



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO**

MATHEUS LOPES DE ANDRADE
RA: 22204109

**PARALELISMO ENTRE FONTES E TRANSFERÊNCIA DE CARGAS
EM RAMPA**

BRASÍLIA
2023



MATHEUS LOPES DE ANDRADE

PARALELISMO ENTRE FONTES E TRANSFERÊNCIA DE CARGAS EM RAMPA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado
como um dos requisitos para a conclusão do curso de
Engenharia Elétrica do UniCEUB– Centro Universitário
de Brasília

Orientador: MsC Luciano Henrique Duque

BRASÍLIA
2023



MATHEUS LOPES DE ANDRADE

PARALELISMO ENTRE FONTES E TRANSFERÊNCIA DE CARGAS EM RAMPA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília

Orientador: MsC Luciano Henrique Duque

Brasília, 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. MsC Luciano Henrique Duque
Orientador

Nome e titulação
Examinador (a): Hugo Molina
Especialista

Nome e titulação
Examinador (a): Nathália Salomão
Especialista

Matheus Lopes de Andrade¹, Luciano Henrique Duque²

Resumo: Os geradores são máquinas elétricas, amplamente difundidas atualmente, capazes de transformar potência mecânica em potência elétrica de corrente alternada. Este artigo visa estudar a operação em paralelo de geradores síncronos quando a concessionária é desabilitada, bem como analisar o funcionamento da transferência em rampa quando a concessionária é desabilitada e reabilitada. Para isso foi utilizado o sistema de geradores que trabalha sobre regime de redundância e demanda de carga, e possui um sistema automatizado que permite o acionamento das máquinas síncronas via controladores. O estudo foi baseado em um sistema equilibrado, ou seja, não se levou em consideração as distorções ou perdas de tensão e de corrente no sistema elétrico provocados ordinariamente por harmônicos.

Palavras-chave: Máquinas Síncronas, Paralelismo, Sincronismo, Geradores.

Abstract: Generators are electrical machines, widely used today, capable of transforming mechanical power into alternating current electrical power. This article aims to study the parallel operation of synchronous generators when conduction is disabled, as well as to analyze the ramp transfer operation when conduction is re-enabled. For this, a system of generators was used that work on a redundancy basis and load demand, and has an automated system that allows the activation of synchronous machines via controllers. The study was based on a balanced system, that is, distortions or voltage and current losses in the electrical system, ordinarily caused by harmonics, were not taken into account.

Keywords: Synchronous Machines, Parallelism, Synchronism, Generators.

¹ UniCEUB; Matheus Lopes de Andrade. Orientando.

² UniCEUB, Luciano Henrique Duque. Orientador.

1 INTRODUÇÃO

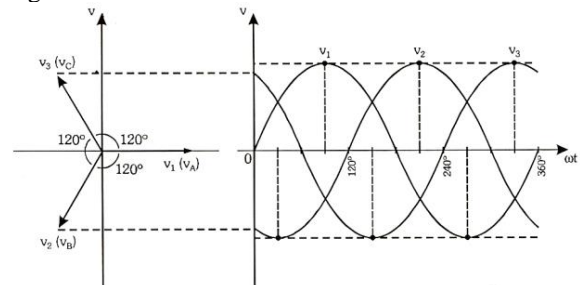
Frequentemente diversas aplicações que utilizam geradores possuem mais de um gerador operando em paralelo para fornecer a potência demandada pelas cargas, sendo amplamente usados em sistemas de geração de energia elétrica de grande porte. Quando vários geradores síncronos são conectados em paralelo, eles podem fornecer energia elétrica para uma rede elétrica comum visto que o acionamento em paralelo proporciona inúmeras vantagens tais como a capacidade de alimentar uma carga maior do que apenas uma máquina isolada. Além disso a confiabilidade do sistema aumenta, posto que se houver falhas ocasionais não há perda total de potência para carga. E por fim possibilita que as máquinas sejam submetidas por eventuais manutenções e além de melhorar a questão da eficiência (Del Toro, 1994).

Para se operar geradores em paralelo primeiro é preciso entender o funcionamento destas máquinas trifásicas. O gerador síncrono é constituído de duas partes: estator e rotor. O rotor possui um campo CC, cujo a corrente elétrica é contínua e por consequência gera um campo magnético contínuo.

Quando o rotor gira o campo magnético produz um fluxo magnético que estará atravessando as espiras, que são bobinas fixas localizadas no estator, produzindo assim um conjunto de tensões senoidais que serão induzidas nas espiras (Chapman 2013).

Em suma, o giro do rotor provoca um fluxo senoidal que corta a seção de área das espiras no estator, posto que é composto de 3 rolamentos separados fisicamente a 120 graus, logo serão 3 tensões defasadas em 120 graus uma das outras conforme figura 1.

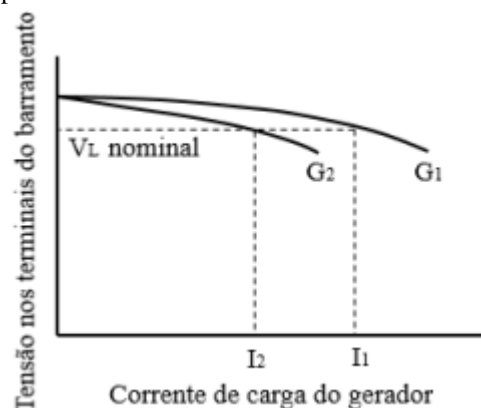
Figura 1: Gráfico das tensões defasadas.



Fonte: Máquinas e Acionamentos Elétricos - Geradores de Corrente Alternada 1 -GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA 1.1 -PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS ALTERNADORES. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc>>.

Os geradores possuem a capacidade de operar em paralelo já que sua tensão decresce com a carga. Mesmo que os geradores apresentem características externas distintas, eles podem ser ligados em paralelo, fornecendo corrente a uma carga externa. A figura 2 apresenta uma divisão genérica de carga entre duas máquinas operando sob uma tensão nominal VL. À medida que a carga sofre alteração, a tensão VL também varia e por consequência cada gerador assume um valor proporcional da carga.

Figura 2: Divisão de carga entre dois geradores ligados em paralelo.



Fonte: Kosow 2005.

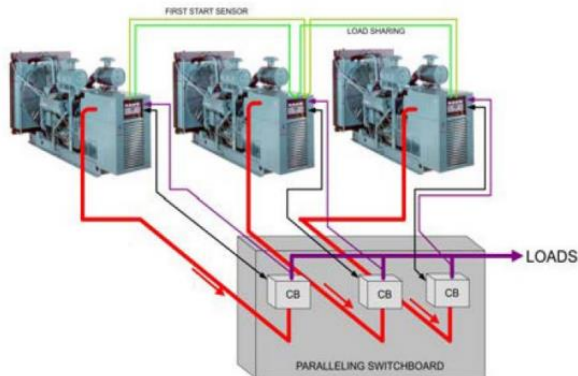
Sendo assim, esse artigo apresenta um estudo descritivo e qualitativo dos procedimentos operacionais de dois grupos de geradores na região de Brasília localizado no Plano piloto. Cada grupamento contém 4 unidades geradoras de mesma potência, que podem ser utilizadas individualmente para suprir a demanda mínima do prédio por um determinado tempo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição do paralelismo

O paralelismo é a operação síncrona de dois ou mais grupos geradores conectados simultaneamente em um barramento comum que alimenta uma carga comum, conforme figura 3.

Figura 3: Geradores em paralelismo



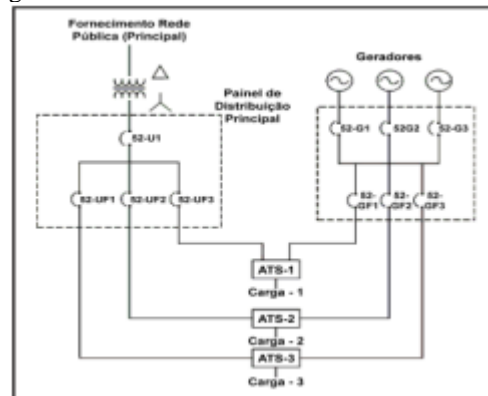
Fonte: Cummins 2011.

Unidades conectadas em paralelo são usadas em dois ou mais grupos geradores como se fossem um grande conjunto. Portanto, a capacidade de um único dispositivo conecta-se diretamente ao conjunto enquanto combina e mantém a frequência e tensão nominais do barramento comum.

Ainda existe a possibilidade de paralelismo entre os geradores e a rede elétrica sendo comumente utilizados para fornecer energia para a rede elétrica em momentos de alta demanda ou quando a capacidade da rede é insuficiente (INTERPOWER GERADORES, 2012). A figura 4 mostra o esquemático de

geradores conectados em paralelo com a rede.

Figura 4: Esquema elétrico de paralelismo entre geradores e a rede.



Fonte: Interpower Geradores 2012.

2.2 Condições

Para ocorrer o paralelismo entre os geradores é preciso que algumas condições sejam respeitadas. Segundo (Chapman 2013) existem 4:

- As tensões eficazes de linha dos dois geradores devem ser iguais.
- Os geradores envolvidos devem ter a mesma sequência de fases.
- Os ângulos de fase das duas fases devem ser iguais.
- A frequência do gerador que está entrando em paralelo deve ser ligeiramente superior a frequência do sistema que já está em operação.

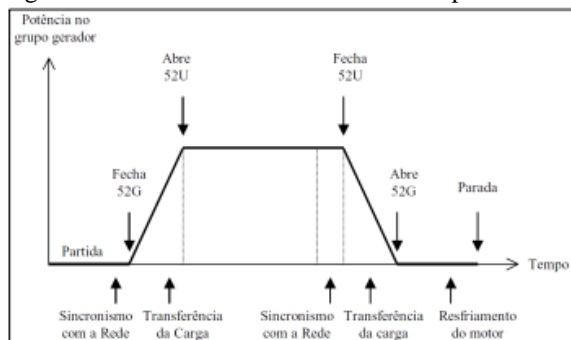
Para que a primeira condição seja verdadeira é necessário que as máquinas estejam faseadas entre si. Caso contrário será gerada uma corrente de circulação entre os geradores que prejudica a vida útil dos equipamentos. A segunda condição é importante posto que se cada máquina possuir uma sequência diferente das outras acarretará um curto-circuito. As frequências dos geradores também devem ser consideradas já que os seus valores precisam estar aproximados para

evitar a produção de grandes transitórios de potência. Em suma, as frequências não podem ser exatamente iguais. A máquina inicializada posteriormente, deve efetuar uma mudança lenta do seu ângulo de fase em relação ao ângulo de fase do sistema em operação.

2.3 Regime de paralelismo momentâneo

Consiste em um período específico onde o gerador opera por apenas um tempo determinado, sendo um ambiente propício para ocorrer a transferência de carga entre o gerador e a rede distribuidora. O procedimento é denominado de transferência em rampa, que consiste em transferência gradual de carga. O processo de rampa envolve aumentar a carga do gerador em pequenos incrementos, enquanto monitora a frequência e a tensão da rede elétrica para garantir que permaneçam dentro dos limites aceitáveis. Tal procedimento também pode ser programado para a retirada da carga, conforme figura 5.

Figura 5: Gráfico de transferência em rampa.



Fonte: Pereira 2009.

3 METODOLOGIA

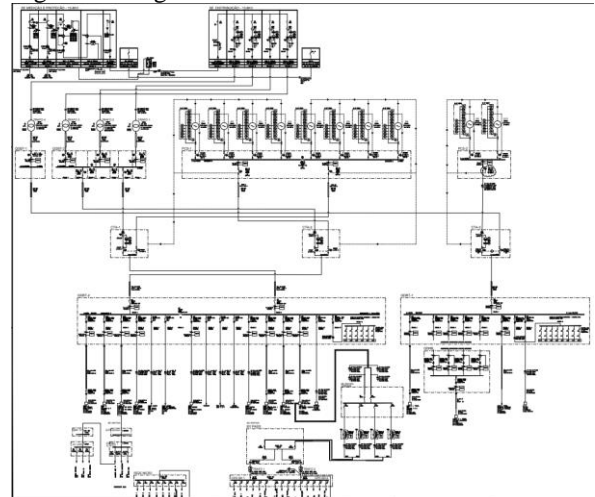
3.1 Diagrama Elétrico

Primeiramente é necessário fazer uma análise do diagrama unifilar elétrico posto que é uma ferramenta de representação de circuitos elétricos e das posições das cargas e dos acionadores. As instalações contam com 8 grupos geradores de 750 kVa de potência, subdivididos em 2 grupamentos (G1 a G4 e

G5 a G8) conforme figura 6, que foi previamente definido, durante o planejamento da instalação.

Cada grupamento possui 4 grupos geradores (GMGs) que são responsáveis por fornecer energia para as alas leste e oeste do prédio. O intuito é funcionar por sistema de energia de emergência que consiste em interligar um conjunto de GMGs a uma chave de transferência automática (CTA), nesse caso o controle de transferência utilizado é o quadro de transferência automática (QTA), que transfere a carga da rede da concessionária para o gerador e vice-versa. Quando há falha na rede, a QTA ordena a partida de um GMG e espera o procedimento de sincronismo entre as máquinas síncronas se encerre para então transferir carga. Os grupamentos operam em regime de redundância, portanto mesmo que apenas um GMG consiga suprir a carga, no mínimo 2 serão necessários acionados para assumirem a carga. O diagrama elétrico das instalações está disposto na figura 6.

Figura 6: Diagrama Elétrico

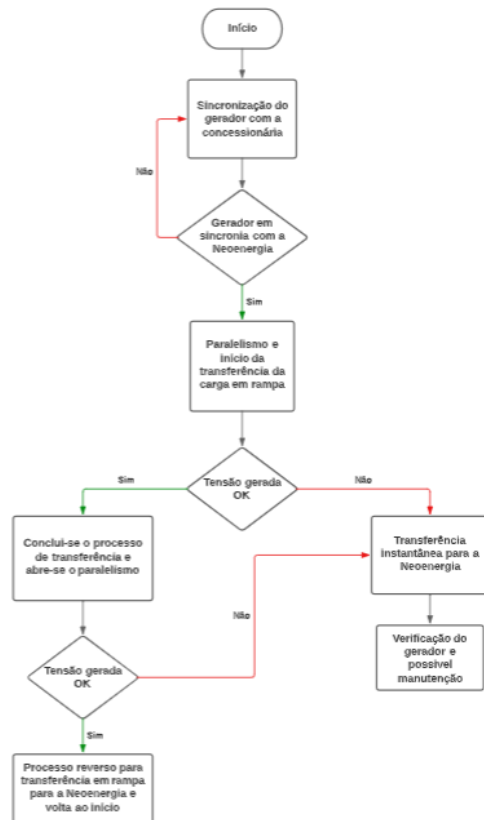


Fonte: Empresa Nova

3.2 Fluxograma

Foi desenvolvido um fluxograma que organiza as etapas necessárias para um gerador operar em paralelo com a concessionária. O algoritmo está disposto na figura 7.

Figura 7: Fluxograma.



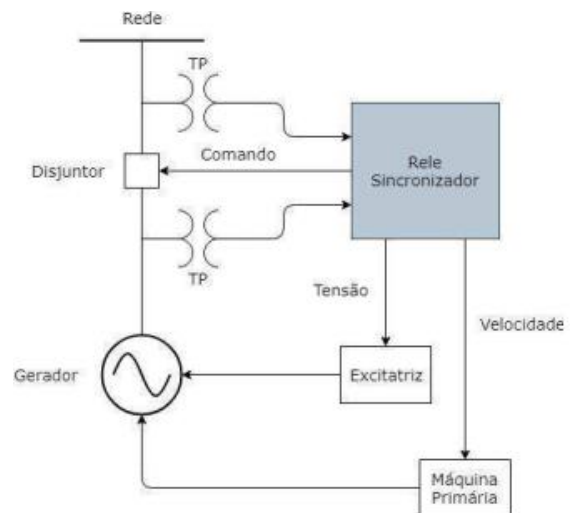
Fonte: Autor.

Quando o quadro de transferência automático (QTA) detecta uma anomalia na alimentação da concessionária, envia um comando para os controladores DSE8660 acionarem os grupos geradores e conectá-los ao barramento comum do painel de transferência. Em seguida, o QTA desconecta a concessionária das cargas e conecta a alimentação dos geradores. Quando a alimentação da concessionária se normaliza, o QTA desconecta a alimentação dos geradores da carga e retorna com a alimentação da concessionária. Em seguida, desliga os grupos geradores. Se, num caso de emergência, o fornecimento da concessionária falhar, os nobreaks de emergência estão dimensionados para aguentar a carga total das instalações por volta de 15 minutos.

3.3 Sincronismo automático

Atualmente, utiliza-se os dispositivos com métodos automáticos de sincronismo tendo em vista que são mais simples para o operador e conferem mais precisão e confiabilidade do que dispositivos manuais. A figura 8 exibe um diagrama do modelo de sincronismo automático.

Figura 8: Modelo de sincronismo automático



Fonte: Adaptado de DA, M.; NEVES, S. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS DE SINCRONISMO APLICADOS A SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016426.pdf>>.

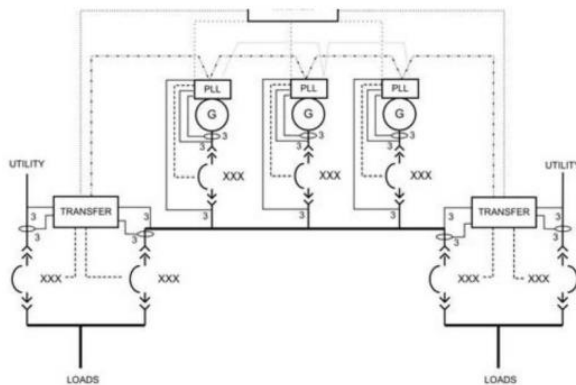
O sincronizador agrupa os dados e informações por meio de um transformador de potencial e compara a frequência, amplitude e ângulo de fase. Em seguida, o dispositivo monitora a excitatriz, que é o componente responsável por controlar a tensão de campo, que influencia diretamente nas variáveis de saída da máquina. E por fim, o disjuntor é fechado para acoplar o gerador à rede de energia.

3.4 Subdivisão em blocos

Para compreender o panorama geral de um sistema de paralelismo é possível ilustrar seus componentes por intermédio de grandes

blocos. A elaboração do diagrama de blocos desta aplicação contempla os blocos de grupos de geradores com controladores para operação em paralelo, controle geral que supervisiona o sistema, além das seções de alimentação como disjuntores e barramentos.

Figura 9: Diagrama de blocos de um sistema de paralelismo



Fonte: Cummins 2011.

Cada grupo gerador possui um controlador individual que é responsável por realizar a comunicação entre o gerador e o resto da instalação. O sistema de controle está encarregado de monitorar e preservar cada máquina síncrona, bem como garantir que a interação entre os grupos geradores seja segura e eficaz. A interface do controlador é evidenciada na figura 10.

Figura 10: Modulo de controle



Fonte: Deep Sea 2011.

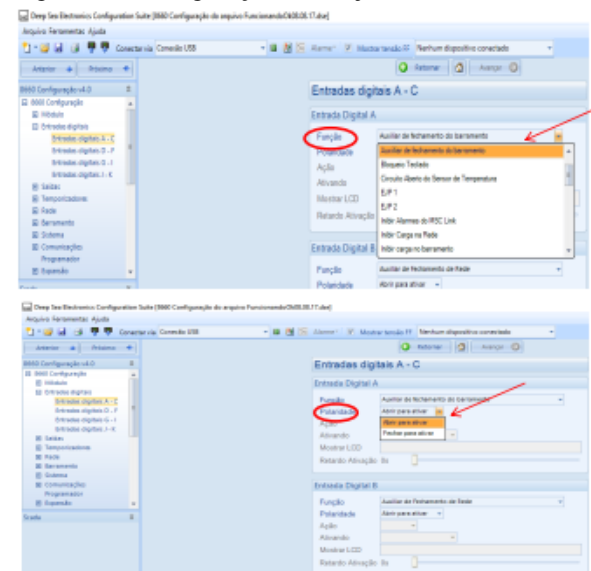
4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Parametrizações

Antes de se realizar um teste de partida com carga, foi necessário conhecer os valores parametrizados no controlador de modo que seja realizado a divisão simultânea de carga e o revezamento das máquinas síncronas em escala de horas. Para isso realizou-se o cadastro no site da empresa Deep Sea Electronics, que disponibilizou acesso ao software de configuração dos controladores modelo DSE 8660.

Primeiro foi preciso verificar as entradas digitais dos disjuntores quanto a suas posições no sistema de transferência. O disjuntor aberto atende pelo estado 0 e o disjuntor fechado pelo estado 1. Assim que o disjuntor executa a manobra de abrir ou fechar o barramento, o controlador recebe um sinal e o assimila como estado aberto se o sinal for nível 0, ou estado fechado se o sinal for nível 1. A figura 11 exibe esta configuração.

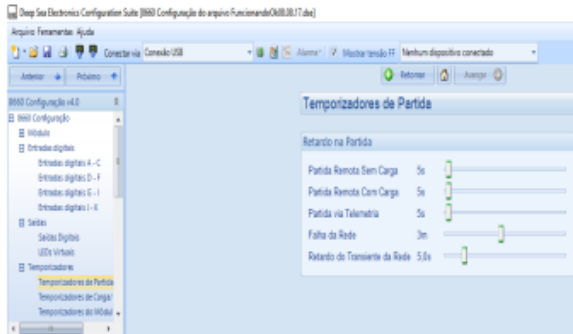
Figura 11: Configuração dos disjuntores.



Fonte: Software Configuration Suite Deep Sea.

Em seguida foi analisado as configurações do tempo de partida dos GMG conforme figura 12.

Figura 12: Configuração do tempo de partida.



Fonte: Software Configuration Suite Deep Sea.

Observou-se que os parâmetros para partida remota com ou sem carga e retardo do transiente da rede foram fixados em 5 segundos, além disso é válido salientar o ajuste de 3 minutos para falhas de curta duração a fim de se evitar partidas e manobras desnecessárias.

E por último foi averiguado os parâmetros do temporizador de parada do GMG. Os valores mais relevantes são o tempo de 5 segundos para retardo de fechamento do barramento e 15 segundos para tempo de paralelismo, conforme figura 13. O valor de 15 segundos foi escolhido porque segundo a norma de distribuição unificada de 2018, é o tempo máximo de permanência do paralelismo para transferência de carga entre a rede e o gerador e vice-versa.

Figura 13: Configuração do tempo de parada.



Fonte: Software Configuration Suite Deep Sea.

O tempo de retardo para retorno da rede foi configurado para 3 minutos posto que pode haver algumas oscilações antes que a tensão na rede seja estabilizada e por consequência os geradores sejam desligados antes da estabilização.

O processo de parametrização deve ser realizado corretamente para garantir a sequência adequada das manobras de transferência de energia.

4.2 Diagrama Vetorial

Outra etapa essencial na operação é o ajuste do ângulo de fase máximo para se ocorrer o sincronismo entre as duas fontes de corrente alternada. A figura a seguir exhibe um diagrama vetorial simplificado sob uma perspectiva de um gerador para o outro.

Figura 14: Diagrama vetorial de um sistema de paralelismo ideal.

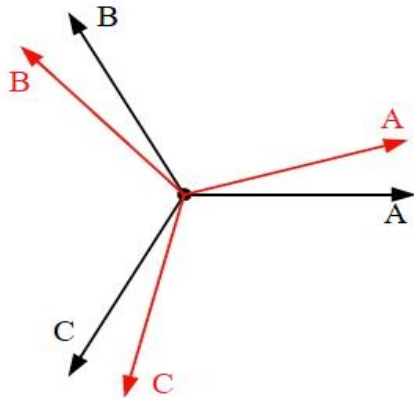


Fonte: Penz 2018.

Assumindo que a rede elétrica produz a tensão E2 e o gerador produz a tensão E1, conclui-se que as forças eletromotrizes são opostas e consequentemente produzem uma resultante nula. Sendo assim, não há corrente de circulação no sistema.

Tendo em vista que o sistema também comporta a rede elétrica foi elaborado um diagrama vetorial com uma pequena defasagem para ilustrar que os valores de ângulos de fase foram ajustados entre 5° e 8°. Caso o ângulo fosse maior que o estipulado, ocorreria o desligamento do disjuntor de acoplamento de rede. Ainda foi possível perceber ambas que possuem a mesma amplitude conforme a figura 15.

Figura 15: Diagrama vetorial entre o gerador e a concessionária.



Fonte: O autor.

5 RESULTADOS

5.1 Cenários de operação

A seguir apresentou-se os três cenários quanto a carga total do sistema: a concessionária operando sozinha, o compartilhamento de carga através do paralelismo entre os geradores e a rede elétrica e por último os geradores assumindo toda a carga.

No primeiro cenário a concessionária assumiu toda a carga do sistema conforme a figura 16.

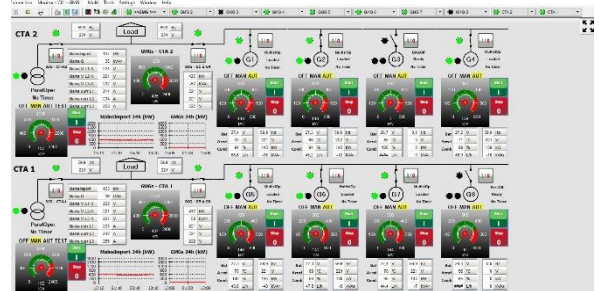
Figura 16: Concessionária atuando sozinha.



Fonte: Software Deep Sea.

No segundo cenário ocorreu o paralelismo entre geradores e rede elétrica e foi possível observar a transferência em rampa da carga do sistema. A figura 17 evidencia que os geradores assumiram mais de 75% da carga em ambas

Figura 17: Paralelismo entre os geradores e a rede elétrica.



Fonte: Software Deep Sea.

No terceiro cenário observou-se os geradores atuando sozinhos conforme a figura 18. Percebe-se ainda que essas máquinas síncronas operaram por regime de redundância posto que apenas um gerador era suficiente para suprir a demanda de carga, entretanto foram acionados 3 geradores que dividiram a carga de modo equivalente.

Figura 18: Geradores atuando sozinhos.



Fonte: Software Deep Sea.

6 CONCLUSÃO

Em suma, o artigo cumpriu o objetivo, posto que visava compreender o procedimento necessário para se realizar o paralelismo entre duas ou mais fontes de corrente alternada. Os resultados validaram a preferência de se utilizar o modelo automatizado, através dos controladores, em detrimento do método de sincronismo manual, ainda muito utilizado hoje em dia. Além disso, o gerenciamento de carga do sistema se mostrou totalmente eficiente com o regime de redundância e o processo de transferência em rampa sendo realizados de maneira desejada. Algumas dificuldades

encontradas no decorrer da elaboração do artigo como a limitação do software da Deep Sea que não permite o acompanhamento em tempo real do sincronismo entre as fontes por intermédio de interfaces gráficas, o que seria de grande ajuda para fins acadêmicos. Entretanto com alguns ajustes foi possível transpor essa barreira e o trabalho atendeu as expectativas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e a família e amigos pelo apoio incondicional durante esses anos de graduação.

7 REFERÊNCIAS

Máquinas e Acionamentos Elétricos - Geradores de Corrente Alternada 1 - GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA 1.1 -PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS ALTERNADORES. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc>>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed. [s.l.] AMGH Editora, 2013.

VINCENT DEL TORO. Fundamentos de máquinas elétricas. Rio De Janeiro (Rj): Prentice-Hall Do Brasil, 1994.

KOSOW, I. I. Máquinas elétricas e transformadores. 15 ed. São Paulo: Globo, 2005.

PEREIRA, José C. Princípio de Funcionamento, Instalação, Operação e Manutenção de Grupos Diesel Geradores. 2009

INTERPOWER GERADORES. Grupos Geradores Unitários e Grupos Geradores Conectados em Paralelo. 2012. Disponível em: <<http://interpower-geradores.blogspot.com>>. Acesso em: 21 mai. 2023.

DA, M.; NEVES, S. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS DE SINCRONISMO APLICADOS A SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016426.pdf>>. Acesso em: 9 mai. 2023.

Engenharia de Aplicações. Manual de aplicações para Grupos Geradores arrefecidos a água - PDF Download grátis. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/876185-Engenharia-de-aplicacoes-manual-de-aplicacoes-para-grupos-geradores-arrefecidos-a-agua.html>>. Acesso em: 5 abr. 2023.

Penz, R.S. Apostila de máquinas elétricas 2018