 kW=40 kvar=10
New Load.LOAD19 Bus1=1054 kV=13.8 kW=470 kvar=150
New Load.LOAD20 Bus1=1091 kV=13.8 kW=1030 kvar=340
New Load.LOAD21 Bus1=1092 kV=13.8 kW=1230 kvar=400
New Load.LOAD22 Bus1=1093 kV=13.8 kW=180 kvar=60
```

```
// Bancos de capacitores originais
```

```
//new capacitor.C1 bus1=1931 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
//new capacitor.C2 bus1=1971 phases=3 kvar=600 kv=13.8
//new capacitor.C3 bus1=1921 phases=3 kvar=600 kv=13.8
//new capacitor.C4 bus1=1922 phases=3 kvar=600 kv=13.8
//new capacitor.C5 bus1=1941 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
//new capacitor.C6 bus1=1042 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
//new capacitor.C7 bus1=1051 phases=3 kvar=600 kv=13.8
//new capacitor.C8 bus1=1991 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
//new capacitor.C9 bus1=1092 phases=3 kvar=600 kv=13.8
```

```
//Novos Bancos de Capacitores
```

```
new capacitor.C1 bus1=1032 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C2 bus1=1072 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C3 bus1=1921 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C4 bus1=1922 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C5 bus1=1941 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C6 bus1=1042 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C7 bus1=1052 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C8 bus1=1991 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C9 bus1=1092 phases=3 kvar=1200 kv=13.8
new capacitor.C10 bus1=1043 phases=3 kvar=600 kv=13.8
new capacitor.C11 bus1=1023 phases=3 kvar=600 kv=13.8
```

```
make bus list
```

```
calc voltage bases
```

```
solve
```

```
BusCoords coordenadas.csv !Atribuição das coordenadas das barras
```

```
show powers
```

```
show voltages
```

```
show losses
```

```
//Modo de faltas !Deve ser executado após solução no modo padrão
```

```
set mode = faultstudy  
calc voltage bases  
solve  
show faults  
export faults
```