

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ROBSON BENITES CORRÊA**

**A EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA NO ENSINO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA NO CURSO DE ENGENHARIA**

**ALEGRETE**

**2015**

**ROBSON BENITE CORÊA**

**A EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA NO ENSINO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA NO CURSO DE ENGENHARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Wagner Kaehler Maciel

**ALEGRETE**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C824e Corrêa, Robson B.

A EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA NO ENSINO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA NO CURSO DE ENGENHARIA / Robson B. Corrêa.

91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.

"Orientação: José Wagner Kaehler Maciel".

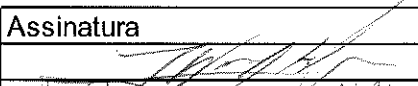
1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Simulações. 3.  
Aprendizagem na graduação. 4. Engenharia Elétrica. 5.  
Atividades de ensino. I. Título.

Autoria: Robson Benites Corrêa

Título: A EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA NO ENSINO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA NO CURSO DE ENGENHARIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Instituição	Assinatura
1	José Wagner Maciel Kaehler	Prof. Dr.	unipampa	
2	Ana Paula Carboni de Mello	Prof. Me.	unipampa	Ana Paula Carboni de Mello
3	Guilherme Sebastião da Silva	Prof. Me.	unipampa	Guilherme S. da Silva

Data da aprovação: 16 de Janeiro de 2015.

Dedico este Trabalho ao meu avô José Corrêa (Vô Coruja) por ter acompanhado cada etapa da minha vida, por se fazer presente como um pai nos momentos de alegria e tristeza, por sempre ter estendido sua mão independente da situação. E também a minha falecida avó Adelina Souza Corrêa (Vó Rosa) por todo seu esforço dedicado a mim quando aqui presente.

## AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus e Nossa Senhora Aparecida que permitiram que tudo isso acontecesse. Por terem me dado saúde e força para superar as dificuldades ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário.

Ao Curso de Engenharia Elétrica da UNIPAMPA, e às pessoas com quem convivi nesses espaços ao longo desses anos.

Ao professor José Wagner pela orientação, apoio e confiança na execução deste projeto.

Aos professores desta instituição pela sabedoria e ensinamentos a mim dedicados.

Aos amigos e colegas, pelos incentivos e apoio constantes. Pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Pelas pausas entre um parágrafo e outro, que melhoram a produção, e tudo o que tenho feito na vida. A experiência de uma produção compartilhada na comunhão com amigos foram a melhor experiência da minha formação acadêmica e aprendizado de vida.

A todos aqueles que de alguma forma, direta ou indireta, estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida e esta formação valer cada vez mais a pena.

A toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

A minha amiga e companheira Daniella pelo apoio, carinho e confiança demonstrados em todos os momentos. Por ter me dado uma segunda família. E pela vontade e felicidade de viver que tu me trás a todo amanhecer.

Ao meu pai José Carlos por ter me ensinado a responsabilidade, por ter me exigido/cobrado resultado e dedicação, por me auxiliar nesta caminhada me apoiando na medida do possível e me fornecendo a assistência necessária para que eu pudesse realizar esse sonho.

A ti minha mãe Eunice, pela qual eu luto pra ser melhor a cada dia. De maneira digna, honesta. Foi assim que tu fizeste/faz, sempre. Foi assim que me ensinaste. Obrigado por tudo minha mãe.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

## RESUMO

Este documento apresenta o Trabalho de Conclusão de Curso e tem por objetivo tratar a respeito do processo de aprendizagem no curso de Engenharia Elétrica. Neste contexto apresenta os métodos de ensino adotados na atualidade e as dificuldades encontradas ao fim deste processo. A área do curso abordado é a de Sistema Elétrico de Potência. Os profissionais responsáveis pelo desempenho do sistema em questão devem atuar de maneira correta, e a sua formação atual é falha no ponto em que os mesmos possuem um déficit em aprendizagem prática. Devido a isso são descritas atividades práticas que envolvem diversas disciplinas buscando proporcionar um acréscimo na aprendizagem ao fim do curso. Por se tratar de assuntos complexos, este traz um embasamento teórico sobre Sistemas Elétricos e seus componentes, levando em consideração as suas características. As atividades buscam referência em casos reais, trabalhando em sistemas equivalentes. Esta busca se torna importante por proporcionar realidade às práticas realizadas no processo de aprendizagem. Os dados obtidos nas simulações são expostos graficamente e em formas de tabelas também. São analisados no instante de apresentação do estado de funcionamento do sistema em questão. A funcionalidade das atividades executadas possui fins didáticos complementares.

Palavras-chave: Aprendizagem; Atividades práticas; Profissionais; Simulações; Sistema Elétrico de Potência.



## **ABSTRACT**

This document presents the Work Completion of course and aims to address about the learning process in the course of Electrical Engineering. In this context presents the teaching methods adopted today and the difficulties encountered at the end of this process. The area covered is the course of Electric Power System. The professionals responsible for the performance of the system in question must act properly, and your current training is lacking at the point where they have a deficit in practice learning. Because of this are described practical activities involving various disciplines seeking to provide an increase in learning the stroke end. Because it is complex subjects, this brings a theoretical foundation in Electrical Systems and components, taking into account its features. The activities seek reference to real cases, working in equivalent systems. This search becomes important for providing reality the practices of the learning process. The data obtained in the simulations are exposed graphically and in forms of tables too. Are analyzed at the time of submission of the operational status of the system in question. The functionality of the activities performed has additional teaching purposes.

**Keywords:** Electric Power System; Learning; Practical activities; Professionals; Simulations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema Elétrico .....	18
Figura 2 - Central hidráulica. 1-Barragem, 2-Grades, 3- Tomadas de água, 4- Conductor forçado, 5-Turbina, 6-Alternador, 7-Casa de máquinas, 8-Pórtico-ponte, 9- Sistema de descarga, 10-Transformadores, 11-Sistema de transmissão. ....	20
Figura 3 - Exemplo de turbina em barragem. ....	23
Figura 4 - Funcionamento de usinas térmicas. ....	25
Figura 5 - Funcionamento de usinas nucleares. ....	26
Figura 6 - Turbina eólica. ....	27
Figura 7 - Corpo da turbina eólica. ....	28
Figura 8 - (a) Corte da máquina com armadura no rotor (b) Corte da máquina de quatro polos com armadura no estator. ....	30
Figura 9 - (a) Polos lisos (b) Polos salientes .....	30
Figura 10 - Tensão gerada na armadura fixa para máquina de 2 polos. ....	32
Figura 11 - Tensão gerada na armadura fixa para máquina de 4 polos. ....	32
Figura 12 - Associação de três geradores monofásicos. ....	34
Figura 13 - Defasagem entre tensões geradas. ....	35
Figura 14 - Ligações Trifásicas - (a) Ligação em estrela (b) Ligação em triângulo (delta). ....	35
Figura 15 - Tensão nos terminais da máquina com a variação do fator de potência. ....	36
Figura 16 - Grupo gerador: Motor CC (Máquina primária) e alternador trifásico. ....	38
Figura 17 - Painel de mediação e comando. ....	39
Figura 18 - Ligação dos motores. ....	40
Figura 19 - Ligação do banco de resistores. ....	40
Figura 20 - Sistema de acionamento e cargas. ....	41
Figura 21 - Acionamento em paralelo dos alternadores. ....	45
Figura 22 - Fase A (G1) e Fase A (G2) defasados 180 graus. ....	46
Figura 23 - Lâmpadas acesas pela defasagem entre as fases. ....	47
Figura 24 - Fase A (G1) e Fase A (G2) no momento que os geradores são colocados a operar de forma paralela. ....	48
Figura 25 - Lâmpadas apagadas no sincronoscópio. ....	48
Figura 26 - Fase A (G1) e Fase A (G2) com os geradores operando em paralelo. ....	49
Figura 27 - Circuito de comando de acionamento das cargas. ....	50

Figura 28 - Circuito de alimentação das cargas. ....	50
Figura 29 - Variação do nível de tensão $V_{ab}$ na Atividade 1.....	51
Figura 30 - Variação da corrente de linha na Atividade 1.....	53
Figura 31 - Variação de potência ativa na Atividade 1. ....	54
Figura 32 - Variação da potência reativa na Atividade 1. ....	54
Figura 33 - Variação da potência aparente na Atividade 1.....	55
Figura 34 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_0 - t_1$ .....	56
Figura 35 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_1 - t_2$ .....	56
Figura 36 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_2 - t_3$ .....	57
Figura 37 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_3 - t_4$ .....	57
Figura 38 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_4 - t_5$ .....	58
Figura 39 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_5 - t_6$ .....	58
Figura 40 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_6 - t_7$ .....	59
Figura 41 - Ondas para o sistema operando no intervalo $t_7 -$ .....	59
Figura 42 - Variação da frequência do sistema na Atividade 1. ....	60
Figura 43 - Variação do nível de tensão $V_{ab}$ na Atividade 2.....	61
Figura 44 - Intervalo $t_0 - t_{10}$ na variação de tensão na Atividade 2 – Aproximação na Figura 43. ....	62
Figura 45 - Intervalo $t_{11} - t_{22}$ na variação de tensão na Atividade 2 – Aproximação na Figura 43. ....	64
Figura 46 - Formas de onda no momento de bloqueio do eixo dos motores. ....	66
Figura 47 - Variação do nível de tensão $V_{ab}$ na Atividade 3.....	67
Figura 48 - Variação do nível de tensão $V_{ab}$ na Atividade 4.....	69
Figura 49 - Fase A (grupo gerador) e Fase A (rede) defasados 180 graus.....	71
Figura 50 - Fase A (grupo gerador) e Fase A (rede) no momento que os geradores são colocados a operar de forma paralela. ....	72
Figura 51 - Fase A (grupo gerador) e Fase A (rede) com operação em paralelo.....	72
Figura 52 - Variação do nível de tensão $V_a$ do Gerador 1 na Atividade 5.....	73
Figura 53 - Variação do nível de tensão $V_a$ do Gerador 2 na Atividade 5.....	74
Figura 54 - Variação do nível de tensão $V_a$ da rede na Atividade 5.....	74
Figura 55 - Transformador monofásico 1 kVA.....	75
Figura 56 - Variação da corrente de linha na Atividade 2.....	80
Figura 57 - Variação de potência ativa na Atividade 2. ....	80
Figura 58 - Variação da potência reativa na Atividade 2 .....	81

Figura 59 - Variação da potência aparente na Atividade 2.....	81
Figura 60 - Variação da corrente de linha na Atividade 3.....	82
Figura 61 - Variação de potência ativa na Atividade 3. ....	82
Figura 62 - Variação da potência reativa na Atividade 3.....	83
Figura 63 - Variação da potência aparente na Atividade 3.....	83
Figura 64 - Variação da corrente de linha na Atividade 4.....	84
Figura 65 - Variação de potência ativa na Atividade 4. ....	84
Figura 66 - Variação da potência reativa na Atividade 4.....	85
Figura 67 - Variação da potência aparente na Atividade 4.....	85
Figura 68 - Variação da corrente de linha do Gerador 1 na Atividade 5.....	86
Figura 69 - Variação de potência ativa do Gerador 1 na Atividade 5. ....	86
Figura 70 - Variação da potência reativa do Gerador 1 na Atividade 5. ....	87
Figura 71 - Variação da potência aparente do Gerador 1 na Atividade 5.....	87
Figura 72 - Variação da corrente de linha do Gerador 2 na Atividade 5.....	88
Figura 73 - Variação de potência ativa do Gerador 2 na Atividade 5. ....	88
Figura 74 - Variação da potência reativa do Gerador 2 na Atividade 5. ....	89
Figura 75 - Variação da potência aparente do Gerador 2 na Atividade 5.....	89
Figura 76 - Variação da corrente de linha do barramento infinito na Atividade 5. ....	90
Figura 77 - Variação de potência ativa do barramento infinito na Atividade 5.....	90
Figura 78 - Variação de potência reativa do barramento infinito na Atividade 5.....	91
Figura 79 - Variação de potência aparente do barramento infinito na Atividade 5. ...	91

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Contextualização.....	15
1.2. Justificativa.....	17
1.3. Objetivo.....	17
1.4. Estrutura do Trabalho.....	17
2. INTRODUÇÃO A SISTEMAS ELÉTRICOS.....	18
2.1. Características do SEP.....	18
2.2. Introdução ao sistema de geração de energia elétrica.....	20
2.2.1. Máquina Primária.....	21
2.2.2. Geradores.....	21
2.2.3. Transformadores.....	21
2.2.4. Controle, comando e proteção.....	22
2.3. Máquinas Primárias.....	23
2.3.1. Hidráulicas.....	23
2.3.2. Térmicas.....	24
2.3.3. Termonucleares.....	26
2.3.4. Turbinas eólicas.....	26
2.4. Geradores.....	29
2.4.1. Características construtivas.....	30
2.4.2. Princípio de funcionamento.....	31
2.4.3. Geração de corrente trifásica.....	33
2.4.4. Regulação de tensão.....	35
2.4.5. Métodos de aprendizagem de SEP.....	36
3. METODOLOGIA.....	38
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	44
4.1. Atividade 1 – Sistema Isolado: Geração + Carga.....	44
4.1.1. Objetivo.....	44
4.1.2. Contextualização.....	44
4.1.3. Paralelismo de Alternadores.....	44
4.1.4. Alimentação de cargas.....	49
4.2. Atividade 2 – Sistema Isolado: Geração + Carga + Controle de tensão e frequência.....	60

4.2.1. Objetivo.....	60
4.2.2. Contextualização.....	60
4.2.3. Paralelismo de Alternadores .....	61
4.2.4. Alimentação de cargas.....	61
4.3. Atividade 3 – Sistema Isolado: Geração + Rede de transmissão + Carga.....	66
4.3.1. Objetivo.....	66
4.3.2. Paralelismo de Alternadores .....	66
4.3.3. Alimentação de cargas.....	66
4.4. Atividade 4 – Sistema Isolado: Geração + Rede de transmissão + Carga + Controle de tensão e frequência .....	68
4.4.1. Objetivo.....	68
4.4.2. Paralelismo de Alternadores .....	68
4.4.3. Alimentação de cargas.....	68
4.5. Atividade 5 – Sistema Integrado: Geração + Barramento infinito + Carga.....	70
4.5.1. Objetivo.....	70
4.5.2. Paralelismo de Alternadores .....	70
4.5.3. Paralelismo com a rede .....	71
4.5.4. Alimentação de cargas.....	73
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
5.1. Trabalhos futuros.....	76
5.2. Conclusões.....	76
REFERÊNCIAS.....	78
<b>ANEXO A – Dados obtidos na Atividade 2 .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO B – Dados obtidos na Atividade 3 .....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO C – Dados obtidos na Atividade 4 .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO D – Dados obtidos na Atividade 5 .....</b>	<b>86</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Contextualização

O setor elétrico mundial evolui continuamente em tamanho, diversidade e complexidade, ao mesmo tempo em que enfrenta um aumento de competição no comércio de energia, e mudanças no seu ambiente de regulação. A operação dos sistemas de grande porte, no Brasil, e no mundo, é uma atividade cujo grau de conhecimento necessário é elevado e vem crescendo cada vez mais.

No Brasil, o aumento na demanda de energia está relacionado com o crescimento da economia. Além deste crescimento é necessário considerar que a sociedade tem se tornado cada vez mais exigente quanto à qualidade e à continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Os agentes do setor elétrico estão sujeitos à condição de operação do sistema perto de seus limites físicos, com seu funcionamento cada vez mais sujeito a fenômenos tais como: perda de sincronismo, variação de frequência, colapso de tensão, corte de geradores e cargas, operação ilhada, etc. No Brasil isso ocorre dentro de um ambiente onde a tutela da operação do sistema está entregue ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

O controle exercido pelos centros de operação do ONS torna-se então crítico e cada vez mais dependente do desempenho dos operadores do sistema em tempo real, ficando imprescindível que estes operadores tenham um maior domínio e habilidade na operação, suportando as crescentes e complexas tomadas de decisões, de maneira rápida e precisa. [13]

Ações equivocadas dos operadores podem levar a graves prejuízos, tanto para os consumidores de energia elétrica quanto para o sistema. Para desempenhar corretamente suas atividades, os profissionais de operação precisam dominar diversas áreas da engenharia elétrica. A diversidade de assuntos envolvidos dificulta o desempenho satisfatório da atividade e torna longo, complexo e detalhado o aprendizado e treinamento na área.

Apesar dos inegáveis ganhos propiciados pela utilização de atividades práticas como instrumento de formação e a permanente capacitação dos profissionais, sua aplicação ainda se encontra aquém do desejável. Usualmente o treinamento de um novo operador para o sistema elétrico é feito com aulas teóricas e a prática é obtida operando o sistema real. Diferente dos antigos operadores, que

somente após muitos anos de experiência de campo, iam trabalhar numa sala de controle, e mesmo assim, passavam por treinamentos de aproximadamente um ano em centros de treinamento. Isso faz com que o novo operador tenha um grande déficit em termos de experiência do dia-a-dia da operação do sistema, podendo prejudicar a tomada de decisão na sala de controle. [13]

O mesmo ocorre com o corpo de engenharia que supervisiona e gerencia este tipo de atividade de alta complexidade. A formação dos engenheiros eletricitas em particular requer um excelente conhecimento das diversas características operacionais passíveis de ocorrer em Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

É durante a aprendizagem que o profissional tem a oportunidade de construir o conhecimento e tem a possibilidade de experimentar algo que não lhe é permitido, em hipótese alguma, durante a execução de suas tarefas diárias, o erro.

A utilização dos métodos de simulação de redes elétricas permite avaliar o comportamento do operador, do executivo e do gestor no ponto de vista dos procedimentos de operação. Além disso, permite também diferentes tipos de aplicações, que são:

- A análise do comportamento do sistema elétrico de potência;
- Conhecimento dos procedimentos de operação em situação normal, ou em situação de emergência ou recomposição do sistema;
- Acelerar a formação de experiência.

Durante a graduação, o aluno estuda diversas disciplinas, em diversas áreas. Em algum momento o seu foco é direcionado a uma determinada área específica. Na maioria dos casos o destino se dá devido à afinidade por uma determinada disciplina, ou um grupo de disciplinas.

As disciplinas básicas na formação de um engenheiro eletricitista, especialmente aqueles que optam pela ênfase em eletrotécnica, são as disciplinas que tratam de SEP. A partir dos conceitos fundamentais abordados em suas ementas, se viabilizam o estudo de tópicos mais elaborados tais como estabilidade de sistemas elétricos, planejamento e controle, e proteção do sistema elétrico. Dentre as disciplinas importantes destaca-se o estudo aprofundado à disciplina de Análise de SEP.

Uma das ferramentas mais importantes dentre as estudadas nesta disciplina é o cálculo do fluxo de potência. Através deste método é possível basicamente



determinar o estado operacional de um sistema elétrico, descrito em termos da tensão complexa nas barras, para uma dada condição de geração e carregamento, e com isso, determinar os fluxos de potência em todos os elementos que constituem a rede elétrica, tais como linhas de transmissão e transformadores.

## 1.2. Justificativa

Levando em conta o cenário apresentado anteriormente, fica claro que em disciplinas que abordam o cálculo do fluxo de potência é fundamental que o aluno seja estimulado a realizar simulações computacionais e práticas com diversas configurações de redes elétricas e relacioná-la aos fundamentos teóricos vistos em aula durante a graduação.

O desenvolvimento da capacidade de antecipação das consequências das ações, por meio de execuções anteriores em ambiente simulado, pode evitar que decisões coloquem em risco pessoas, equipamento e o próprio sistema elétrico. Portanto, é necessário que na formação de um profissional capacitado haja um elevado aprendizado prático, além do teórico.

## 1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é criar uma referência ao apresentar algumas atividades práticas que possibilitam uma maior aprendizagem aos estudos referentes ao funcionamento de um Sistema Elétrico como um todo. Nestas atividades é possível trabalhar diversas disciplinas do curso de engenharia elétrica, conforme citado anteriormente.

## 1.4. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho será dividido em 5 capítulos, sendo o capítulo 1 a introdução do trabalho, o capítulo 2 uma revisão teórica sobre os SEPs, apresentando suas características e componentes. O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada e o capítulo 4 os resultados obtidos e uma discussão sobre os mesmos. O capítulo 5 aponta as conclusões obtidas e o capítulo 6 as referências utilizadas.

## 2. INTRODUÇÃO A SISTEMAS ELÉTRICOS

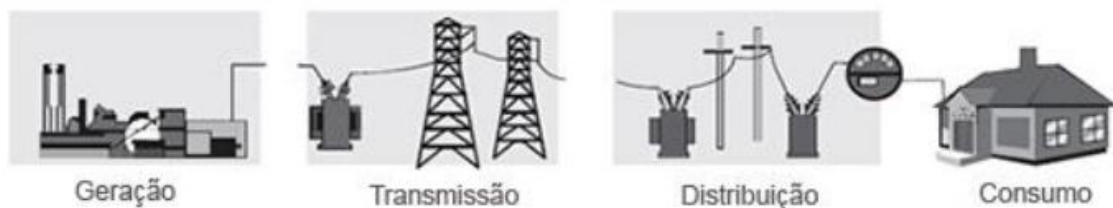
Sistemas Elétricos de Potência são grandes sistemas de energia. Eles englobam um conjunto de equipamentos que operam de maneira coordenada. Estes equipamentos têm por objetivo produzir e transportar a energia elétrica em larga escala aos consumidores, levando sempre em consideração certos padrões de qualidade (confiabilidade, disponibilidade), segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental.

A energia não é criada, e sim transformada (convertida) de uma fonte energética para energia elétrica. A geração de energia elétrica se dá em diversas usinas localizadas conforme sua característica.

As usinas hidrelétricas, por exemplo, que usam represamento de rios e lagos, encontram-se localizadas nos pontos onde há maior eficiência na armazenagem de água e conversão de energia. No caso de uma usina eólica, esta se localiza próxima a uma região com um bom perfil de vento.

O SEP engloba todas as formas de geração de energia elétrica e sua transmissão até os consumidores, a Figura 1 apresenta uma ilustração de um sistema elétrico convencional.

**Figura 1 - Sistema Elétrico**



Fonte: [3]

### 2.1. Características do SEP

Hoje em dia, os SEPs representam um conjunto de maiores e mais complexas máquinas já construídas pelo homem. [3]

- Centenas de geradores interligados;
- Milhares de quilômetros de linhas de transmissão;
- Milhões de consumidores.

Devido a essas características, esta área exige técnicas e estudos cada vez mais precisos e refinados para construir, manter e operar de maneira adequada estas máquinas. Além disso, esse sistemas estão expostos à condições adversas e imprevisíveis (contingências) que podem levar a situações de falha ou má operação, causando transtornos e problemas a todos que dependem da energia elétrica.

A transmissão de energia elétrica é o processo de transportar energia entre dois pontos. A transmissão de energia é dividida em duas faixas: a transmissão propriamente dita, para potências mais elevadas e ligando grandes centros, e a distribuição, usada dentro de centros urbanos, por exemplo.

Cada linha de transmissão possui um nível de tensão nominal, onde encontramos valores até de 750 kV. As linhas de distribuição são usualmente na faixa de 13,8 kV a 34,5 kV no Brasil. Para a conversão entre níveis de tensão, são usados como equipamentos fundamentais os transformadores de potência. Os transformadores de grande porte (para grandes elevações ou diminuições na tensão do sistema) encontram-se normalmente nas subestações. [13]

Levando em consideração os níveis de tensão citados na utilização das determinadas redes, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o ONS estabelecem algumas exigências quanto a estes níveis, tanto na Rede Básica (sistema de alta tensão) quanto na Rede de Distribuição (sistema de média tensão). No Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), que trata da qualidade da energia elétrica, são citadas as faixas referentes aos limites superiores e inferiores estabelecidos. Normalmente é feita atualização nas informações contidas neste Módulo.

As concessionárias buscam se adequar a estas normas visando à qualidade e, principalmente, a continuidade do fornecimento. Em sistemas de grande porte, é usual a interligação redundante entre sistemas, ou ainda a ligação em anel, formando uma rede. O número de interligações aumenta a confiabilidade do sistema, porém, aumenta a complexidade.

Os consumidores residenciais de energia elétrica representam uma demanda baixa de energia, apesar de ser um número elevado de usuários. A classe industrial é o setor na qual possui demanda mais significativa ao se tratar de consumo de energia elétrica. Entretanto, com o crescimento econômico, o consumo nas residências, e em todos os outros setores, vem crescendo com o decorrer dos anos, o que implica necessidade de expansão do sistema como um todo. Assim, é

importante o conhecimento do comportamento da carga futura para a operação, análise e principalmente para o planejamento do SEP.

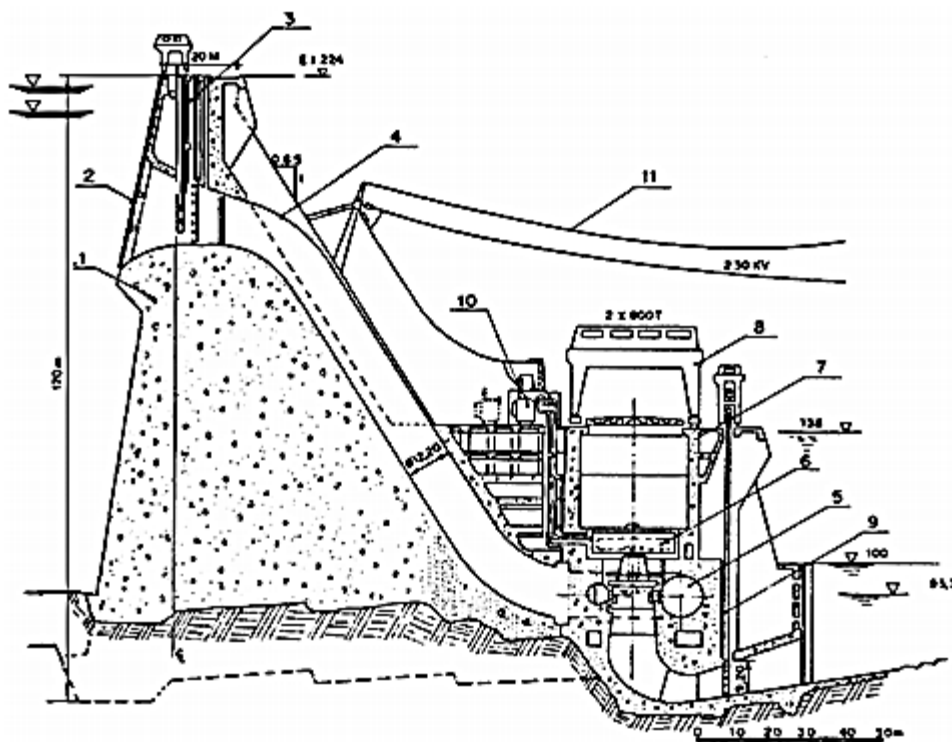
## 2.2. Introdução ao sistema de geração de energia elétrica.

O sistema de geração é formado pelos seguintes componentes: máquina primária, geradores, transformador e sistema de controle, comando e proteção.

O processo de geração de energia elétrica ocorre em duas etapas. Na 1ª etapa uma máquina primária transforma qualquer tipo de energia, normalmente hidráulica ou térmica, em energia cinética de rotação. Em uma 2ª etapa um gerador elétrico acoplado à máquina primária transforma a energia cinética de rotação em energia elétrica.

Como por exemplo, uma turbina de uma central hidrelétrica transforma a energia potencial da água em desnível em energia cinética de rotação que é transferida a um eixo acoplado a um gerador, tal como mostrado na Figura 2.

**Figura 2 - Central hidráulica. 1-Barragem, 2-Grades, 3- Tomadas de água, 4-Condutor forçado, 5-Turbina, 6-Alternador, 7-Casa de máquinas, 8-Pórtico-ponte, 9-Sistema de descarga, 10-Transformadores, 11-Sistema de transmissão.**



Fonte: Engenharia é

### 2.2.1. Máquina Primária

É a máquina primária que faz a transformação de qualquer tipo de energia em energia cinética de rotação para ser aproveitada pelo gerador. Por exemplo, a máquina que transforma a energia liberada pela combustão do gás em energia cinética é a turbina a gás.

As principais máquinas primárias utilizadas hoje são turbinas hidráulicas, turbinas a vapor, e turbinas eólicas. Podendo citar também os sistemas de geração movidos por um motor a Diesel e as turbinas a gás.

As centrais elétricas onde as máquinas primárias são turbinas a vapor podem ser classificadas em relação ao combustível utilizado para aquecer o vapor. Para o processo de combustão, as centrais são chamadas de termelétricas, já para o processo de fissão nuclear são chamadas de term nucleares. [11]

### 2.2.2. Geradores

São os geradores que transformam a energia cinética de rotação das máquinas primárias em energia elétrica. Os geradores são dimensionados de acordo com a potência que a máquina primária pode fornecer. Além da potência, o tipo de máquina primária (eólica, hídrica, térmica, etc...) define também a velocidade de rotação que irá ser transmitida ao gerador e, em função dessa velocidade é definido o número de polos do gerador. As características, o princípio de funcionamento e demais questões referentes a geradores serão estudados mais profundamente seção 2.2.32.4. [11]

### 2.2.3. Transformadores

Uma vez gerada a energia elétrica, existe a necessidade de se compatibilizar o nível da tensão de saída com a tensão do sistema ao qual o grupo gerador será ligado. O equipamento utilizado para elevar ou rebaixar o nível de tensão é o transformador.

Desta forma um grupo gerador que gera energia a uma tensão de 13.8 kV pode ser ligado a uma linha de transmissão de 69 kV, por exemplo, desde que um transformador de 13,8/69 kV faça o ajuste da tensão. [3]

#### 2.2.4. Controle, comando e proteção.

Para interligar um grupo gerador a uma rede de transmissão ou distribuição são necessários vários requisitos. Em primeiro lugar, a tensão de saída do gerador não pode variar mais que 10% de seu valor nominal. O controle da tensão é feito através da excitatriz do próprio. No entanto, não basta apenas compatibilizar a tensão. É necessário que se faça o sincronismo entre este centro de geração e a rede, antes de comandar o fechamento da linha. Para que estas medidas sejam tomadas, são necessários vários equipamentos de manobra e proteção, tais como transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), relés e disjuntores. O “quadro” de comando e proteção reúne todos estes equipamentos, e permite ao operador supervisionar o funcionamento do sistema e atuar imediatamente caso se faça necessário.

A frequência do sistema elétrico é a variável mais importante e a mais complexa de ser controlada. Para que o sistema de geração funcione corretamente, é necessário que a frequência da tensão de saída do gerador seja constante e de acordo com o sistema elétrico da região em que se encontra. No Brasil, por exemplo, a frequência de operação do sistema elétrico é de 60 Hz, já no Paraguai o sistema opera em 50 Hz.

Esta frequência é função da rotação do gerador, e, portanto, o gerador deve funcionar sempre em uma rotação fixa, que é aplicada pela máquina primária. Assim, a frequência depende da velocidade de rotação da máquina primária. Cabe ao sistema de controle atuar nos reguladores de velocidade das máquinas primárias para garantir uma frequência fixa da tensão na saída do gerador.

A potência elétrica de saída do gerador é diretamente proporcional à potência mecânica transmitida pela máquina primária através do eixo. Sabemos que a potência mecânica na ponta do eixo de uma máquina girante é diretamente proporcional ao produto da velocidade de rotação e ao torque na ponta de eixo.

Portanto, se o gerador precisar fornecer mais potência para o sistema devido a um aumento súbito de carga, a máquina primária precisa aumentar o torque transferido ao gerador, uma vez que a rotação deve-se manter constante. [6]

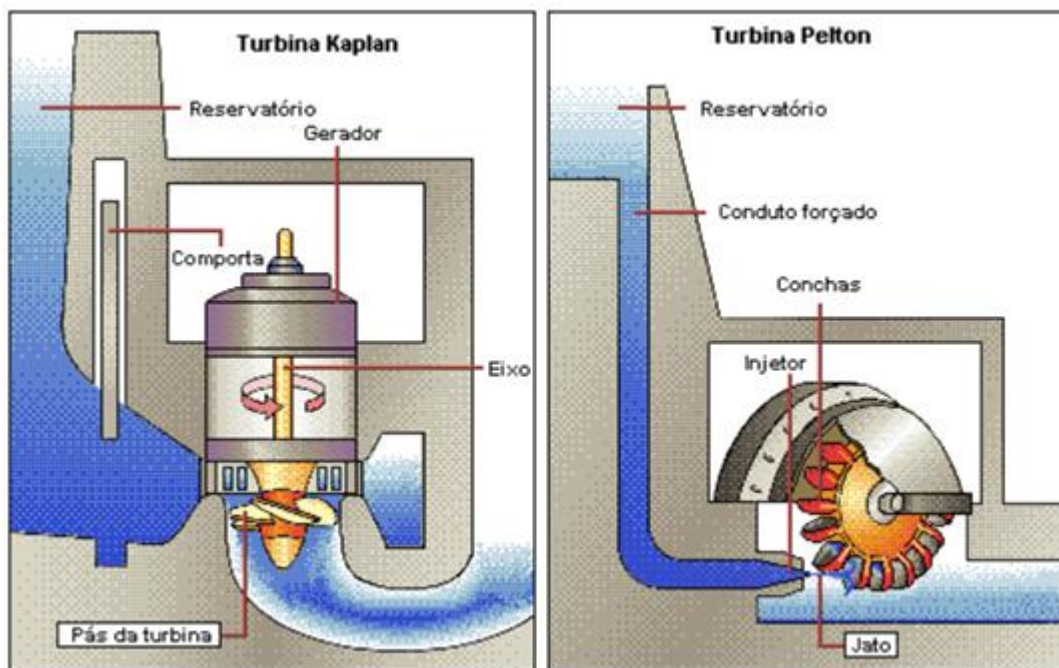
## 2.3. Máquinas Primárias

### 2.3.1. Hidráulicas

A fonte de energia em uma central hidráulica é a energia potencial de um volume de água, em função da diferença de altitude entre o montante e a jusante.

Para iniciar o processo de conversão da energia potencial da água em energia elétrica, a água dos reservatórios é captada, através de um sistema de adução onde a água é transportada através de condutos de baixa pressão. Os condutos de baixa pressão possuem uma declividade muito baixa, pois a sua finalidade é apenas o transporte da água até a entrada dos condutos forçados, que conduzem a água até a casa de máquinas, onde se encontram as turbinas. A Figura 3 apresenta um exemplo de barragem.

Figura 3 - Exemplo de turbina em barragem.



Fonte: Engenharia é

A turbina hidráulica é uma máquina com a finalidade de transformar a energia cinética do escoamento contínuo da água que a atravessa, em trabalho mecânico. Para isso, elas são equipadas com uma série de pás (ou conchas, no caso das turbinas Pelton).

Quando a água atravessa essas pás, as turbinas giram com uma grande força. A força com que gira essa turbina depende inicialmente da altura da queda de água, que corresponde, aproximadamente, a diferença de altitude entre a adução e a entrada da turbina.

Basicamente existem dois tipos de turbinas hídricas: as turbinas de reação ou propulsão, e turbinas de ação ou impulso:

- a) Turbinas de Reação (ou propulsão): São turbinas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinéticas e de pressão da água em escoamento através do rotor. As turbinas de reação são as do tipo Francis e Kaplan;
- b) Turbinas de Ação (ou impulso): Aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela obtenção da energia cinética da água em escoamento através do rotor. As turbinas de ação são as do tipo Pelton.

A turbina hidráulica utiliza a energia cinética de rotação de seu rotor para girar o gerador ao qual está conectado. Um dispositivo elétrico chamado transformador converte a tensão de saída do gerador em tensões aproveitáveis pelas concessionárias.

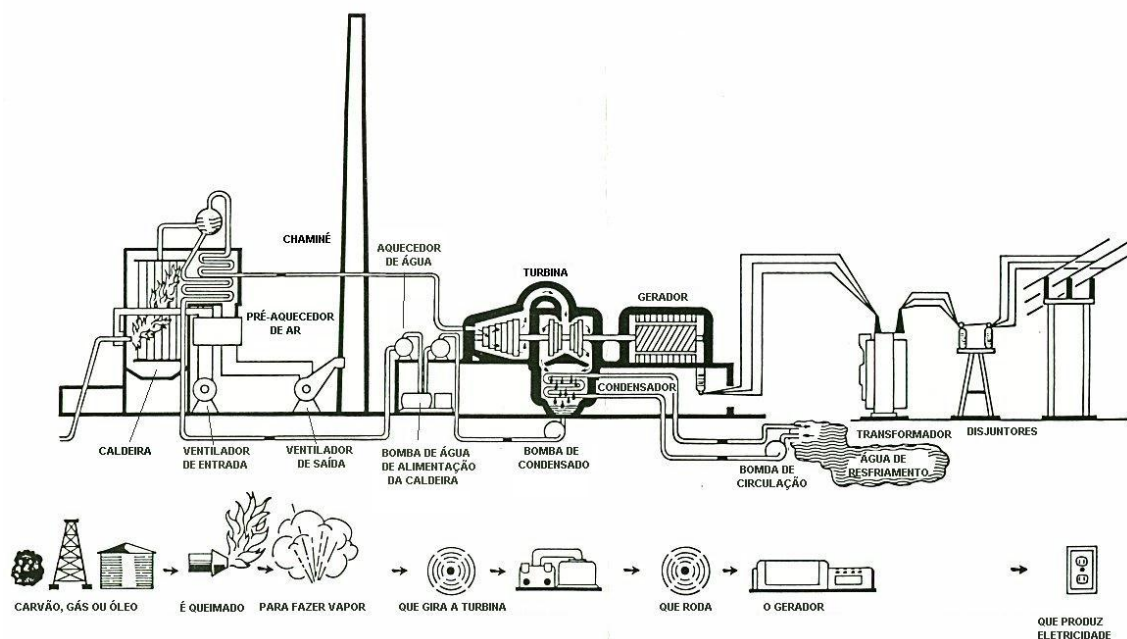
### 2.3.2. Térmicas

As máquinas a vapor foram às primeiras máquinas a produzirem energia mecânica aproveitável em processos industriais. Por isto essas máquinas foram fundamentais para o acontecimento da revolução industrial. Com o aparecimento da eletricidade, as máquinas a vapor se tornaram peças fundamentais para a geração de energia elétrica, uma vez que já existia o domínio dessa tecnologia.

As instalações de potência com turbinas a vapor podem visar apenas à obtenção de energia elétrica ou mecânica, ou então, simultaneamente energia elétrica e mecânica. Essas centrais podem trabalhar em circuito aberto ou fechado, sendo o circuito aberto muito utilizado quando se pretende utilizar calor para o processo, a Figura 4 apresenta o funcionamento de usinas térmicas.



Figura 4 - Funcionamento de usinas térmicas



Fonte: Revista Época

O aquecimento da água é feito através da queima de algum combustível. De um modo geral denomina-se combustível qualquer corpo cuja combinação química com outro seja exotérmica.

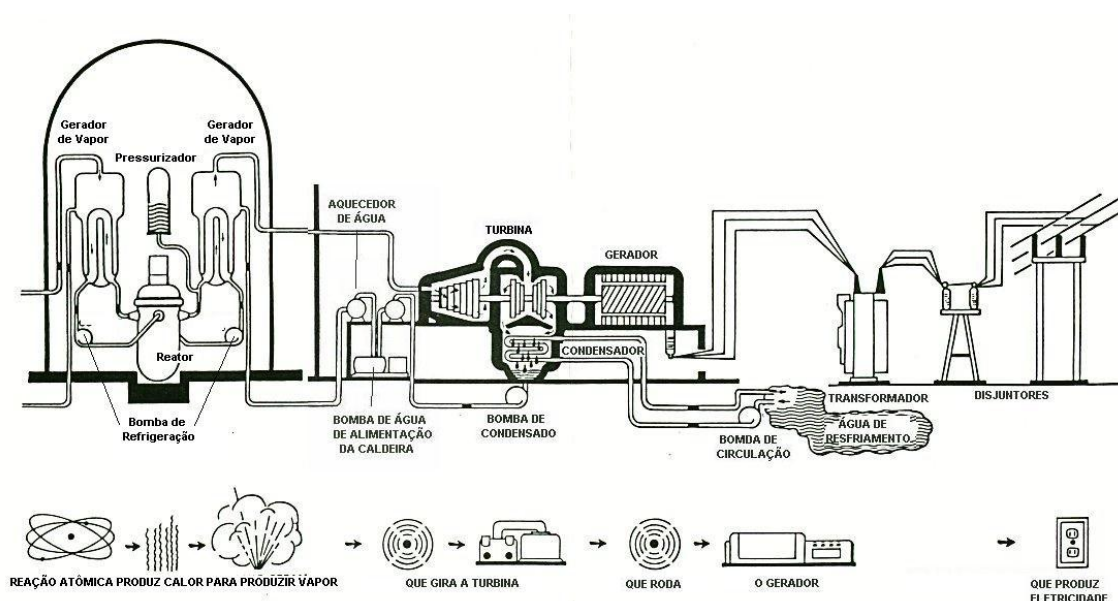
Basicamente, uma instalação a vapor é composta de bomba, caldeira, turbina e condensador. Tendo em vista a pressão na saída da turbina, têm-se as instalações a vapor de condensação e de contrapressão. Na primeira, a pressão do vapor na saída da turbina é menor que a atmosférica, na segunda é maior.

A combustão ocorre na caldeira, dentro da câmara de combustão onde são injetados o combustível e o comburente (ar). Após a combustão são retirados, como produto do processo, gases e cinzas constituídos de produtos não queimados. A liberação de energia térmica devido ao processo de combustão aquece a água na caldeira até evaporar. Uma vez na tubulação, um superaquecedor eleva a temperatura do vapor aumentando assim a pressão para entrar na turbina. Ao passar pela turbina o vapor perde pressão e vai para o condensador onde volta ao estado líquido e é bombeado de volta para a caldeira. A turbina é a máquina que transforma a energia da pressão do vapor em energia cinética de rotação e, através de um eixo de acoplamento, transmite essa energia para o gerador.

### 2.3.3. Termonucleares

As usinas termonucleares funcionam utilizando o mesmo princípio de funcionamento das usinas térmicas, ou seja, as máquinas que entregam energia para o gerador são as turbinas a vapor, ilustrada na Figura 5. O que torna essas usinas especiais é o combustível utilizado. Ao invés de uma reação química de combustão, o que acontece é uma liberação de energia a nível atômico.

**Figura 5 - Funcionamento de usinas nucleares**



Fonte: Revista Época

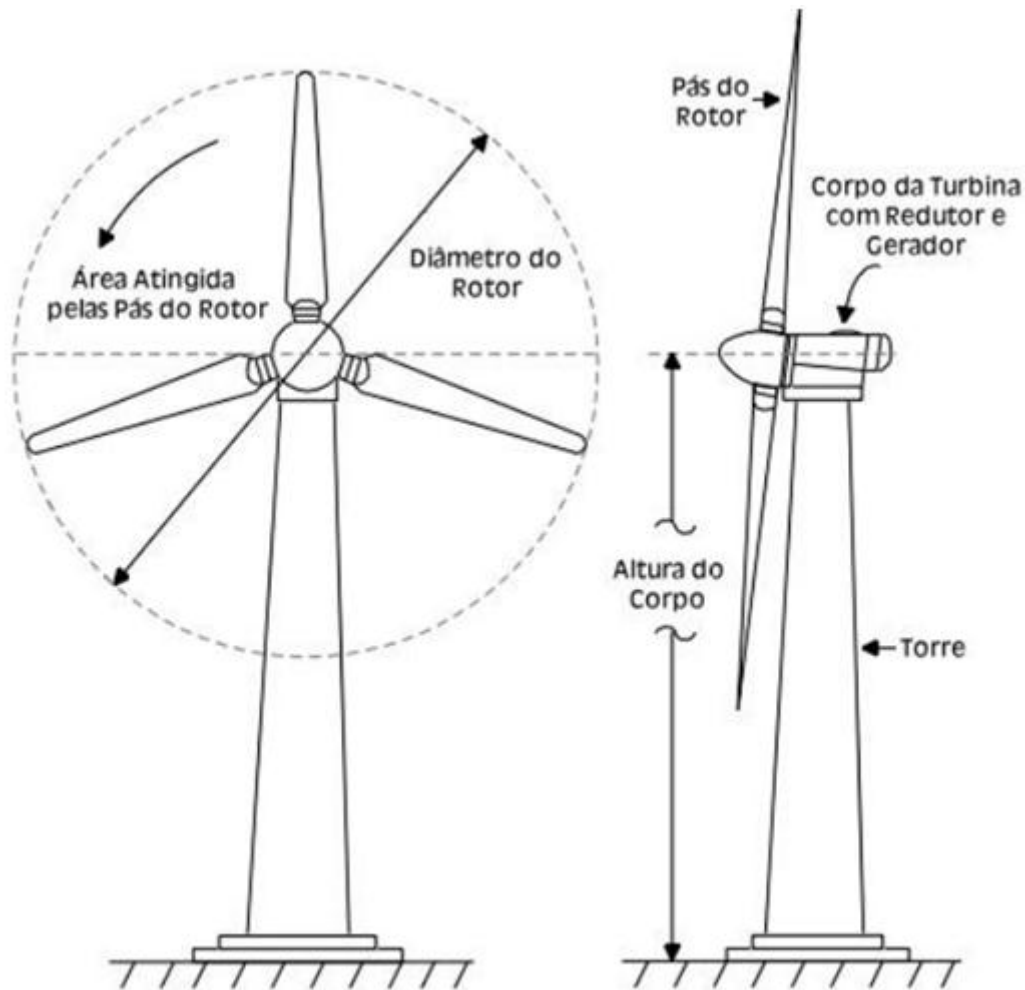
### 2.3.4. Turbinas eólicas

Uma turbina eólica obtém potência convertendo a força dos ventos em um torque atuando nas pás do rotor. A quantidade de energia que o vento transfere para o rotor depende da densidade do ar, da área do rotor, e da velocidade do vento. A energia cinética de um corpo em movimento é proporcional a sua massa. A energia cinética do vento também depende da densidade do ar, ou seja, de sua massa por unidade de volume. Em outras palavras, quanto mais pesado for o ar, mais energia é recebida pela turbina.

Sob pressão atmosférica normal e a 15°C a massa do ar é de 1,225 kg/m<sup>3</sup>, mas a densidade aumenta com o aumento da umidade. De forma análoga, quanto menor a temperatura do ar, mais denso. Em elevadas altitudes (em montanhas, por exemplo) a pressão do ar é menor e, portanto, a densidade é menor.

A área do rotor determina quanta energia o rotor está apto a retirar do vento. Uma turbina eólica típica de 600kW possui um rotor com cerca de 43 a 44 metros de diâmetro, o que significa que cobre uma área de 1500m<sup>2</sup>, aproximadamente. A Figura 6 ilustra uma turbina eólica.

Figura 6 - Turbina eólica.



Fonte: [19]

A velocidade do vento é extremamente importante para a quantidade de energia que uma turbina pode converter para energia elétrica. A energia contida no vento varia com o cubo da velocidade média do vento. Por exemplo, se a velocidade do vento aumenta duas vezes, a energia convertida aumenta 8 vezes.

Portanto, a potência gerada por uma turbina eólica pode ser dada por:

$$P = 0,5v^3A^2\rho_{ar} \quad (1)$$

Fonte: [19]

Onde,

$P$  – Potência gerada (W)

$v$  – Velocidade do vento (m/s)

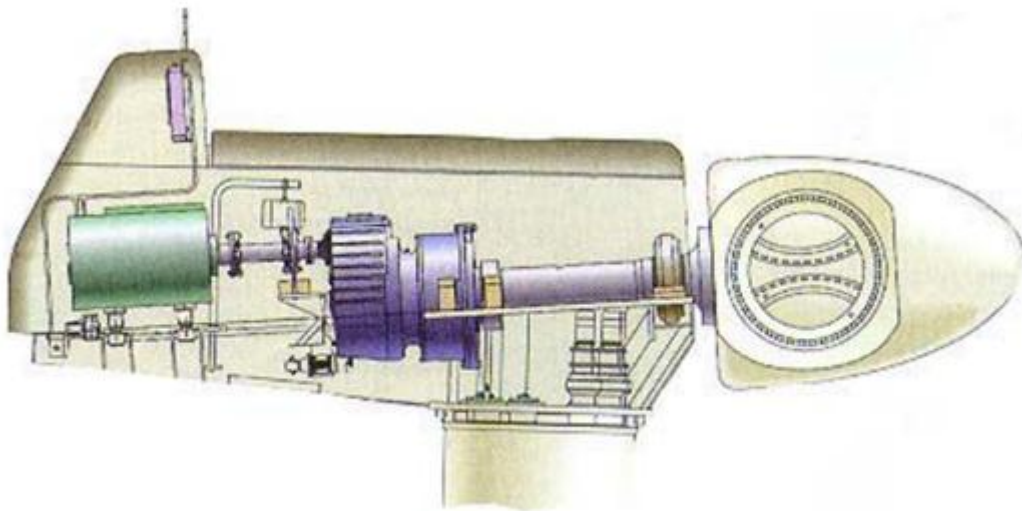
$A$  – Área do rotor ( $m^2$ )

$\rho_{ar}$  – densidade do ar: 1,225 ( $kg/m^3$ )

Para “captar” a energia cinética do vento e transferir para a flange do rotor transformando em energia cinética de rotação, as pás do rotor são desenhadas conforme as asas de um avião. Ou seja, o desenho aerodinâmico cria regiões de diferentes pressões em torno das pás fazendo com que elas se movam. Em uma turbina de 600 kW moderna, as pás do rotor medem cerca de 20 metros.

O corpo da turbina eólica faz o encapsulamento dos componentes principais, incluindo o redutor e o gerador elétrico. O pessoal da manutenção pode entrar no corpo a partir da torre da turbina quando houver necessidade. Em uma das extremidades do corpo fica o rotor, isto é, as pás interligadas pela flange, e na outra o anemômetro e o cata-vento, a Figura 7 ilustra o corpo de uma turbina eólica.

**Figura 7 - Corpo da turbina eólica.**



Fonte: [19]

O eixo de alta rotação interliga o amplificador e o gerador. Ele está equipado com um freio a disco mecânico de emergência que é usado no caso do freio aerodinâmico falhar ou quando a turbina está em manutenção.

O gerador usado nas turbinas eólicas é um gerador de indução ou gerador assíncrono, que utiliza o mesmo princípio de funcionamento do motor assíncrono. Esta característica torna os geradores de turbinas eólicas mais baratos e com um menor custo de manutenção.

O controlador eletrônico é um computador que monitora continuamente as condições do vento na turbina e controla o mecanismo de direcionamento da turbina, que tem a função de manter a turbina sempre perpendicular à incidência do vento. Mudando-se o ângulo de ataque das pás, pode-se variar a velocidade da turbina. Desta forma o controlador atua no sistema hidráulico com o objetivo de manter a velocidade da turbina constante. No caso de algum defeito, como o sobreaquecimento do gerador ou do amplificador, o controlador comanda a parada da turbina e avisa o computador do operador via linha telefônica através de um modem.

O mecanismo de direcionamento utiliza um motor elétrico para virar o corpo da turbina de forma que ela fique totalmente contra o vento. Ele é operado por um controlador eletrônico que monitora a direção do vento utilizando o cata-vento. O sistema hidráulico é utilizado para operar o freio aerodinâmico da turbina. A unidade de refrigeração é responsável por manter a temperatura do gerador e do amplificador dentro de uma faixa aceitável para que não se diminua a vida útil destes equipamentos. Por isso, o sistema de refrigeração possui um ventilador elétrico independente que tem a função de resfriar o gerador, bem como o óleo que é utilizado pelo amplificador. [19]

#### 2.4. Geradores

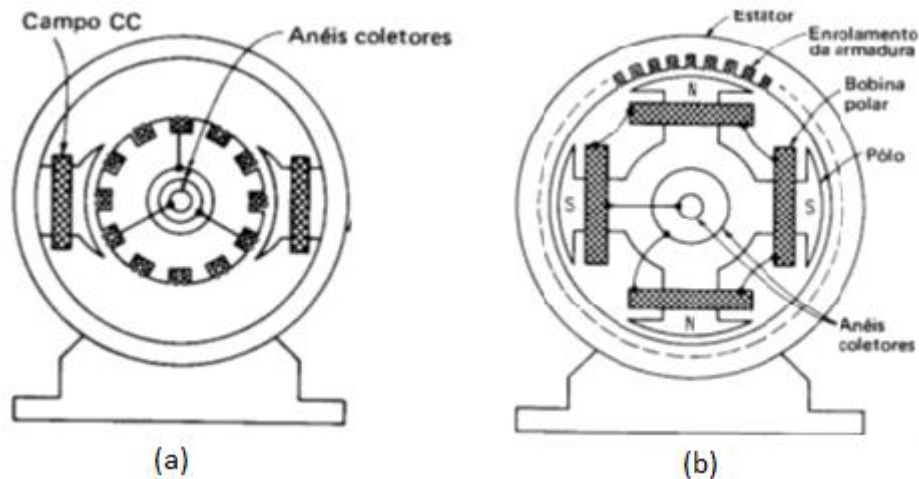
O gerador elementar foi inventado na Inglaterra em 1831 por Michael Faraday, e nos Estados Unidos, mais ou menos na mesma época, por Joseph Henry. Este gerador consistia basicamente de um ímã que se movimentava dentro de uma espira, ou vice-versa, provocando o aparecimento de uma força eletromotriz (FEM) registrado em um galvanômetro.

Geradores síncronos são máquinas destinadas a transformar energia mecânica em energia elétrica. Praticamente toda a energia consumida nas indústrias, cidades, residências, etc., é proveniente destes geradores. [5][11]

### 2.4.1. Características construtivas

Na Figura 8 é possível verificar a diferença construtiva ao que se diz respeito ao posicionamento do enrolamento de armadura no interior da máquina.

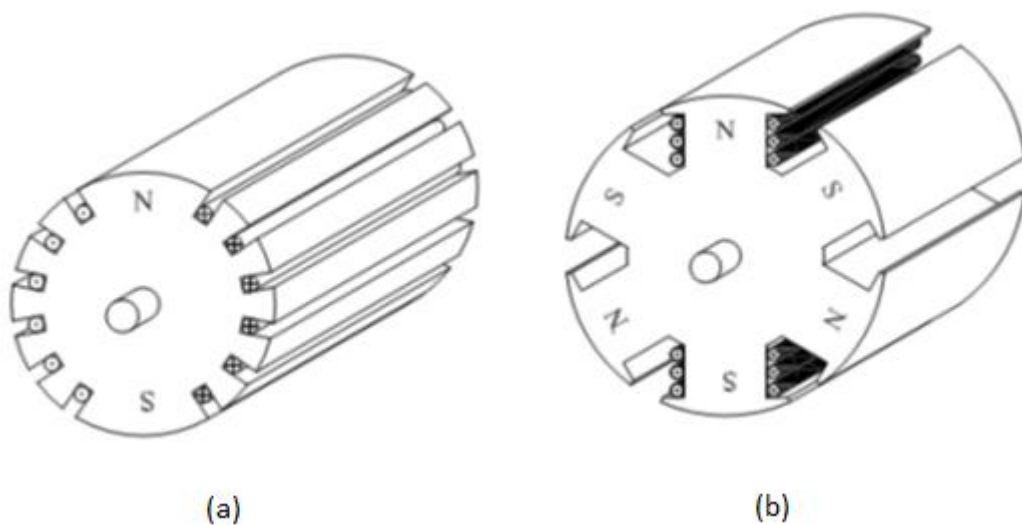
**Figura 8 - (a) Corte da máquina com armadura no rotor (b) Corte da máquina de quatro polos com armadura no estator.**



Fonte: [11]

Os geradores síncronos podem ser de polos lisos ou polos salientes (Figura 9), e estes apresentam diferenças em suas características: construtivas e de funcionamento.

**Figura 9 - (a) Polos lisos (b) Polos salientes**



Fonte: [11]

Polos lisos:

- Produz fluxo magnético na superfície do rotor
- Rotação de alta velocidade
- Dois a quatro polos
- Utilizados, normalmente, em usinas a vapor
- Pequena circunferência
- Grande comprimento

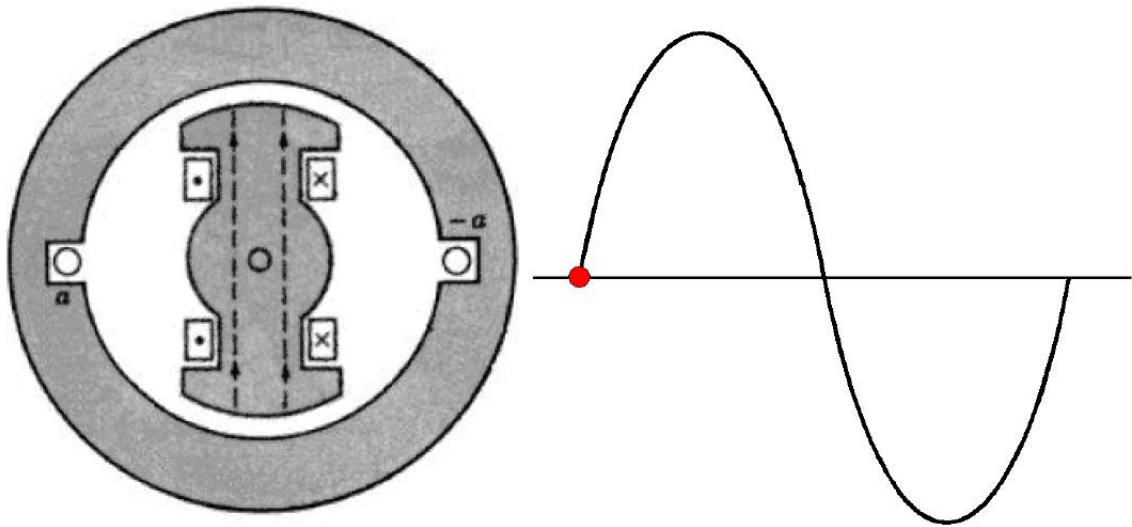
Polos Salientes:

- Produz fluxo magnético fora da superfície do rotor
- Rotação de baixa velocidade
- Muitos polos
- Utilizados, normalmente, em usinas hidrelétricas
- Grande circunferência
- Pequeno comprimento

#### 2.4.2. Princípio de funcionamento

A característica principal de um gerador elétrico é transformar energia mecânica em elétrica. Nos geradores de campo giratório (Figura 10 e Figura 11) a tensão de armadura é retirada diretamente do enrolamento de armadura (posicionado no estator) sem passar pelas escovas. A potência de excitação destes geradores normalmente é inferior a 5% da potência nominal, por este motivo, o tipo de armadura fixa (ou campo girante) é o mais utilizado.

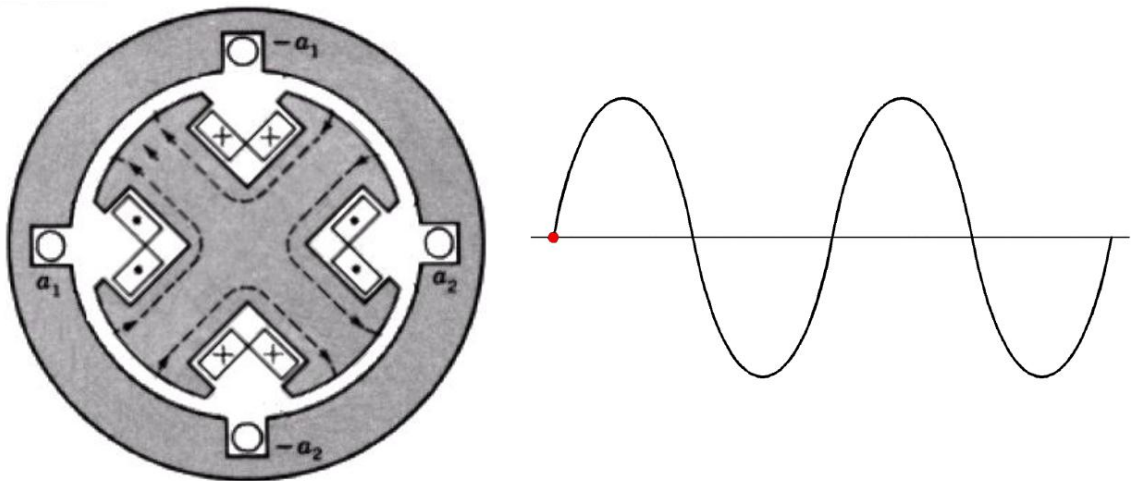
Figura 10 - Tensão gerada na armadura fixa para máquina de 2 polos.



Fonte: [11]

Os enrolamentos podem ser construídos com um número maior de pares de polos, que se distribuirão alternadamente (um norte e um sul).

Figura 11 - Tensão gerada na armadura fixa para máquina de 4 polos.



Fonte: [11]

A frequência  $f$  da tensão gerada pode ser definida por:

$$f = \frac{p \cdot n}{120} [Hz] \quad (2)$$

Fonte: [11]

Sendo  $n$  a rotação da máquina em rpm e  $p$  o número de polos.



O número de polos da máquina terá que ser sempre par, para formar os pares de polos. Na Tabela 1 são mostradas, para as frequências e polaridades usuais, as velocidades síncronas correspondentes.

**Tabela 1: Velocidades de rotação relacionada à frequência e número de polos.**

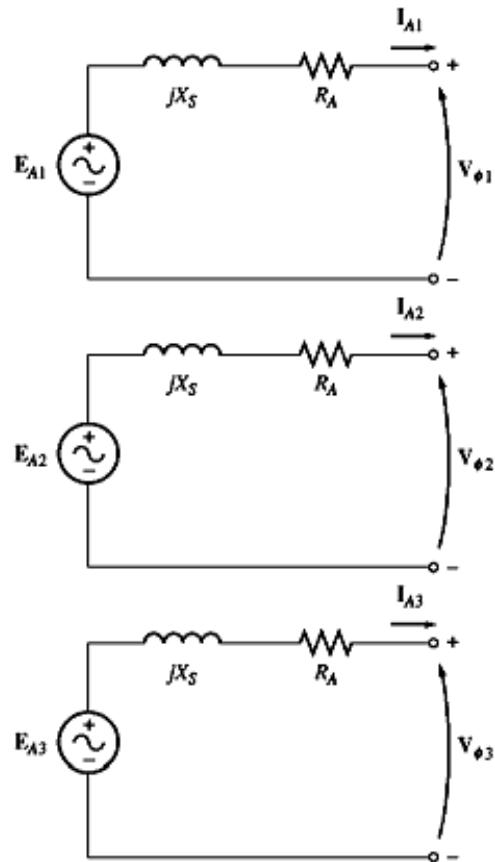
Polos	Velocidade de rotação [rpm]	
	60 Hz	50 Hz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600

Fonte: Autor

#### 2.4.3. Geração de corrente trifásica

O sistema de geração trifásico é formado pela associação de três sistemas monofásicos de tensões. O enrolamento desse tipo de gerador é constituído por três conjuntos de bobinas dispostas simetricamente no espaço, formando entre si também um ângulo de 120°. A Figura 12 apresenta um esquema da associação de três geradores monofásicos. [5]

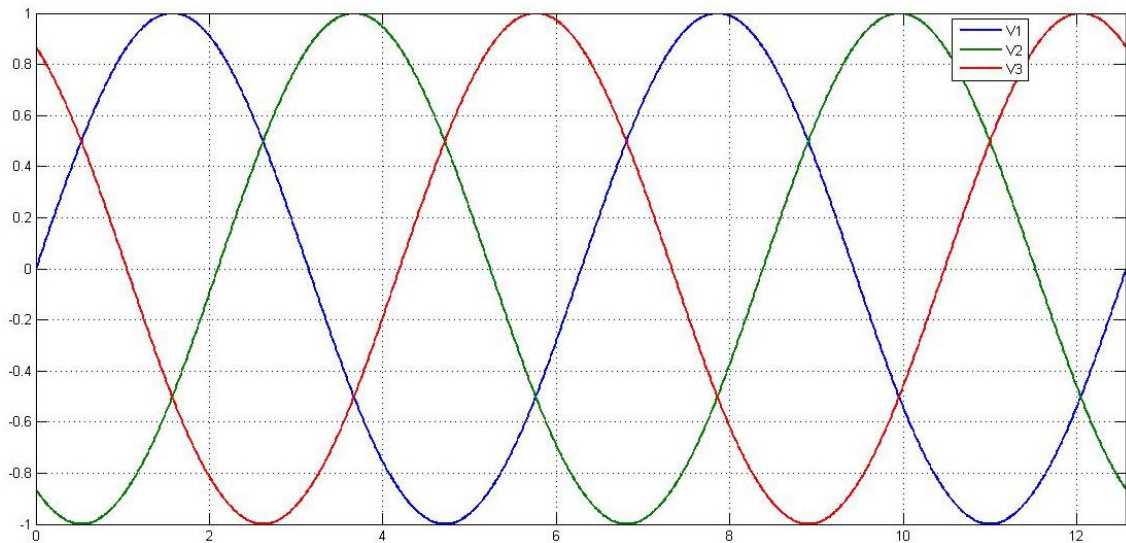
Figura 12 - Associação de três geradores monofásicos.



Fonte: [11]

Para que o sistema seja equilibrado em módulo, isto é,  $V_1 = V_2 = V_3$ , o número de espiras de cada bobina também deverá ser igual. Desta forma, na Figura 13 é possível verificar as tensões geradas em cada fase com módulo igual e defasagem de  $120^\circ$ .

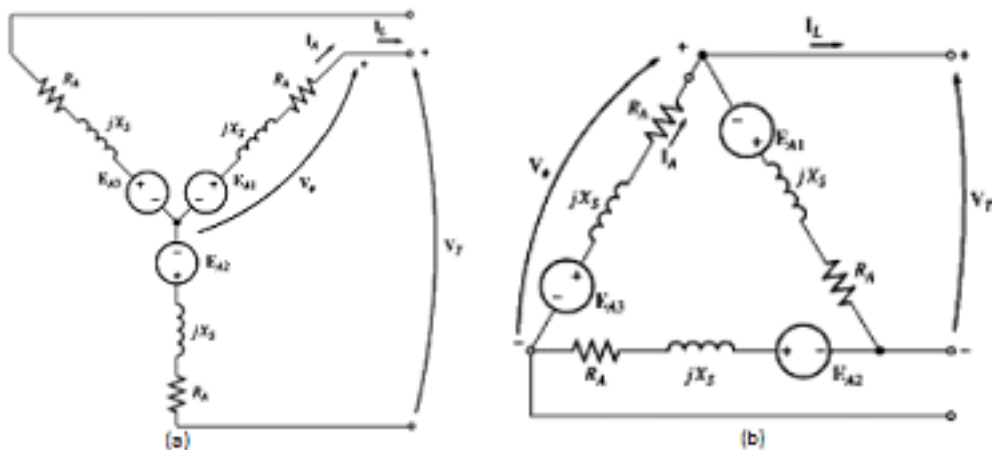
Figura 13 - Defasagem entre tensões geradas.



Fonte: MATLAB

A ligação dos três sistemas monofásicos para se obter o sistema trifásico é feita usualmente de duas maneiras, representadas nos esquemas da Figura 14.

Figura 14 - Ligações Trifásicas - (a) Ligação em estrela (b) Ligação em triângulo (delta).



Fonte: [11]

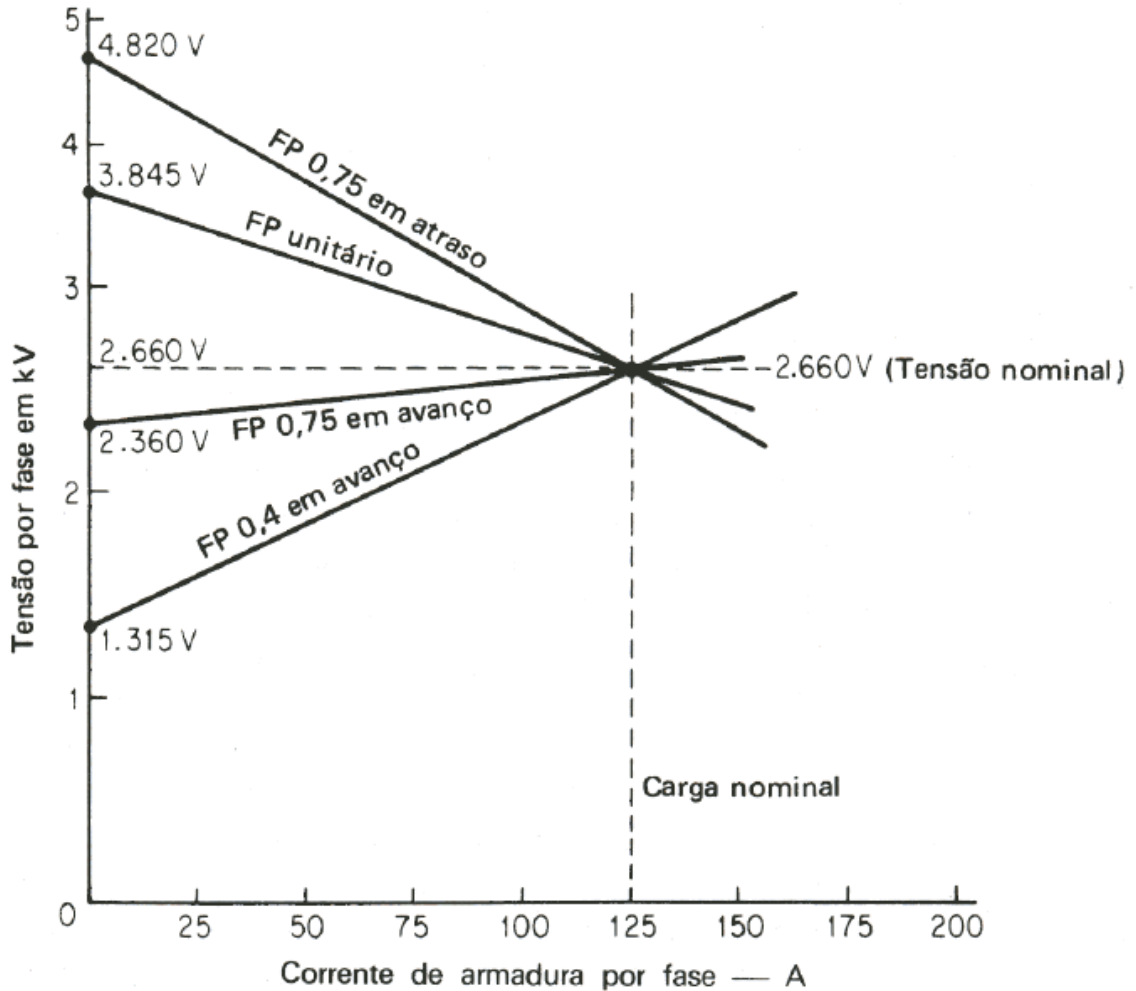
#### 2.4.4. Regulação de tensão

Existe uma relação entre a tensão gerada e a tensão nos terminais do gerador para vários fatores de potência da carga. [5]

- Carga de fator de potência unitário – Carga puramente resistiva
- Carga de fator de potência em atrasado – Carga indutiva
- Carga de fator de potência em avanço – Carga Capacitiva

Na Figura 15 é mostrado um exemplo do nível de tensão nos terminais da máquina para cargas com diferentes fatores de potência.

**Figura 15 - Tensão nos terminais da máquina com a variação do fator de potência.**



Fonte: Autor

#### 2.4.5. Métodos de aprendizagem de SEP

As atividades desenvolvidas durante a graduação são de caráter teórico em sua maioria. Assim, a aprendizagem prática fica defasada, em relação à realidade encontrada. Desta forma, a possibilidade de interagir diversas disciplinas em algumas atividades fortalece o aprendizado.

O estudo realizado durante o Curso, na área de SEP, é baseado na análise matemática de seu comportamento. Criando, então, uma dificuldade ao assimilar conceitos teóricos científicos com a dinâmica constante de um sistema.

Frente a este panorama encontrado durante a aprendizagem, se propôs o levantamento de atividades que possam realizar uma intercomunicação de diversas

disciplinas e, antes de tudo, facilitar o processo de aprendizagem. Diferentemente de muitos trabalhos já desenvolvidos, este não tem a pretensão de criar algo novo. Por isso é importante ressaltar a dificuldade na procura por referências que pudessem elucidar aspectos referentes ao ensinamento prático de SEP. Levando em consideração, neste caso, apenas a experiência vivida durante a graduação. Todavia, este vem apresentar algumas atividades que podem ser trabalhadas visando facilitar a aprendizagem.

### 3. METODOLOGIA

Os sistemas elétricos de potência possuem grande importância no cenário elétrico mundial e devido sua complexidade há inúmeras dificuldades no aprendizado destes sistemas. Visando um maior conhecimento na área o objetivo deste trabalho foi buscar ferramentas que proporcionassem uma melhoria no processo de aprendizagem.

O trabalho foi desenvolvido com auxílio do Grupo Simulador de Usina Elétrica ETC-26B – Equacional, da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete, simulando diversos casos possíveis, conforme características do SEP.

O ETC-26B (Figura 16) possui dois grupos geradores constituídos por:

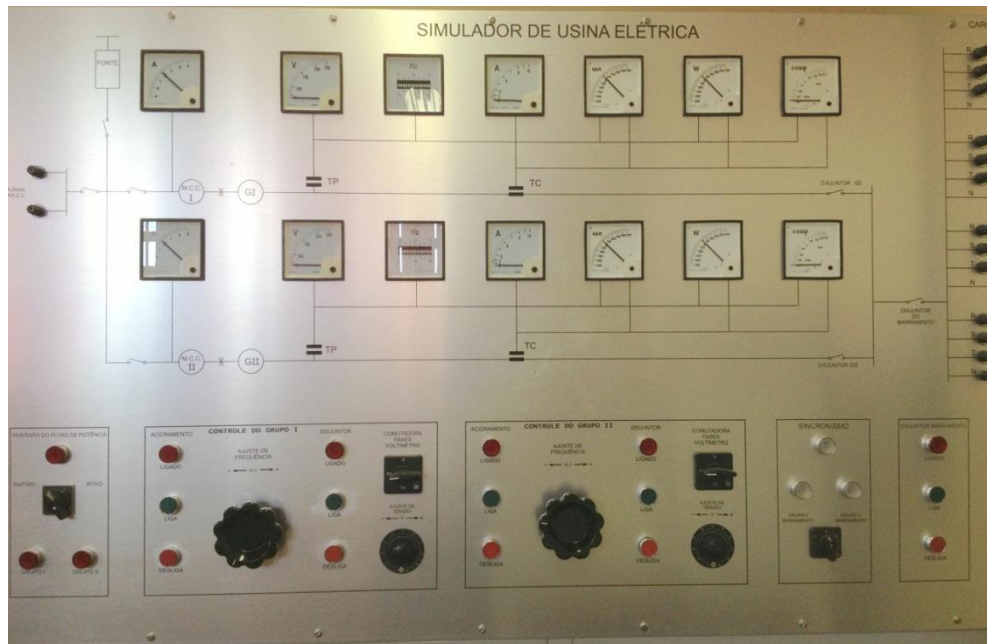
- Motor de corrente contínua, operando como máquina primária, alimentado com tensão de armadura constante e com variação de velocidade controlada pelo campo. Potência de 3 kW e velocidade de 1800 rpm;
- Alternador trifásico ligado em estrela, com neutro acessível. Potência de 2 kVA;
- Painel de medição e comando (Figura 17).

**Figura 16 - Grupo gerador: Motor CC (Máquina primária) e alternador trifásico.**



Fonte: Autor

Figura 17 - Painel de mediação e comando.



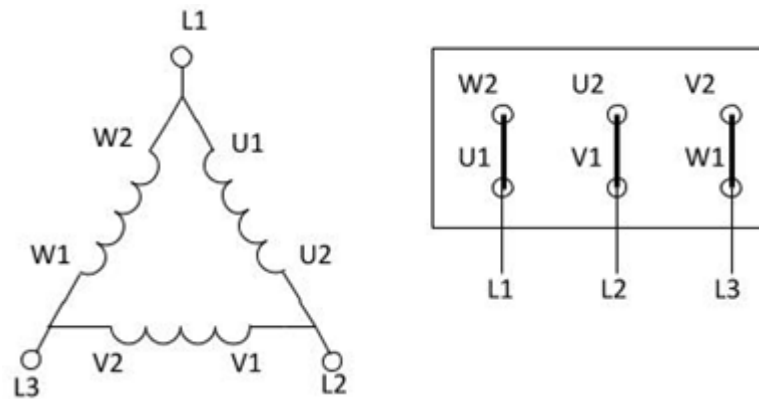
Fonte: Autor

Portanto, no ETC-26B é possível obter a geração de energia elétrica, e em seus terminais de saída é possível conectar as cargas do sistema.

Então, a fim de obter dados referentes ao funcionamento real de um sistema, foram realizadas algumas simulações práticas utilizando-se como referência (geração) este equipamento. Estas simulações estão descritas no capítulo 4

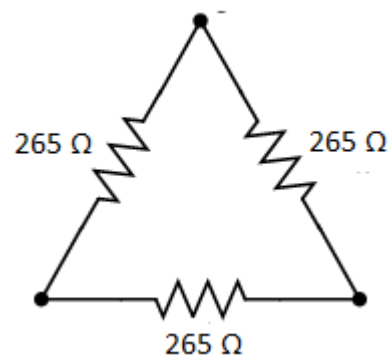
Ao se tratar de componentes que possam representar as diferentes cargas do sistema, são utilizados dois motores (carga indutiva) ligados em delta (220V), e também dois bancos de resistores ligados em delta (associação em delta paralelo ocasionando em  $265 \Omega$  por fase). A ligação dos motores e dos bancos de resistores está disposta na Figura 18 e na Figura 19, respectivamente.

**Figura 18 - Ligação dos motores.**



Fonte: Autor

**Figura 19 - Ligação do banco de resistores.**

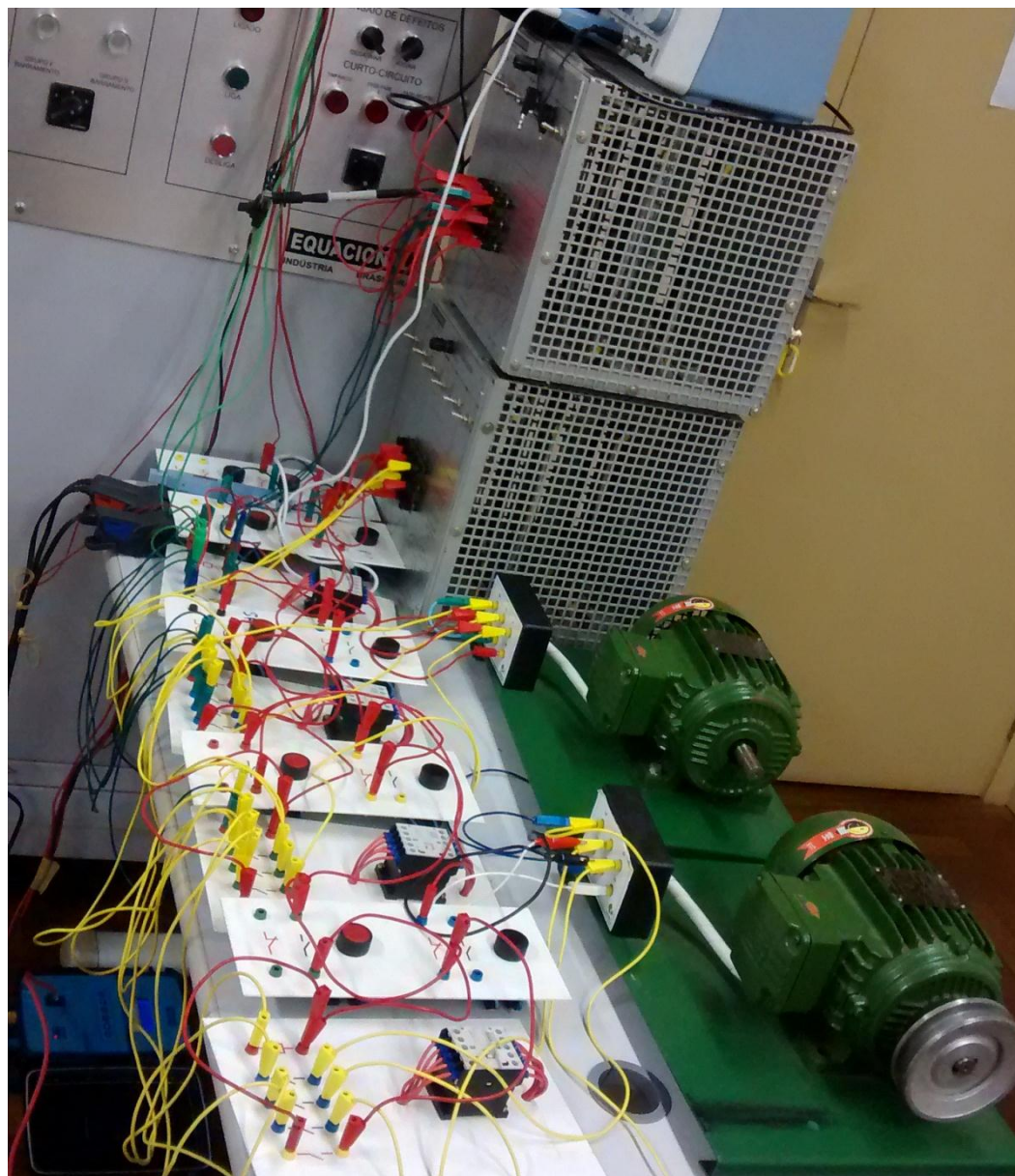


Fonte: Autor

Na Figura 20 é apresentada a ilustração dos componentes utilizados como carga e seu acionamento.



Figura 20 - Sistema de acionamento e cargas.



Fonte: Autor

Além destes equipamentos citados, são utilizados três indutores variáveis, ajustados em 25 mH, que representam uma linha de transmissão. Este ajuste realizado nos indutores se deu fundamentado na queda do nível de tensão, no indutor, gerado quando circula corrente pelo mesmo. Portanto, quanto maior o valor de ajuste, maior será a queda, consequentemente maior será a distância das cargas em relação ao sistema de geração.

Utilizando estes equipamentos, as atividades práticas realizadas foram as seguintes:

- Atividade 1 – Geração + Carga:
  - Paralelismo de alternadores;
  - Alimentação de cargas:
    - ✓ Carga Resistiva
    - ✓ Carga Indutiva
  - Variação de carga.
  
- Atividade 2 – Geração + Carga + Controle de tensão e frequência:
  - Paralelismo de alternadores;
  - Alimentação de cargas:
    - ✓ Carga Resistiva
    - ✓ Carga Indutiva
  - Variação de carga;
  - Variação dos reguladores de tensão e frequência.
  
- Atividade 3 – Geração + Rede de transmissão + Carga:
  - Paralelismo de alternadores;
  - Alimentação da rede de transmissão;
  - Alimentação de cargas conectadas a rede:
    - ✓ Carga Resistiva
    - ✓ Carga Indutiva
  - Variação de carga.
  
- Atividade 4 – Geração + Rede de transmissão + Carga + Controle de tensão e frequência:
  - Paralelismo de alternadores;
  - Alimentação da rede de transmissão;
  - Alimentação de cargas conectadas a rede:
    - ✓ Carga Resistiva
    - ✓ Carga Indutiva
  - Variação de carga;
  - Variação dos reguladores de tensão e frequência.

- Atividade 5 – Geração + Barramento infinito + Carga + Controle de tensão e frequência:
  - Paralelismo de alternadores;
  - Paralelismo com a rede;
  - Alimentação de cargas:
    - ✓ Carga Resistiva
    - ✓ Carga Indutiva
  - Variação de carga;
  - Variação dos reguladores de tensão e frequência.

Para fazer a leitura dos dados nas quatro primeiras atividades é utilizado o analisador de energias RE-400 da empresa Embrasul. Na Atividade 5 é utilizado um número maior de equipamentos de leitura. Neste caso são utilizados dois analisadores PowerNET PQ-600 da empresa IMS e um RE-400 da Embrasul. A função destes equipamentos é fazer aquisição dos dados referentes à operação do sistema conectado.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Atividade 1 – Sistema Isolado: Geração + Carga

#### 4.1.1. Objetivo

O objetivo desta prática é analisar as consequências da variação de carga em um determinado sistema operando de forma isolada.

#### 4.1.2. Contextualização

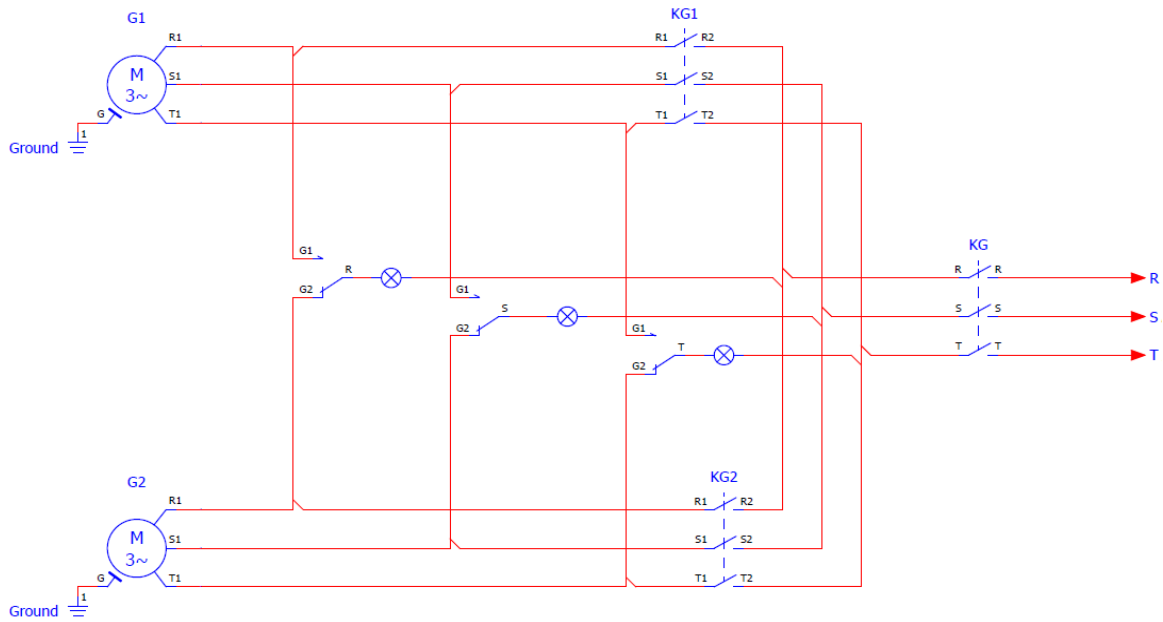
O sistema utilizado nesta primeira atividade pode ser considerado um caso de geração distribuída. Nesta situação, o sistema em questão tem sua operação ocorrendo de forma isolada de outros sistemas. O fato de a carga estar disposta junto ao sistema de geração dispensa a utilização dos indutores entre o sistema de geração e a carga, que seria a representação da existência de LT's.

#### 4.1.3. Paralelismo de Alternadores

Conforme apresentado, as atividades realizadas apresentam características semelhantes. Além dos equipamentos utilizados, e seus parâmetros, serem os mesmos, os dois grupos geradores do ETC-26B são colocados a operar de forma paralela para os experimentos.

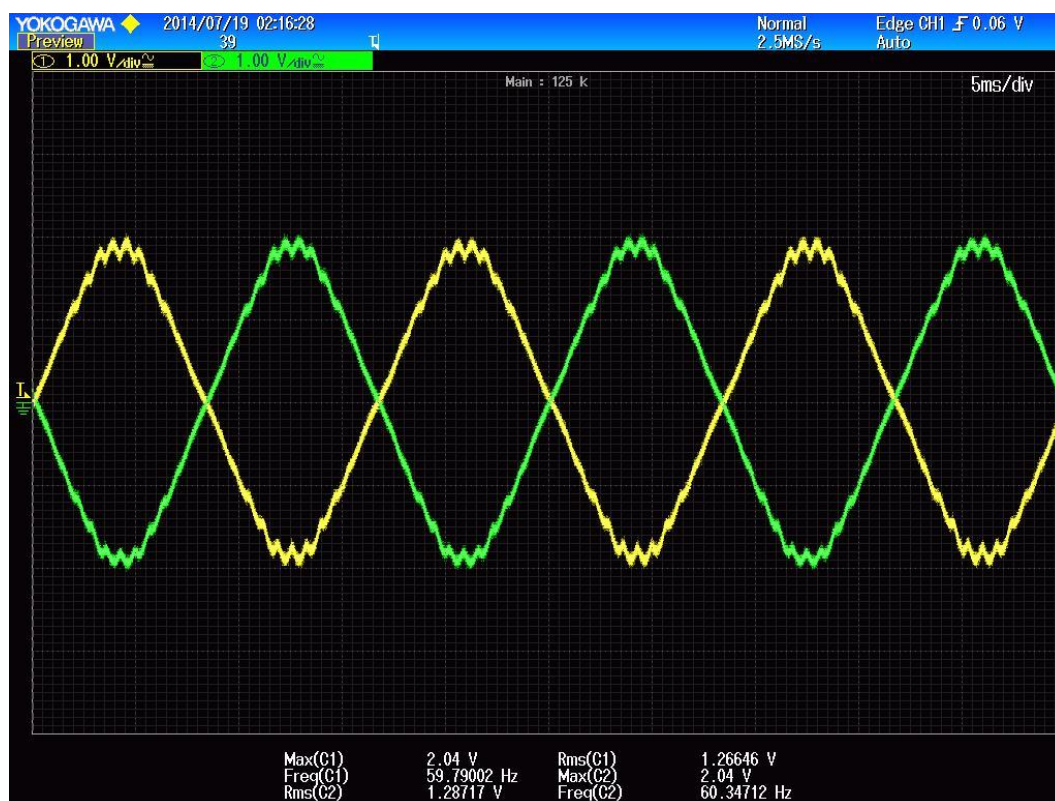
Para acionar os geradores em paralelo, é utilizado o sincronoscópio disposto no painel. O diagrama elétrico deste acionamento é apresentado na Figura 21.

**Figura 21 - Acionamento em paralelo dos alternadores.**



Fonte: Eplan Electric

Com a utilização de um osciloscópio (Yokogawa), são apresentados a seguir momentos distintos do nível de tensão fornecido pelos geradores (Figura 22, Figura 24 e Figura 26). O levantamento é feito com a obtenção do sinal da fase A de cada gerador.

**Figura 22 - Fase A (G1) e Fase A (G2) defasados 180 graus.**

Fonte: Yokogawa

Conforme apresentado na imagem, é possível perceber que há defasagem entre a fase A de cada gerador. Neste momento não é conveniente colocar estes a operarem em paralelo. Os harmônicos presentes na forma de onda da tensão gerada se devem ao equipamento de medição utilizado. Pelo método das lâmpadas apagadas, neste momento as lâmpadas do sincronoscópio estariam acesas, conforme Figura 23.

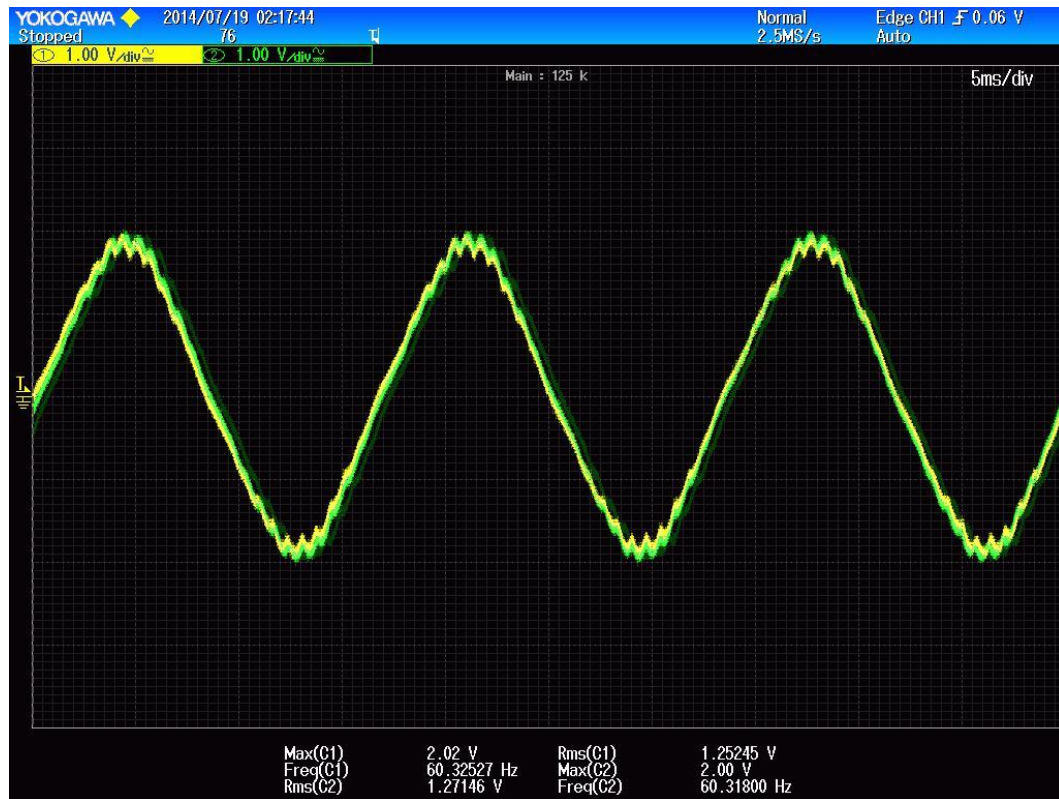
**Figura 23 - Lâmpadas acesas pela defasagem entre as fases.**



Fonte: Autor

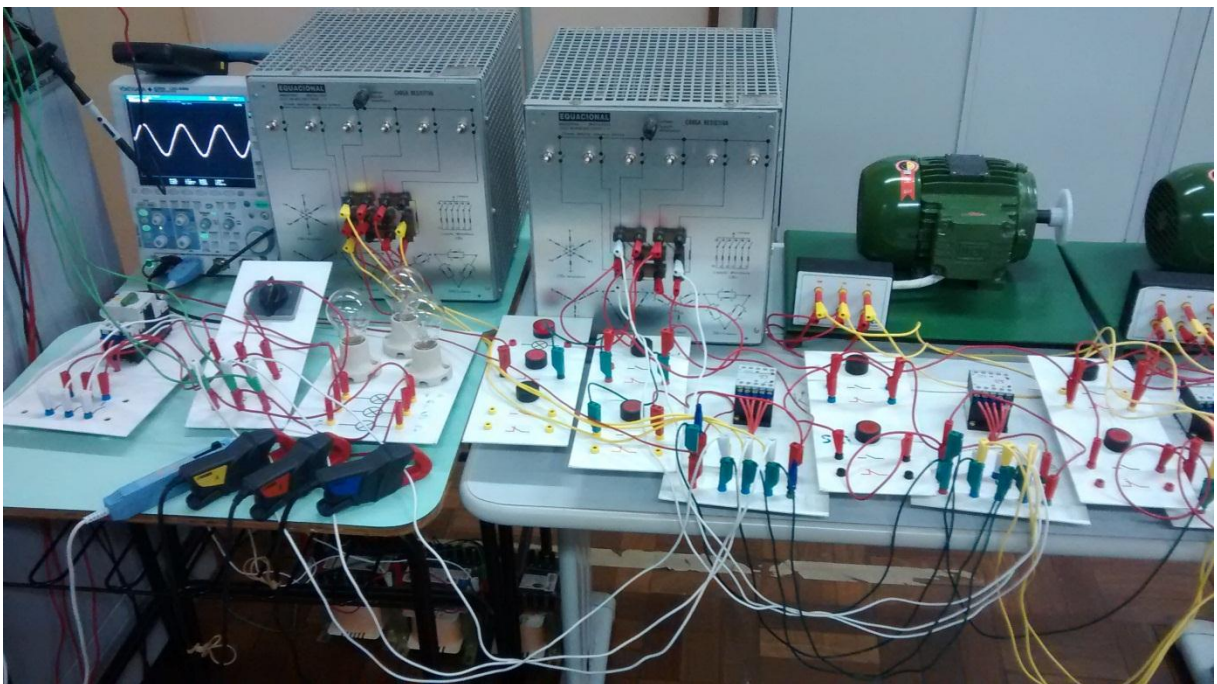
Na Figura 24 é apresentado o momento mais propício a se colocar os geradores a operarem em paralelo. Neste caso, além da análise da imagem obtida na observação das fases A de cada gerador, no sincronoscópio também é possível observar a indicação do momento exato para essa ligação. O momento em que todas as lâmpadas se apagam conforme apresentado na Figura 25.

**Figura 24 - Fase A (G1) e Fase A (G2) no momento que os geradores são colocados a operar de forma paralela.**



Fonte: Yokogawa

**Figura 25 - Lâmpadas apagadas no sincronoscópio.**

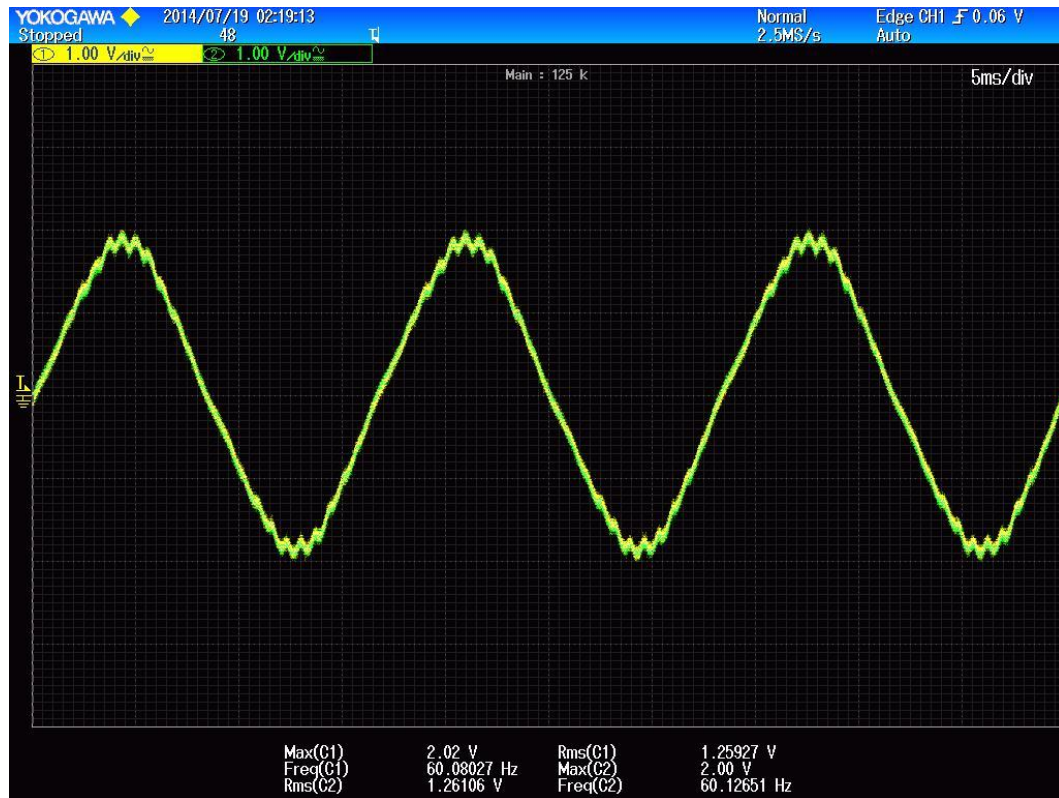


Fonte: Autor



A partir deste momento, a tensão obtida nos terminais dos grupos geradores é apresentada na Figura 26.

**Figura 26 - Fase A (G1) e Fase A (G2) com os geradores operando em paralelo.**

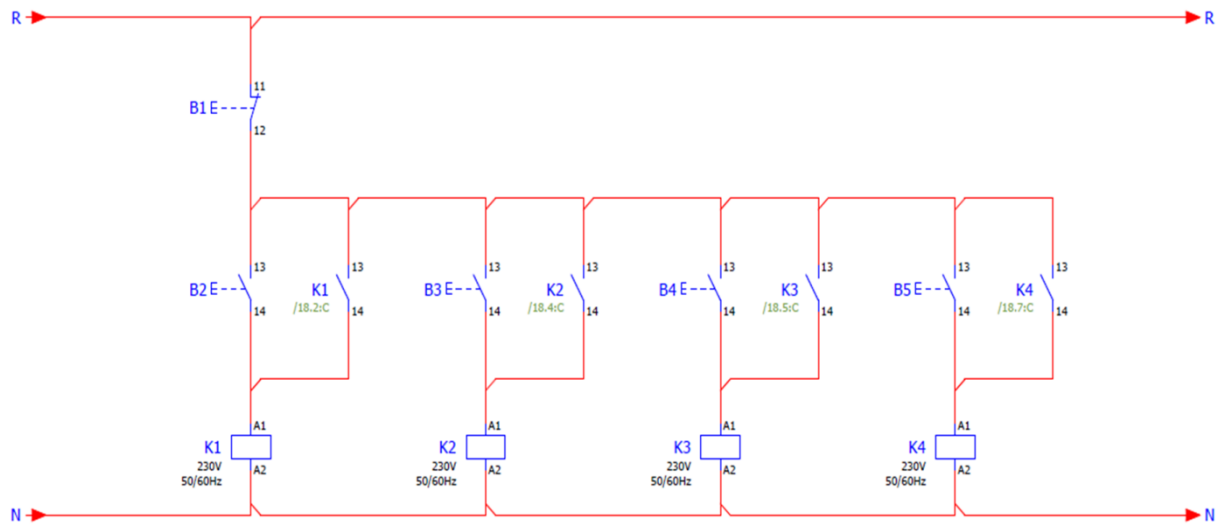


Fonte: Yokogawa

#### 4.1.4. Alimentação de cargas

As cargas por sua vez, para serem acionadas possuem um circuito de comando que é apresentado na Figura 27. O tipo de acionamento utilizado é o método de partida direta: método simples que é utilizado no acionamento de motores elétricos. O acionamento destas acontece de forma aleatória no decorrer das atividades.

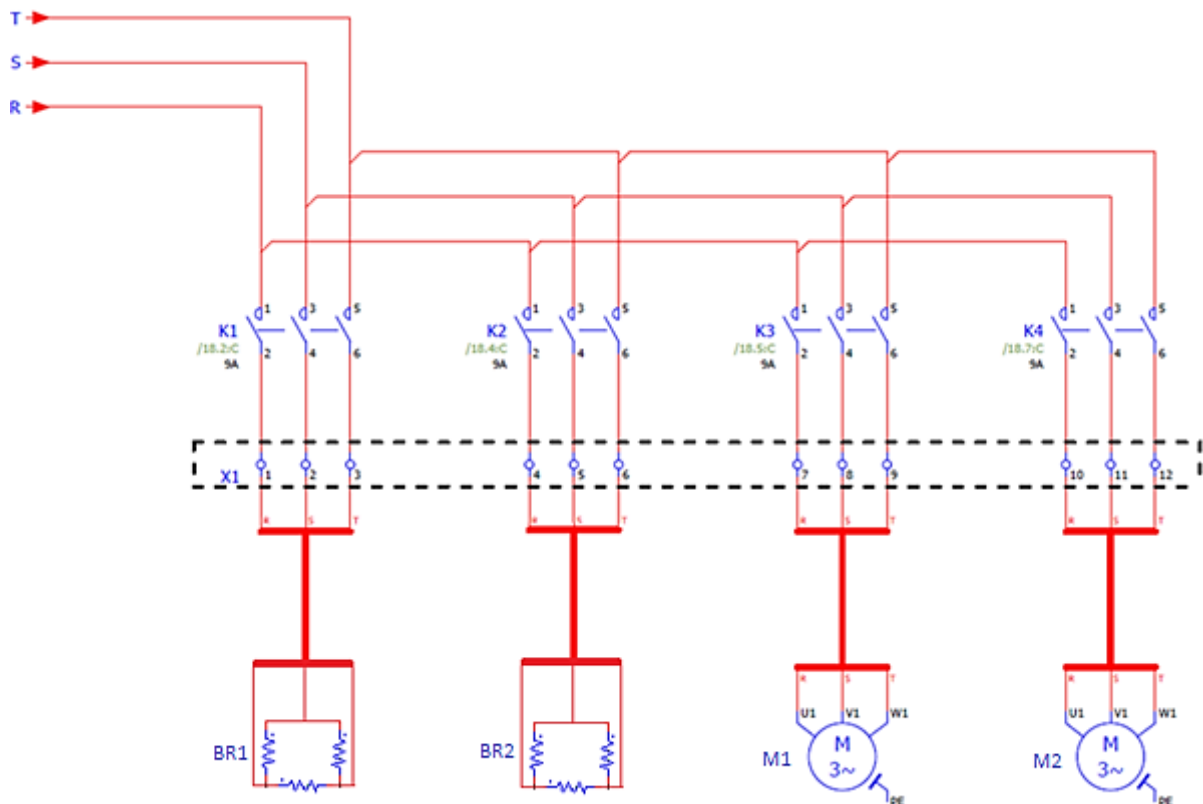
**Figura 27 - Circuito de comando de acionamento das cargas.**



Fonte: Eplan Electric

O circuito de alimentação da carga é apresentado na Figura 28.

**Figura 28 - Circuito de alimentação das cargas.**

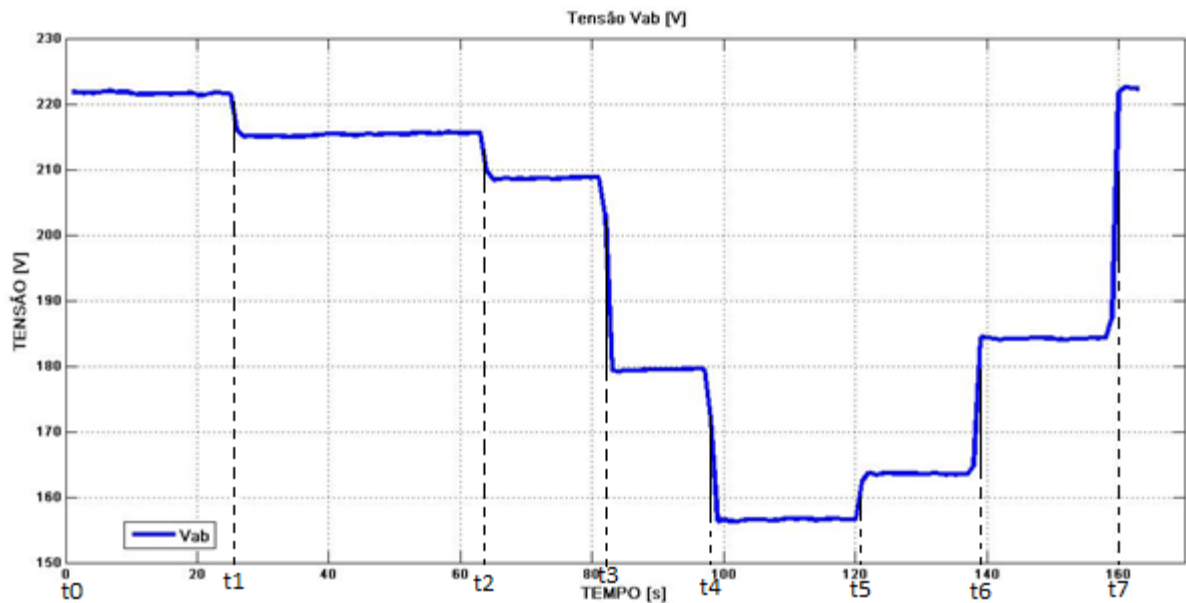


Fonte: Eplan Electric

Após o acionamento dos alternadores em paralelo é feita a alimentação do restante do sistema, neste caso as cargas.

Conforme mencionado anteriormente, as cargas são acionadas de forma aleatória. O levantamento dos dados é feito nos terminais do grupo gerador. Na Figura 29 é apresentado o nível de tensão entre as fases A e B para esta atividade.

**Figura 29 - Variação do nível de tensão Vab na Atividade 1.**



Fonte: MATLAB

Entre  $t_0$  e  $t_1$  o nível de tensão encontra-se perto de 220 V. Ou seja, o sistema está operando em vazio, sem carga em seus terminais. Esta situação não se altera até o momento em que é acionada a primeira carga, passando o sistema a alimentar um dos bancos de resistores (BR1).

Com esta carga em seus terminais, entre  $t_1$  e  $t_2$  o nível de tensão fica em torno de 215 V. Transcorrido determinado período, em  $t_2$  ocorre outra entrada de carga, o segundo banco de resistores (BR2). Devido a características dos bancos de resistores serem semelhantes, a queda no nível de tensão ocorre da mesma forma (módulo aproximadamente igual) que no intervalo anterior, ficando, agora, perto dos 210 V. A próxima queda de tensão possui um nível mais elevado.

Em  $t_3$  é acionado um dos motores (M1), que possui característica indutiva, com FP em atraso. Entre  $t_3$  e  $t_4$  o sistema está alimentando em seus terminais dois bancos de resistores e um dos motores (BR1 + BR2 + M1). Neste momento o sistema opera com tensão em torno de 180 V.

Em  $t_4$  é acionada a última carga ainda restante (segundo motor – M2), deixando o sistema carregado ao máximo (BR1 + BR2 + M1 + M2). A partir deste

momento o sistema passa a operar com tensão abaixo dos 160 V em seus terminais. Com a tensão neste patamar, entre  $t_4$  e  $t_5$  os motores operam com rotação abaixo da nominal. Isso ocorre devido à incapacidade da geração em suprir a alimentação necessária para que estes operem normalmente. Depois de operar em seu carregamento máximo, o sistema é aliviado gradativamente com a desconexão de suas cargas.

Primeiramente é retirado um banco de resistores, em  $t_5$ . Elevando o nível de tensão para 165 V, aproximadamente. Em  $t_6$  é feita a desconexão de um dos motores, com o sistema passando a operar com tensão perto de 185 V. No momento  $t_7$ , é feita a desconexão das cargas ainda conectadas à geração, fazendo com que o sistema passe a operar em seu estado original, sem qualquer carregamento. A partir deste momento, apesar da amostragem ser pequena, a tensão volta ao nível inicial de 220 V, aproximadamente.

Para um melhor entendimento futuro, na Tabela 2 é apresentado qual tipo de carga está acionada para cada intervalo.

**Tabela 2 - Carga conectada ao sistema na Atividade 1.**

Intervalo	Carga
$t_0 - t_1$	VAZIO
$t_1 - t_2$	BR1
$t_2 - t_3$	BR1 + BR2
$t_3 - t_4$	BR1 + BR2 + M1
$t_4 - t_5$	BR1 + BR2 + M1 + M2
$t_5 - t_6$	BR1 + M1 + M2
$t_6 - t_7$	BR1 + M1
$t_7 - \dots$	VAZIO

Fonte: Autor

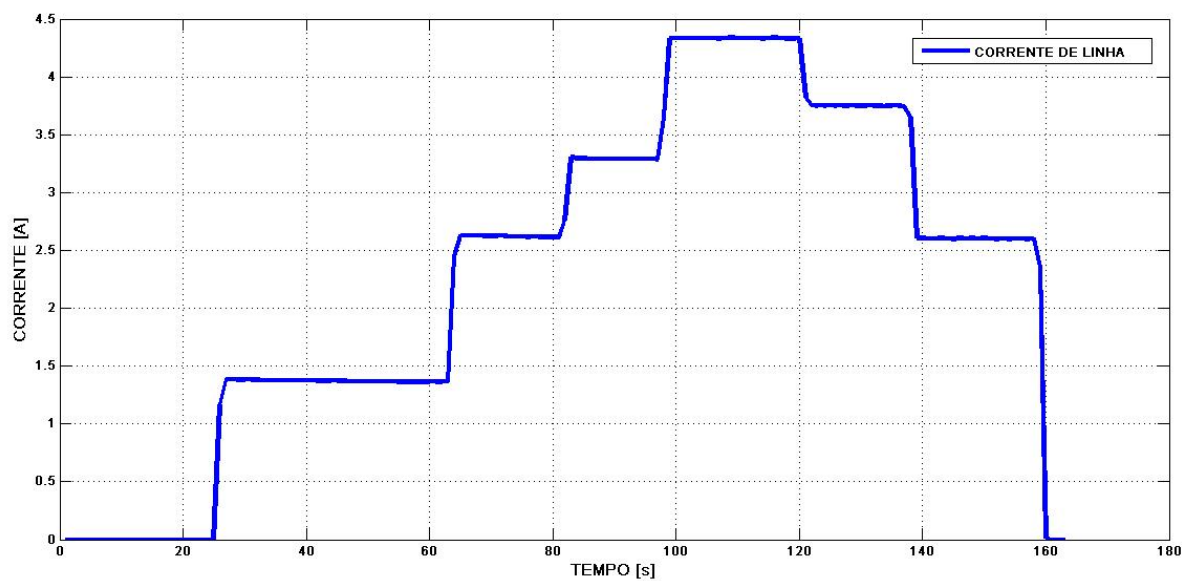
Diante do que fora citado, na Tabela 3 é apresentado os demais dados obtidos nesta atividade (média por intervalo). E assim, os mesmos são representados graficamente conforme o acontecido no decorrer de toda simulação. Na Figura 30 é apresentado a variação do nível de corrente. Na Figura 31, Figura 32 e Figura 33, são apresentados a variação da potência ativa, reativa e aparente, respectivamente.

Tabela 3 - Dados obtidos na Atividade 1.

Intervalo	$V_L$ [V]	$I_L$ [A]	$P_{3\phi}$ [W]	$Q_{3\phi}$ [Var]	$S_{3\phi}$ [VA]	FP	f [Hz]
t0 – t1	221,72	0	0	0	0	1	60,39
t1 – t2	215,35	1,36	327,53	-6,526	327,59	-0,999	59,62
t2 – t3	208,40	2,62	612,83	-12,89	612,96	-0,999	58,97
t3 – t4	178,96	3,31	639,62	-218,16	678,76	-0,938	59,29
t4 – t5	156,55	4,33	771,12	-271,14	774,39	-0,996	59,49
t5 – t6	163,56	3,74	652,88	-254,12	700,76	-0,93	60,35
t6 – t7	184,33	2,59	546,15	-25,36	547,74	-0,98	59,85
t7 - ...	222,25	0,003	0,76	0,18	0,79	1	60,54

Fonte: Autor

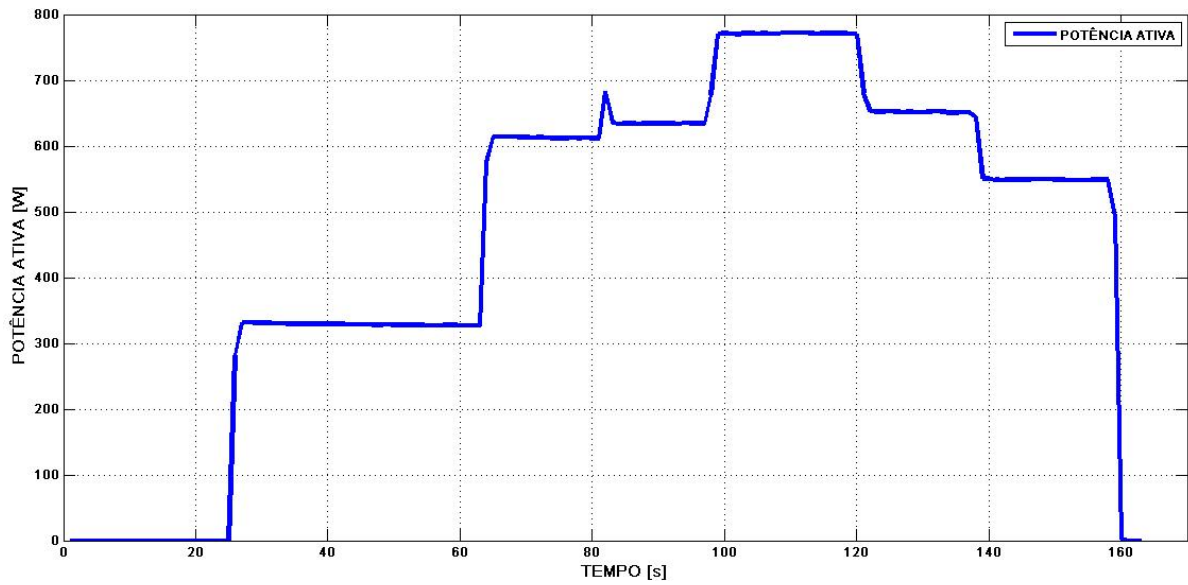
Figura 30 - Variação da corrente de linha na Atividade 1.



Fonte: MATLAB

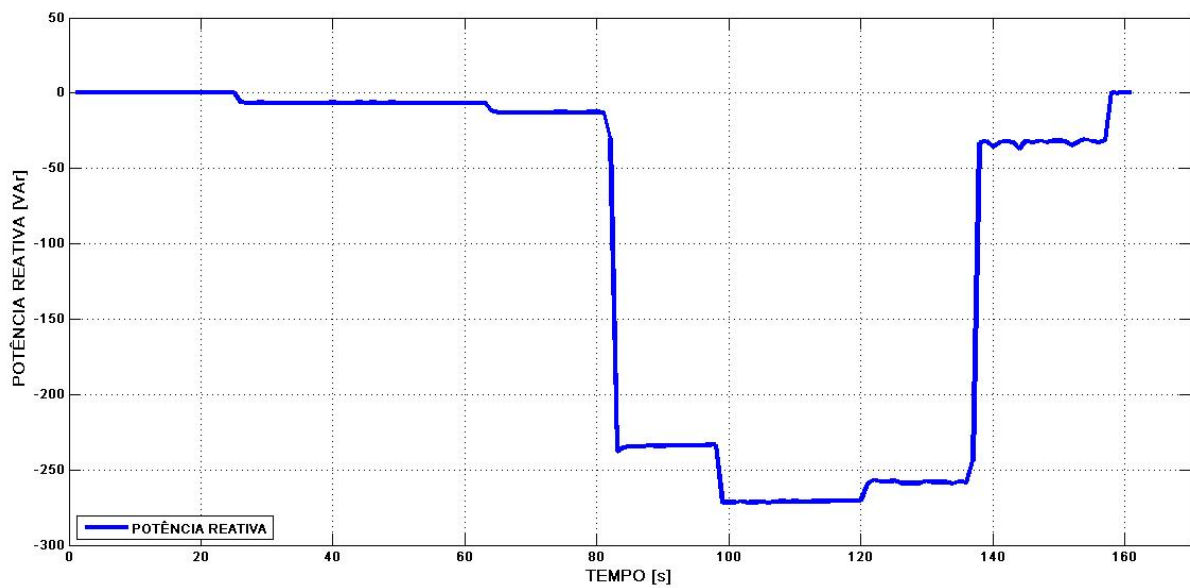
Da mesma forma que acontece com a corrente, a cada entrada de carga a potência entregue pelos geradores aumenta, de forma oposta ao nível de tensão.

Figura 31 - Variação de potência ativa na Atividade 1.



Fonte: MATLAB

Figura 32 - Variação da potência reativa na Atividade 1.



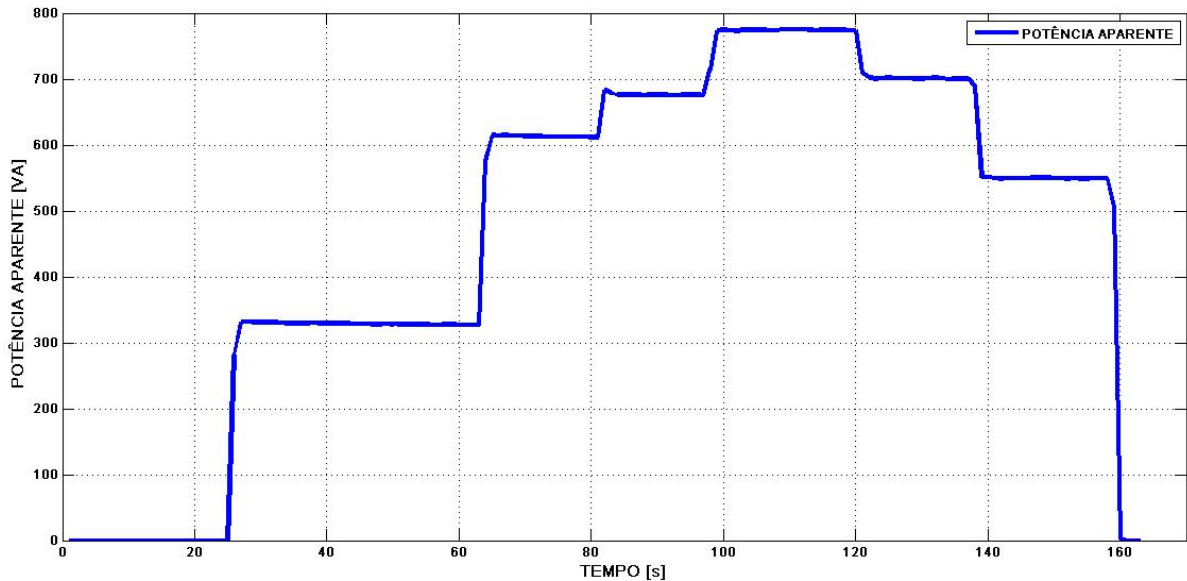
Fonte: MATLAB

A potência aparente é dada pela raiz quadrada da soma dos módulos de potência, conforme a Equação 3:

$$S_{3\phi} = \sqrt{|P_{3\phi}|^2 + |Q_{3\phi}|^2} \text{ [VA]} \quad (3)$$

Fonte: [3]

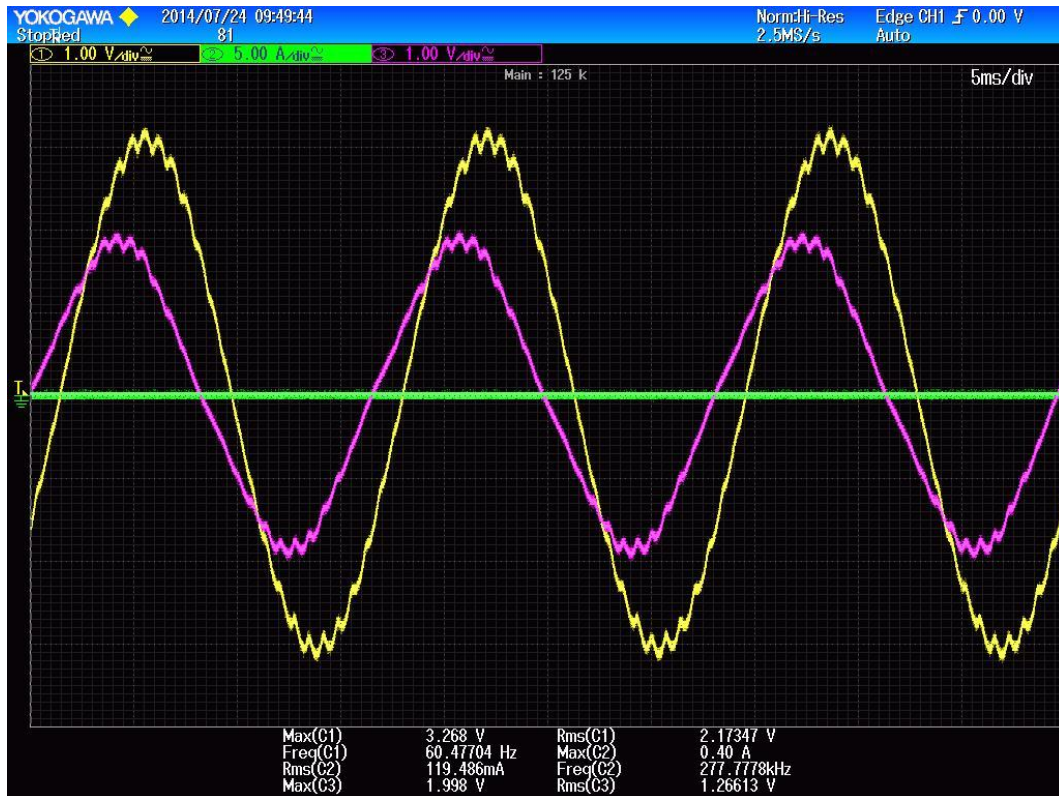
**Figura 33 - Variação da potência aparente na Atividade 1.**



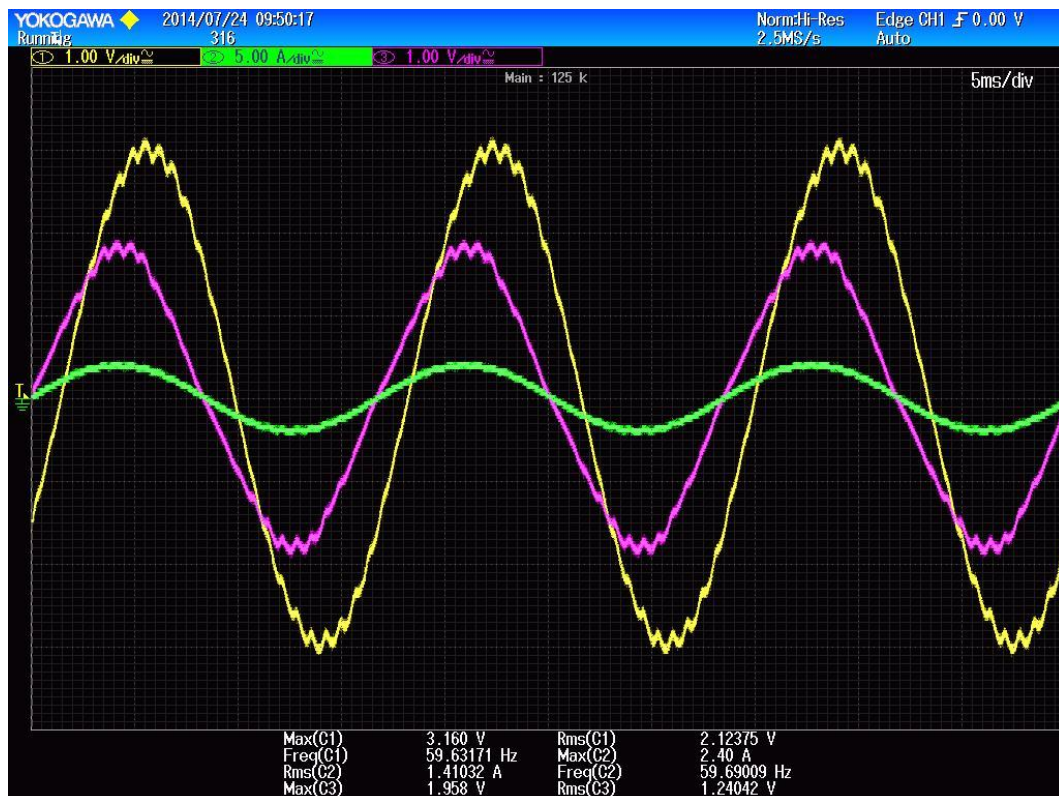
Fonte: MATLAB

Para analisar o fator de potência do sistema no decorrer da simulação foi utilizado, além dos valores obtidos pelo analisador de energia, imagens do osciloscópio. Nestas imagens é possível perceber a defasagem existente entre a tensão e a corrente no decorrer da simulação. Esta defasagem se dá devido à entrada dos motores como carga (carga indutiva). As imagens estão dispostas considerando:

- Onda amarela: Tensão de linha;
  - Onda lilás: Tensão de fase;
  - Onda verde: Corrente de linha.
- 
- Figura 34: operação no intervalo  $t_0 - t_1$
  - Figura 35: operação no intervalo  $t_1 - t_2$
  - Figura 36: operação no intervalo  $t_2 - t_3$
  - Figura 37: operação no intervalo  $t_3 - t_4$
  - Figura 38: operação no intervalo  $t_4 - t_5$
  - Figura 39: operação no intervalo  $t_5 - t_6$
  - Figura 40: operação no intervalo  $t_6 - t_7$
  - Figura 41: operação no intervalo  $t_7 - \dots$

Figura 34 - Ondas para o sistema operando no intervalo  $t_0 - t_1$ 

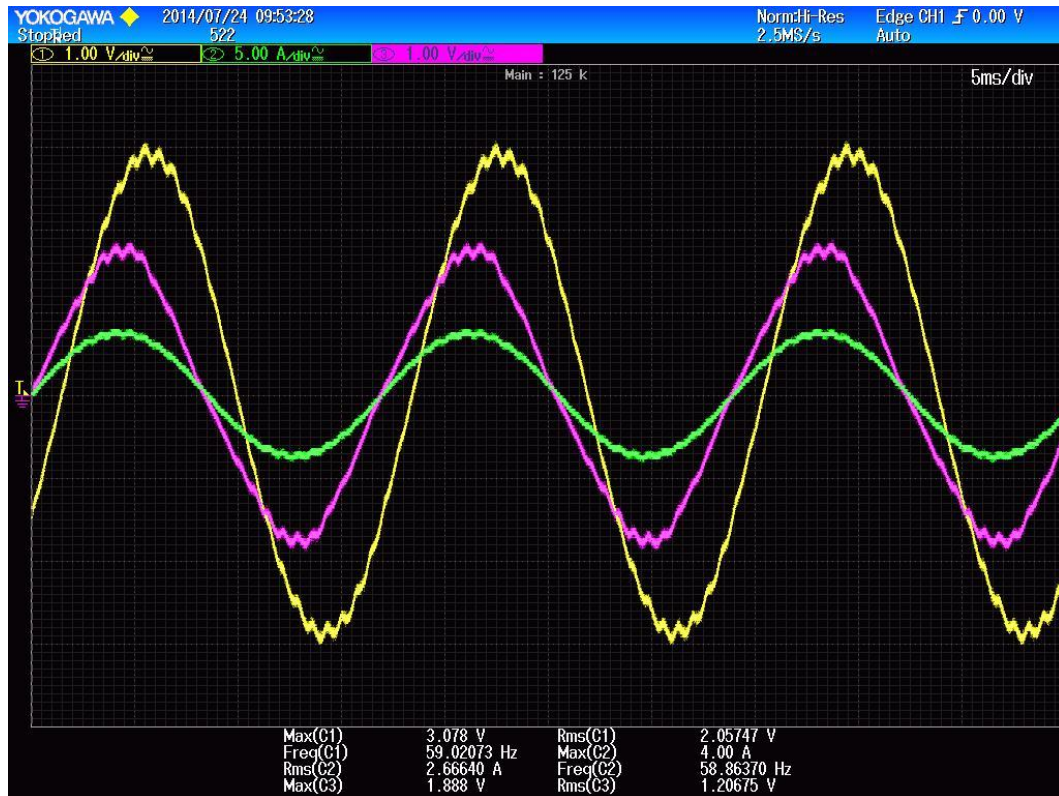
Fonte: Yokogawa

Figura 35 - Ondas para o sistema operando no intervalo  $t_1 - t_2$ 

Fonte: Yokogawa

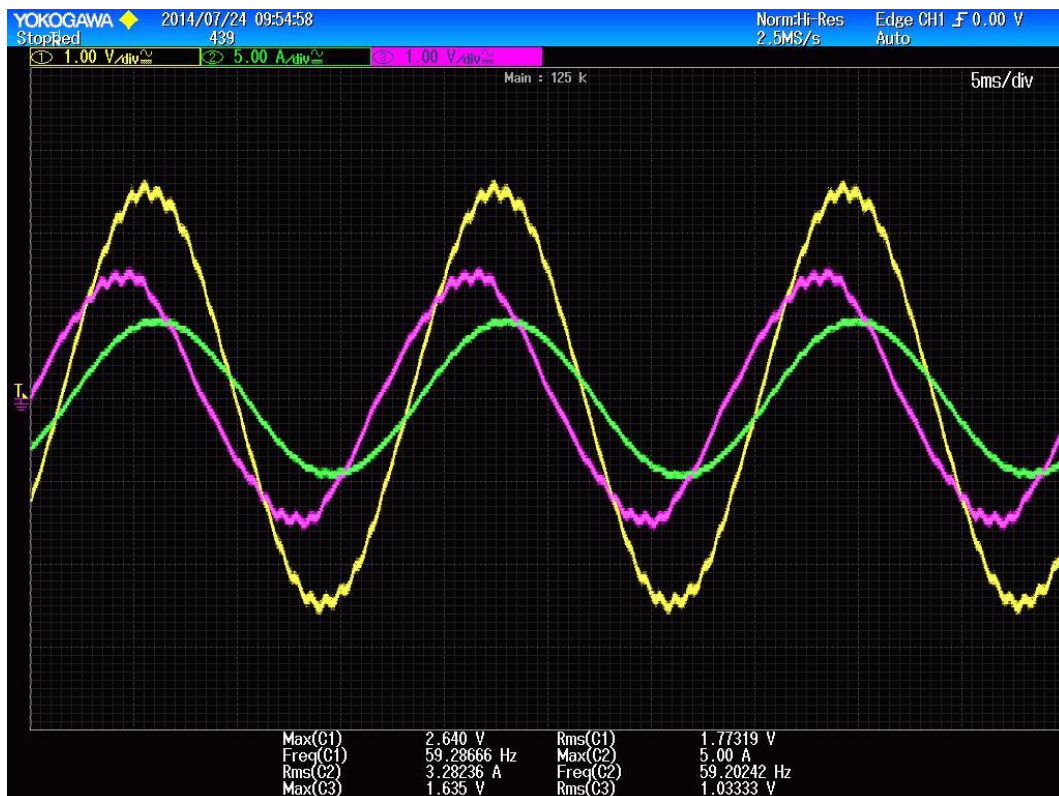


Figura 36 - Ondas para o sistema operando no intervalo t2 – t3



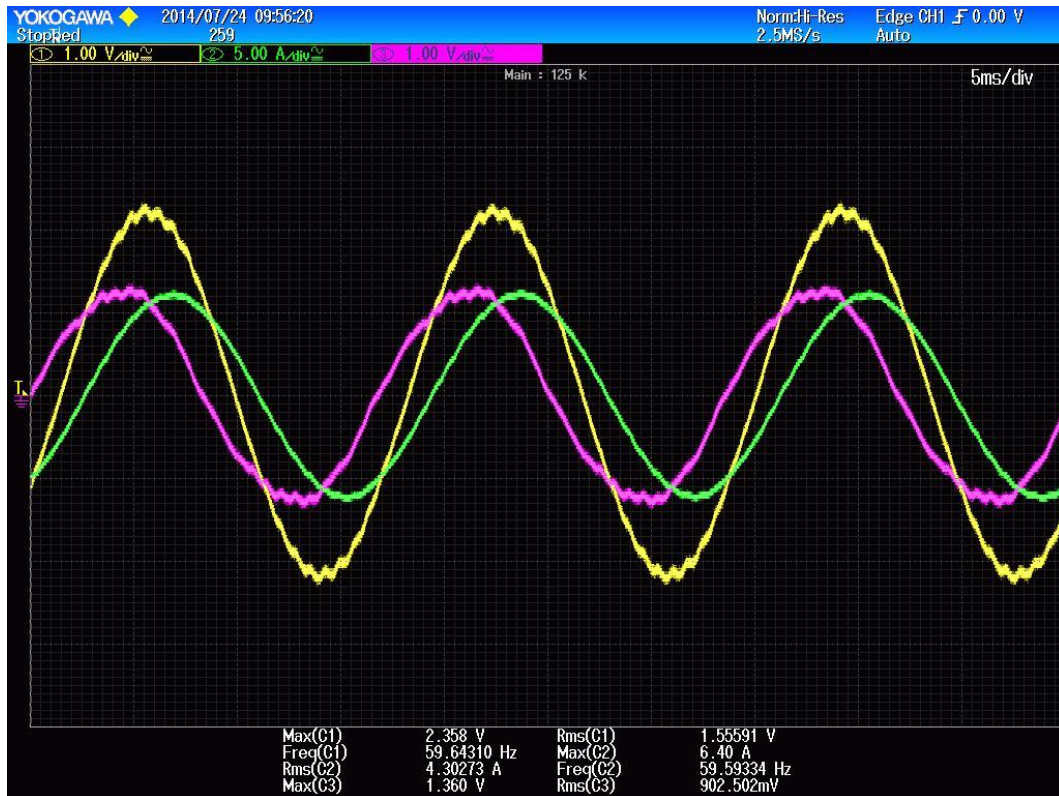
Fonte: Yokogawa

Figura 37 - Ondas para o sistema operando no intervalo t3 – t4



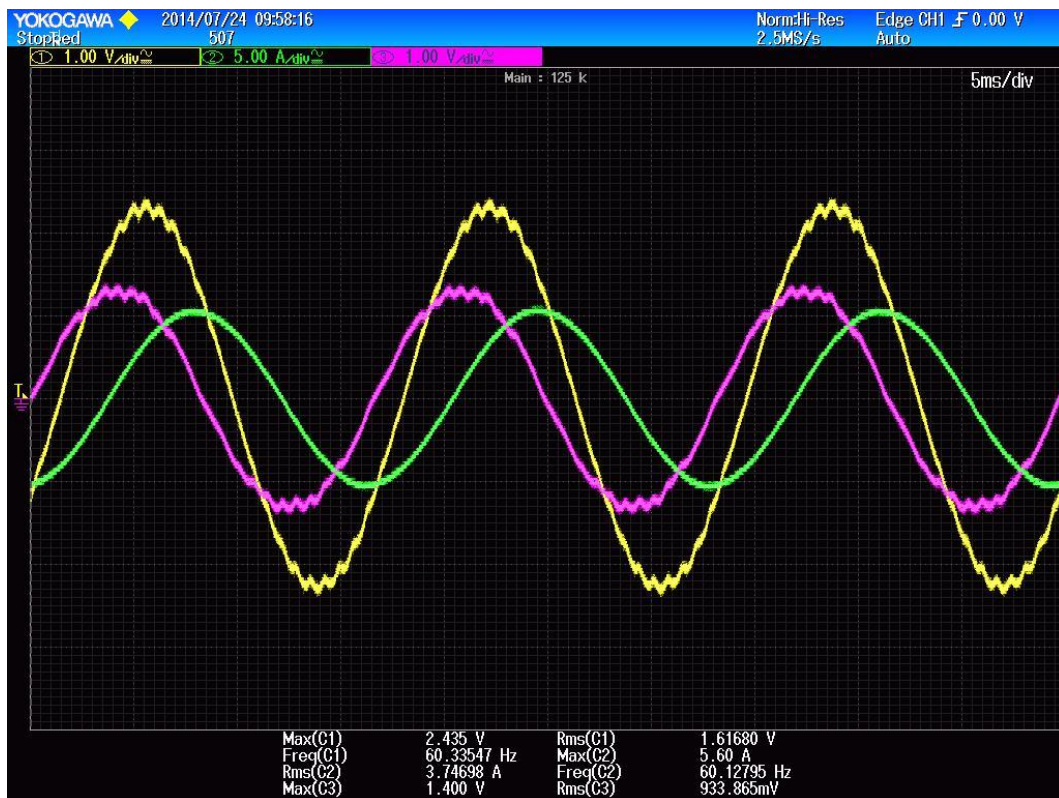
Fonte: Yokogawa

Figura 38 - Ondas para o sistema operando no intervalo t4 – t5



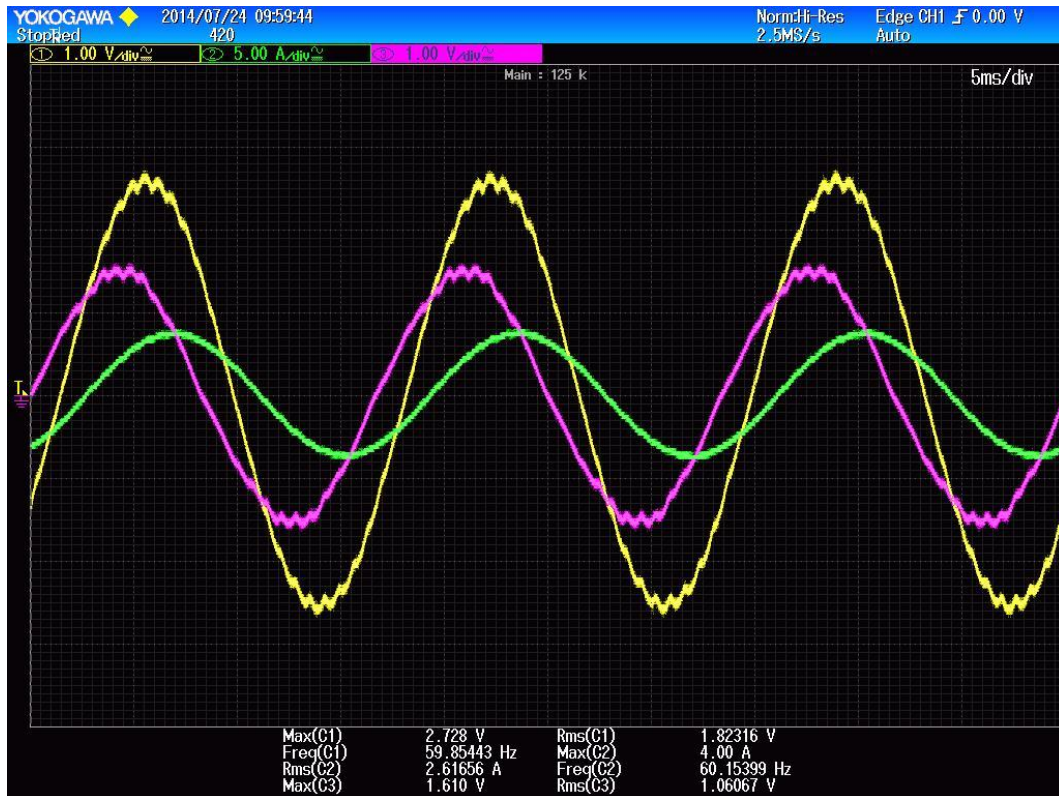
Fonte: Yokogawa

Figura 39 - Ondas para o sistema operando no intervalo t5 – t6



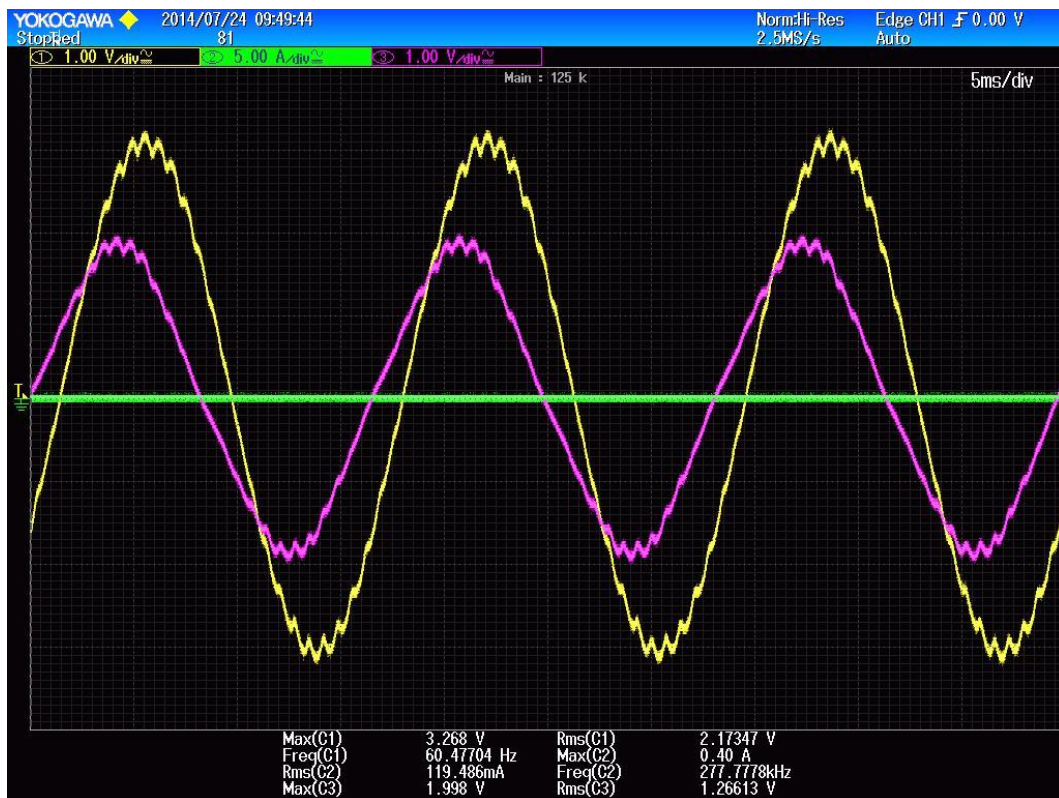
Fonte: Yokogawa

Figura 40 - Ondas para o sistema operando no intervalo t6 – t7



Fonte: Yokogawa

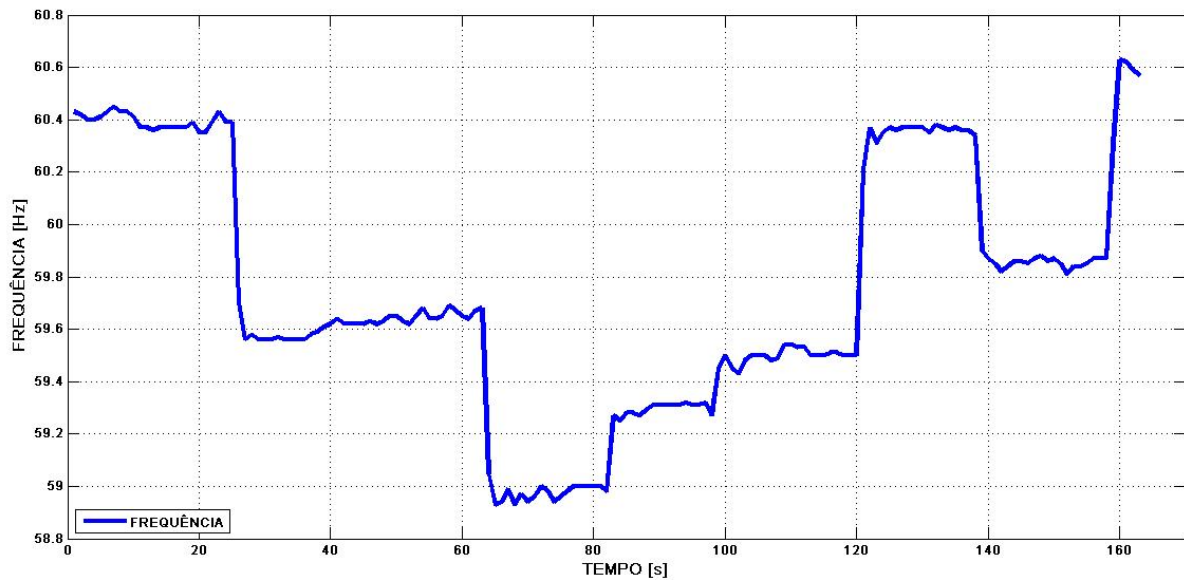
Figura 41 - Ondas para o sistema operando no intervalo t7 – ...



Fonte: Yokogawa

Durante a simulação houve variação na frequência do sistema. Esta variação está disposta na Figura 42.

**Figura 42 - Variação da frequência do sistema na Atividade 1.**



Fonte: MATLAB

## 4.2. Atividade 2 – Sistema Isolado: Geração + Carga + Controle de tensão e frequência

### 4.2.1. Objetivo

O objetivo desta prática é analisar as consequências da variação de carga em um determinado sistema operando de forma isolada variando os reguladores de tensão e de frequência.

### 4.2.2. Contextualização

O sistema utilizado nesta segunda atividade também pode ser considerado um caso de geração distribuída. Neste caso, o sistema em questão também tem sua operação ocorrendo de forma isolada a outros sistemas. O fato de a carga estar disposta junto ao sistema de geração dispensa a utilização de indutores entre o sistema de geração e a carga. Esta simulação difere do caso anterior devido à variação que ocorre nos reguladores de tensão e de frequência.

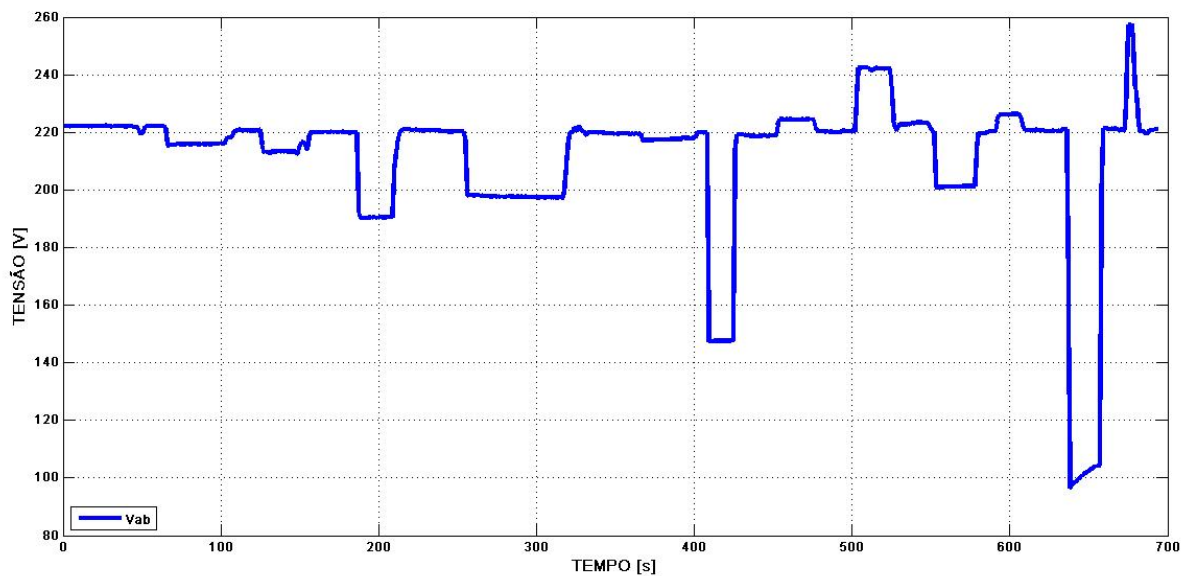
#### 4.2.3. Paralelismo de Alternadores

Ver seção 4.1.3 deste Trabalho.

#### 4.2.4. Alimentação de cargas

O processo é semelhante ao ocorrido no caso anterior. A diferenciação frente ao caso anterior é a variação nos reguladores de tensão e frequência, e pode ser vista na Figura 43 que mostra o nível de tensão entre as fases A e B.

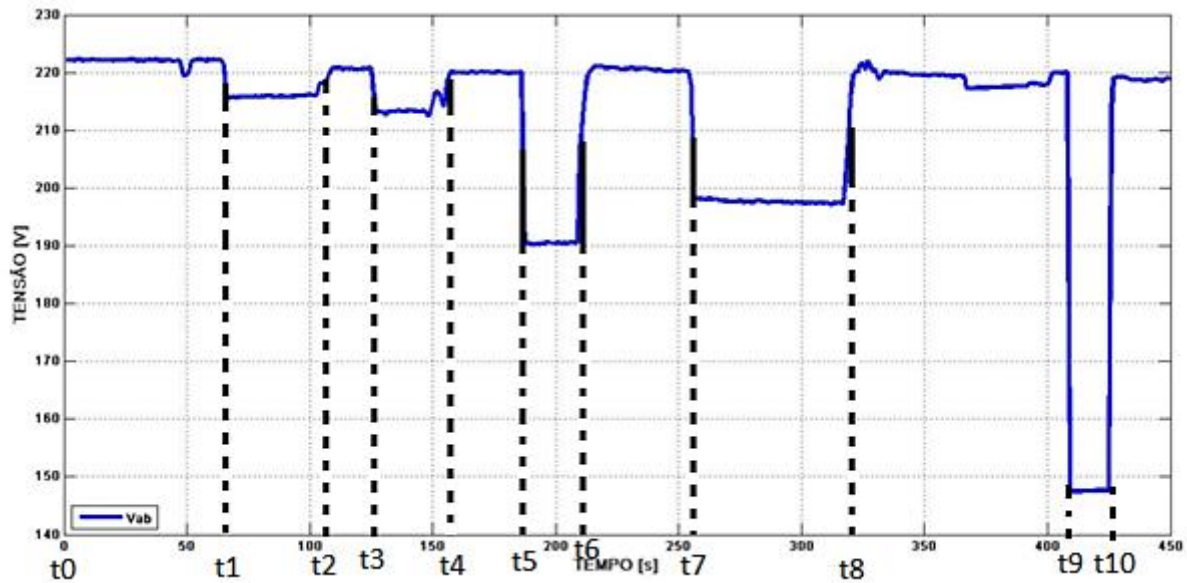
**Figura 43 - Variação do nível de tensão  $V_{ab}$  na Atividade 2.**



Fonte: MATLAB

Para uma melhor visualização é feita uma aproximação (Figura 44) na Figura 43 de forma que fique visível apenas o momento de acionamento das cargas: entre  $t_0$  e  $t_{10}$ .

Figura 44 - Intervalo t0 - t10 na variação de tensão na Atividade 2 – Aproximação na Figura 43.



Fonte: MATLAB

Entre  $t_0$  e  $t_1$  o nível de tensão encontra-se perto de 220 V. Ou seja, o sistema está operando em vazio, sem carga em seus terminais. Esta situação não se altera até o momento em que é acionada a primeira carga, passando o sistema a alimentar BR1. Com esta carga em seus terminais, entre  $t_1$  e  $t_2$  o nível de tensão fica em torno de 216 V. Transcorrido determinado período, em  $t_2$  é feita a recuperação no nível de tensão, elevando-o para o valor original de 220 V. Esta regulação é feita com o aumento da alimentação do campo da máquina síncrona, que opera como gerador. A frequência de operação neste momento está em situação normal, funcionando em 60 Hz.

Em  $t_3$  ocorre à entrada da carga BR2, fazendo com que o nível de tensão fique perto dos 213 V. Da mesma forma, em  $t_4$  é feita uma nova regulação do nível de tensão, sempre procurando manter o nível de tensão em 220 V. A próxima queda de tensão ocorre em  $t_5$  e possui um nível mais elevado por se tratar M1. Entre  $t_5$  e  $t_6$  o sistema está alimentando em seus terminais BR1 + BR2 + M1. Neste intervalo o sistema opera com tensão em torno de 190 V.

Em  $t_6$  a alimentação do campo é ajustada de forma que nos terminais do grupo de geração o nível de tensão gire em torno de 220 V. A tensão se mantém praticamente constante até  $t_7$ . Não houve alteração significativa na frequência do sistema. Esta se mantém em torno de 60 Hz.

Em  $t_7$  é acionada a carga M2, deixando o sistema carregado ao máximo. Com o acionamento de M2 o sistema passa a operar com tensão de 197 V. O sistema opera nesta condição até o momento  $t_8$ , onde ocorre uma nova regulação no nível de tensão. Entre  $t_8$  e  $t_9$  o sistema opera completamente carregado e com tensão em torno de 220 V. Nesta situação os geradores estão suprindo uma potência de 1,8 kVA. A corrente requerida pela carga é de 7,18 A.

Como os motores giram sem carga em seu eixo, no instante  $t_9$  é feito o bloqueio do eixo de M1. Neste momento há uma queda brusca no nível de tensão com esta chegando a 147 V. Neste momento a corrente se eleva para 10,7 A, de forma a manter constante a potência entregue às cargas. Este bloqueio no eixo de M1 afeta também a frequência de operação do sistema. Esta significativa alteração faz com que a frequência fique em 57,5 Hz. Esta situação se mantém até  $t_{10}$ , onde o eixo é desbloqueado e M1 volta a girar normalmente. Consequentemente a tensão e a corrente voltam aos seus valores antigos: 220 V e 7,18 A.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios referentes ao intervalo entre  $t_0$  e  $t_{10}$ .

**Tabela 4 - Dados obtidos na Atividade 2 no intervalo  $t_0$ - $t_{10}$ .**

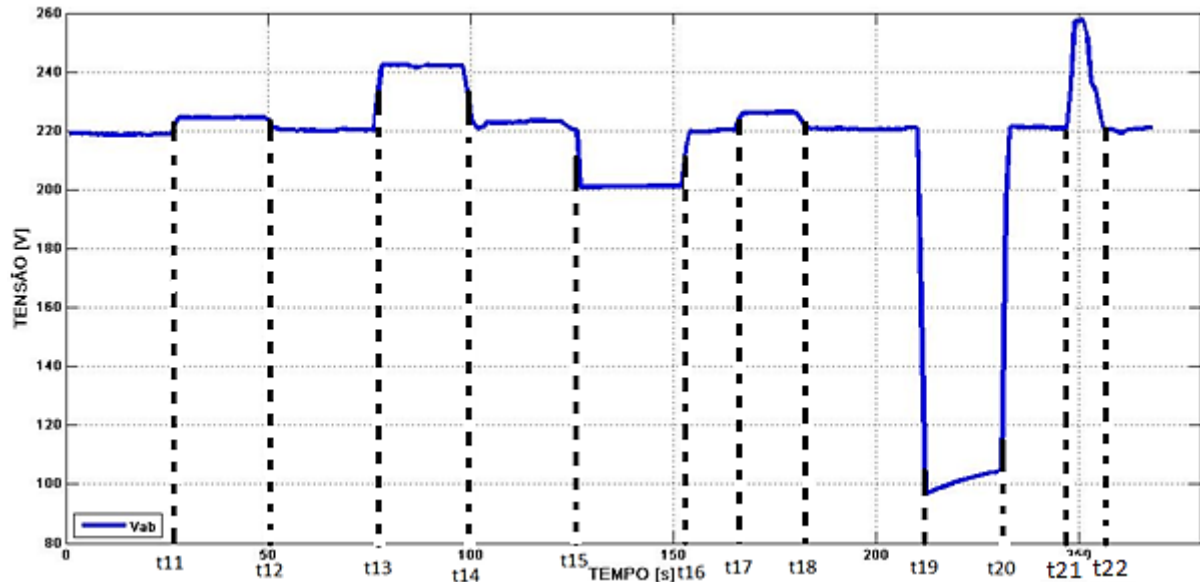
Intervalo	$V_L$ [V]	$I_L$ [A]	$P_{3\phi}$ [W]	$Q_{3\phi}$ [Var]	$S_{3\phi}$ [VA]
$t_0$ - $t_1$	221,96	0	0	0	0
$t_1$ - $t_2$	215,85	1,34	335,17	-8,74	335,28
$t_2$ - $t_3$	220,18	2,64	343,59	-8,43	343,69
$t_3$ - $t_4$	213,71	3,41	644,78	-18,32	645,05
$t_4$ - $t_5$	219,94	4,33	675,30	-29,46	678,24
$t_5$ - $t_6$	190,54	5,72	704,83	-252,19	748,602
$t_6$ - $t_7$	220,46	7,18	1063,1	-289,39	1101,78
$t_7$ - $t_8$	197,63	7,004	1299,27	-53,812	1300,39
$t_8$ - $t_9$	218,96	7,126	1930,52	-3,74	1930,56
$t_9$ - $t_{10}$	147,57	10,77	1788,65	41,83	1789,23
$t_{10}$ - ...	218,84	7,18	1751,18	-26,90	1751,50

Fonte: Autor

A partir deste momento será descrito as consequências no sistema devido à retirada de carga. Da mesma forma que na entrada de carga, para este caso

também foi feita uma aproximação na Figura 43 de modo que fiquem evidentes apenas as retiradas de carga do sistema (Figura 45).

**Figura 45 - Intervalo t11 - t22 na variação de tensão na Atividade 2 – Aproximação na Figura 43.**



Fonte: MATLAB

Com o sistema completamente carregado e operação padrão (220 V e 60Hz) em t11 é feita a retirada de BR2. De forma oposta, neste momento a tensão se eleva devido à retirada de carga do sistema chegando a 224 V. A regulação do nível de tensão agora é feita de maneira contrária (em t12): ao invés de aumentar a alimentação do campo da máquina síncrona, neste caso é feita a redução da tensão aplicada ao campo.

Em t13 acontece o desligamento de M2 elevando a tensão para 242 V, acontecendo uma nova regulação de tensão em t14. Em t15 é acionado M2 novamente, havendo uma nova regulação do nível de tensão (elevação) em t16. Em t17 é retirado do sistema a carga BR1.

Em t19 é feito o bloqueio dos eixos de M1 e M2. Esta ocasião reduz a tensão a um patamar de 100 V, aproximadamente. A corrente chega a 11 A. Ficando a frequência do sistema na casa dos 56 Hz no intervalo t19-t20. A frequência diferente de seu valor nominal (60 Hz) pode levar ao desbalanço de potência ativa. Isto é, a potência ativa fornecida pelos geradores do sistema deve ser igual à potência ativa solicitada pelas cargas. O que não ocorre neste caso.



Em t21, M1 e M2 são desativados e a tensão do sistema chega a 257 V. Ao fim da operação a tensão é regulada novamente para 220 V.

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios referentes ao intervalo entre t10 e t22.

**Tabela 5 - Dados obtidos na Atividade 2 no intervalo t10-t22**

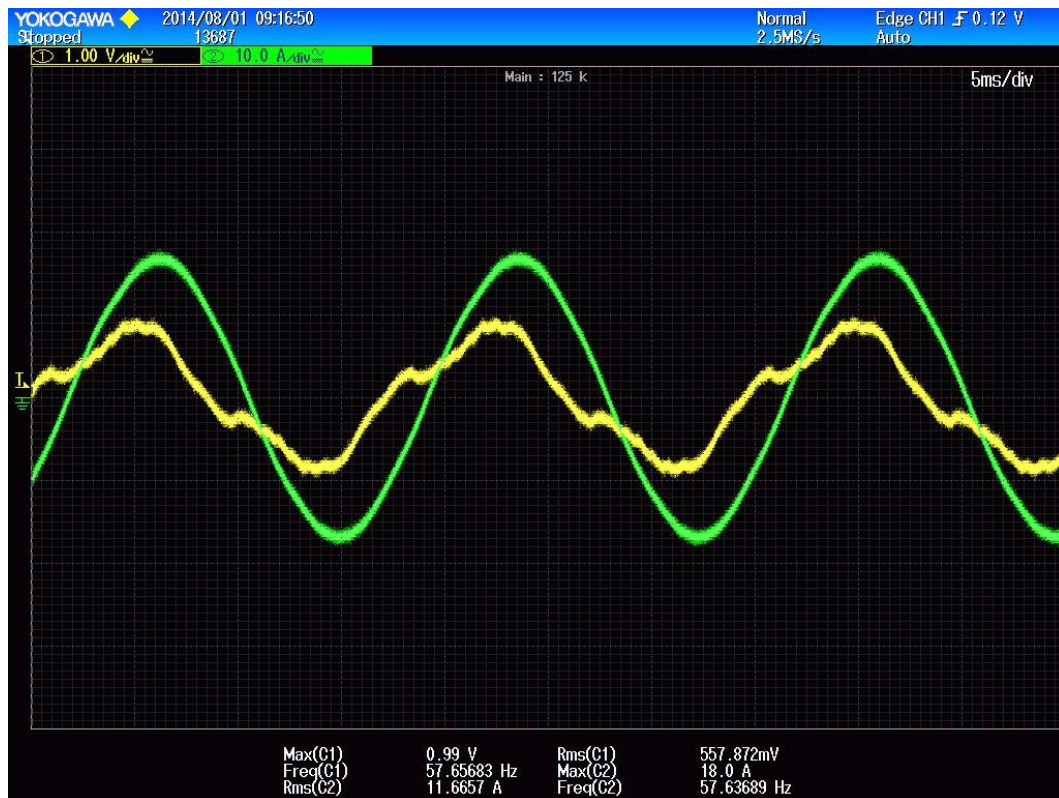
Intervalo	$V_L$ [V]	$I_L$ [A]	$P_{3\phi}$ [W]	$Q_{3\phi}$ [Var]	$S_{3\phi}$ [VA]
t10 - t11	218,84	6,96	1751,18	-26,91	1751,50
t11 - t12	224,43	6,58	1753,18	-31,08	1753,57
t12 - t13	220,27	4,54	1268,33	74,27	1270,51
t13 - t14	242,17	3,59	926,16	29,40	926,62
t14 - t15	222,52	5,10	1251,96	-68,28	1254,05
t15 - t16	201,14	6,58	1265,43	-68,28	1272,48
t16 - t17	219,98	4,54	886,57	-26,52	887,00
t17 - t18	225,34	3,59	756,16	291,50	810,41
t18 - t19	220,63	3,48	727,18	245,50	798,35
t19 - t20	101,13	11,10	1115,69	20,35	1285,53
t20 - t21	221,12	3,09	744,27	278,22	794,58
t21 - t22	257,38	0	0	0	0
t22 - ...	220,42	0	0	0	0

Fonte: Autor

Os gráficos referentes à corrente e as potências desta atividade se encontram no Anexo A.

Conforme mencionado anteriormente, no decorrer da simulação os eixos dos motores são bloqueados. A Figura 46 mostra a deformação que esta manobra causa na onda de tensão (onda amarela).

Figura 46 - Formas de onda no momento de bloqueio do eixo dos motores.



Fonte: MATLAB

### 4.3. Atividade 3 – Sistema Isolado: Geração + Rede de transmissão + Carga

#### 4.3.1. Objetivo

O objetivo desta prática é analisar as consequências da variação de carga em um determinado sistema operando de forma isolada. As cargas deste sistema se encontram afastadas do sistema de geração. Portanto, neste caso é utilizado linha de transmissão (representado por indutor) para interligação.

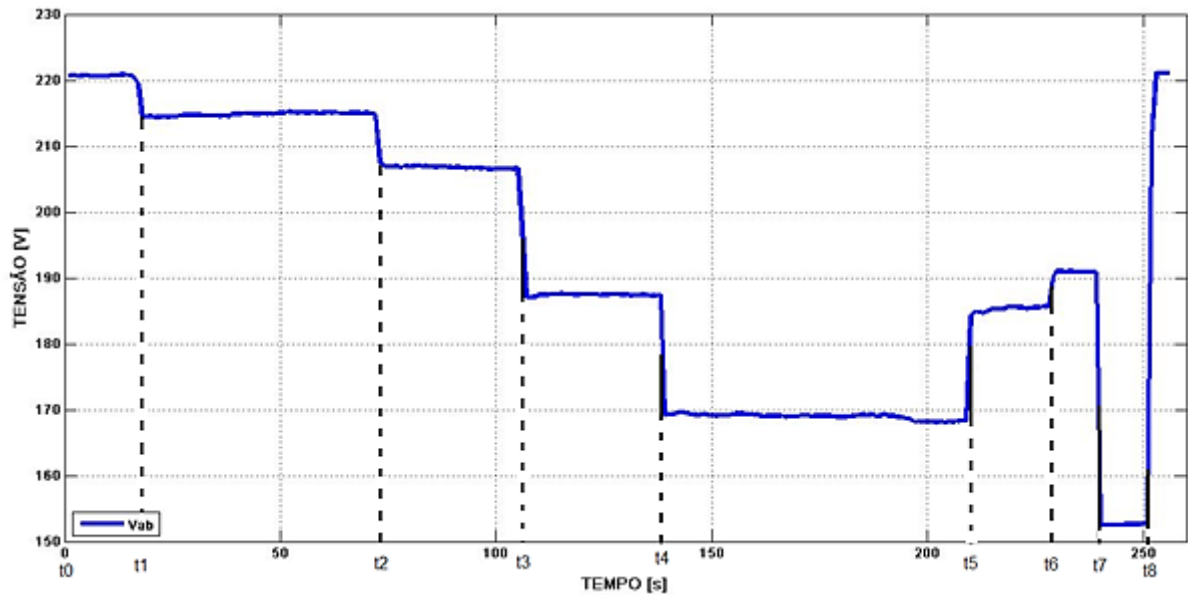
#### 4.3.2. Paralelismo de Alternadores

Ver seção 4.1.3 deste Trabalho.

#### 4.3.3. Alimentação de cargas

A alimentação das cargas é feita de forma aleatória. O levantamento dos dados é feita na saída do grupo de geração. Assim, ocorrendo à leitura afastada as cargas. Na Figura 47 é apresentado o nível de tensão  $V_{ab}$  que serve como base para análise, da mesma forma que ocorreu nas demais atividades.

Figura 47 - Variação do nível de tensão  $V_{ab}$  na Atividade 3.



Fonte: MATLAB

Na Tabela 6 está disposta a carga conectada ao sistema para cada intervalo.

Tabela 6 – Cargas conectadas ao sistema na Atividade 3.

Intervalo	Carga
t0 – t1	VAZIO
t1 – t2	BR1
t2 – t3	BR1 + BR2
t3 – t4	BR1 + BR2 + M1
t4 – t5	BR1 + BR2 + M1 + M2
t5 – t6	BR1 + BR2 + M1
t6 – t7	BR1 + M1
t7 – t8	BR1 + M1 (eixo bloqueado)
t8 - ...	VAZIO

Fonte: Autor

Na Tabela 7 estão dispostos os valores médios obtidos durante a simulação para cada intervalo.

Tabela 7 - Dados obtidos na Atividade 3.

Intervalo	$V_L$ [V]	$I_L$ [A]	$P_{3\phi}$ [W]	$Q_{3\phi}$ [Var]	$S_{3\phi}$ [VA]
t0 – t1	220.5934	0	0	0	0
t1 – t2	214.8268	1.165255	287.9945	7.8668	288.1028
t2 – t3	206.8018	2.241273	518.8018	45.57603	520.8024
t3 – t4	187.7395	2.547875	492.9783	-192.315	529.2052
t4 – t5	168.9555	3.398735	627.0915	-102.78	635.5116
t5 – t6	185.2649	3.4715	505.7786	-163.453	531.5372
t6 – t7	190.8737	2.633077	495.4767	-173.193	524.8745
t7 – t8	152.5843	8.483333	1256.018	-364.956	1307.967
t8 - ...	221.1383	0	0	0	0

Fonte: Autor

Os gráficos referentes à corrente e as potências desta Atividade se encontram no Anexo B.

#### 4.4. Atividade 4 – Sistema Isolado: Geração + Rede de transmissão + Carga + Controle de tensão e frequência

##### 4.4.1. Objetivo

O objetivo desta prática é analisar as consequências da variação de carga em um determinado sistema operando de forma isolada variando os reguladores de tensão de forma que nos terminais da carga esteja chegando 220 V. As cargas deste sistema se encontram afastadas do sistema de geração. Portanto, neste caso também é utilizado linha de transmissão (representado por indutor) para interligação.

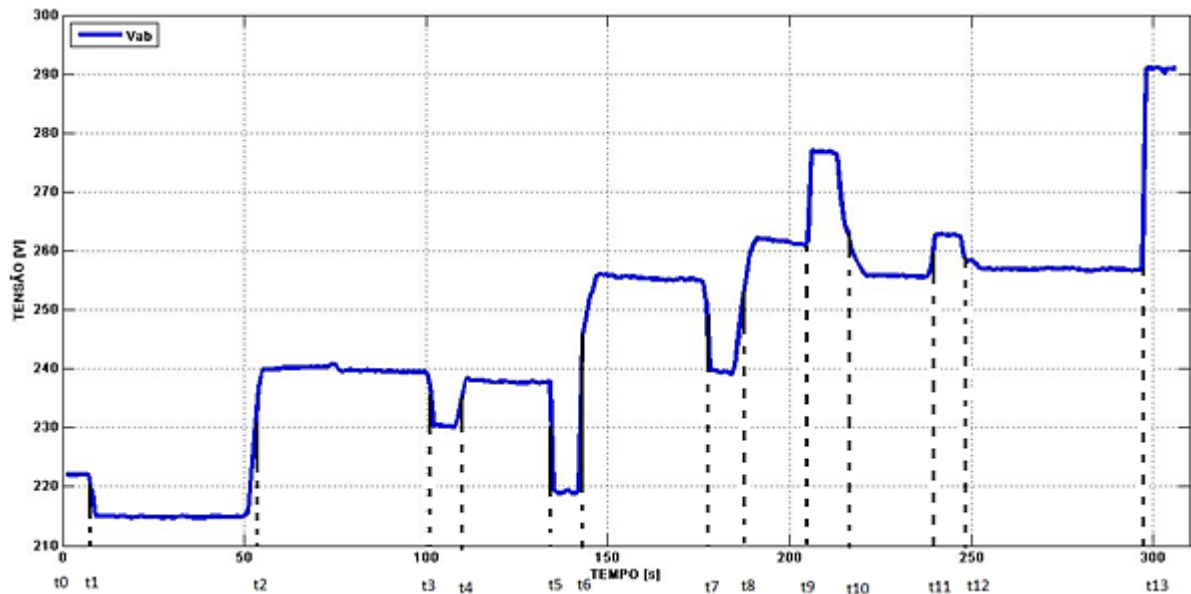
##### 4.4.2. Paralelismo de Alternadores

Ver seção 4.1.3 deste Trabalho.

##### 4.4.3. Alimentação de cargas

A alimentação das cargas é feita de forma aleatória. O levantamento dos dados é feita na saída do grupo de geração. Assim, ocorrendo à leitura afastada as cargas. Na Figura 48 é apresentado o nível de tensão  $V_{ab}$  que serve como base para análise, da mesma forma que ocorreu nas demais atividades.

Figura 48 - Variação do nível de tensão Vab na Atividade 4.



Fonte: MATLAB

Tabela 8 – Cargas conectadas ao sistema na Atividade 4.

Intervalo	Carga
t0 – t1	VAZIO
t1 – t2	BR1
t2 – t3	BR1 (220NT)
t3 – t4	BR1 + BR2
t4 – t5	BR1 + BR2 (220NT)
t5 – t6	BR1 + BR2 + M1
t6 – t7	BR1 + BR2 + M1 (220NT)
t7 – t8	BR1 + BR2 + M1 + M2
t8 – t9	BR1 + BR2 + M1 + M2 (220NT)
t9 – t10	BR1 + BR2 + M1
t10 – t11	BR1 + BR2 + M1 (220NT)
t11 – t12	BR1 + M1
t12 – t13	BR1 + M1 (220NT)
t13 - ...	VAZIO

Fonte: Autor

Tabela 9 - Dados obtidos na Atividade 4.

Intervalo	$V_L$ [V]	$I_L$ [A]	$P_{3\phi}$ [W]	$Q_{3\phi}$ [Var]	$S_{3\phi}$ [VA]
t0 – t1	221.7344	0	0	0	0
t1 – t2	214.9256	1.184837	290.4608	12.98416	290.7511
t2 – t3	239.823	1.314909	360.5073	15.42465	360.8377
t3 – t4	230.2893	2.574375	660.7686	60.47657	663.5309
t4 – t5	237.8428	2.67287	703.163	58.5792	709.6342
t5 – t6	219.1053	3.118143	713.7275	-240.377	753.1188
t6 – t7	254.6398	4.216313	1130.644	-265.716	1161.462
t7 – t8	239.6296	5.744125	1457.163	-99.2629	1460.56
t8 – t9	261.5321	7.176875	1971.287	-62.0256	1972.266
t9 – t10	276.7445	5.41925	1546.236	-262.623	1568.402
t10 – t11	255.7274	4.424	1171.444	-254.107	1198.69
t11 – t12	262.734	3.606475	1012.394	-43.258	1013.317
t12 – t13	257.0094	2.4887	965.079	-41.5136	965.9745
t13 - ...	290.89	0	0	0	0

Fonte: Autor

Os gráficos referentes à corrente e as potências desta Atividade se encontram no Anexo C.

#### 4.5. Atividade 5 – Sistema Integrado: Geração + Barramento infinito + Carga

##### 4.5.1. Objetivo

O objetivo desta prática é analisar as consequências da variação de carga em um determinado sistema operando em conjunto a um barramento infinito. Variar os reguladores de tensão de forma que se possa analisar o fornecimento de energia de cada uma das fontes que possam suprir a demanda. As cargas se encontram conectadas ao sistema como um todo, próximo ao conjunto de geração local.

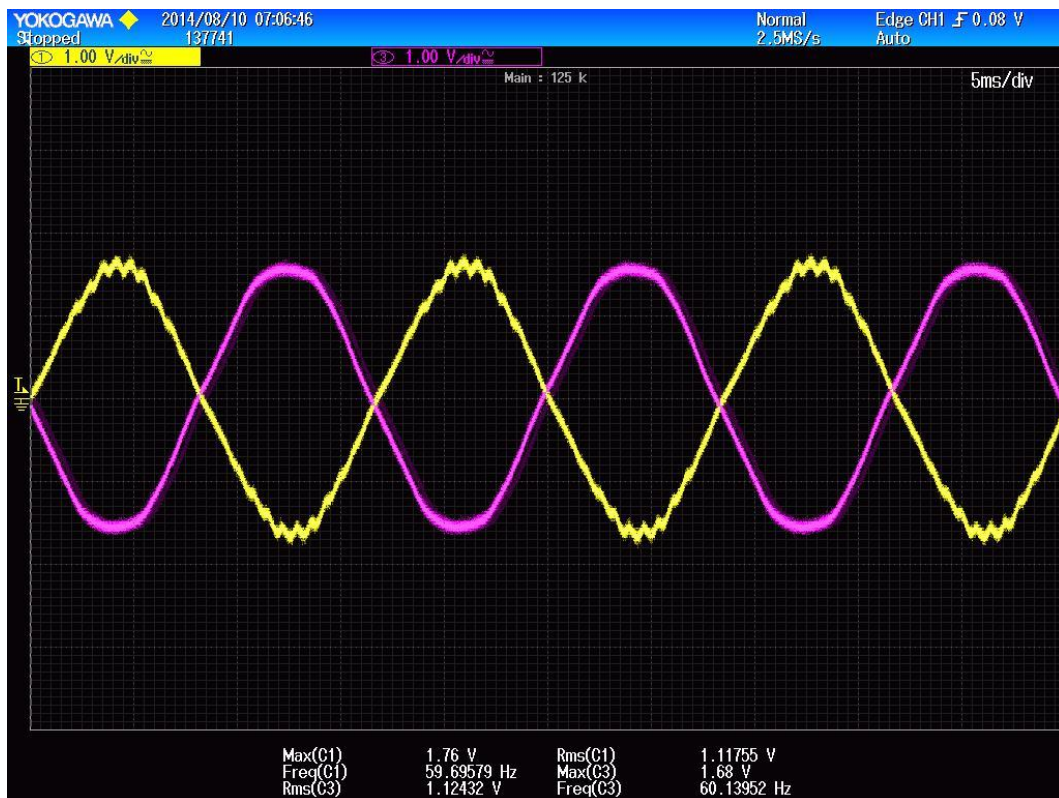
##### 4.5.2. Paralelismo de Alternadores

Ver seção 4.1.3 deste Trabalho.

#### 4.5.3. Paralelismo com a rede

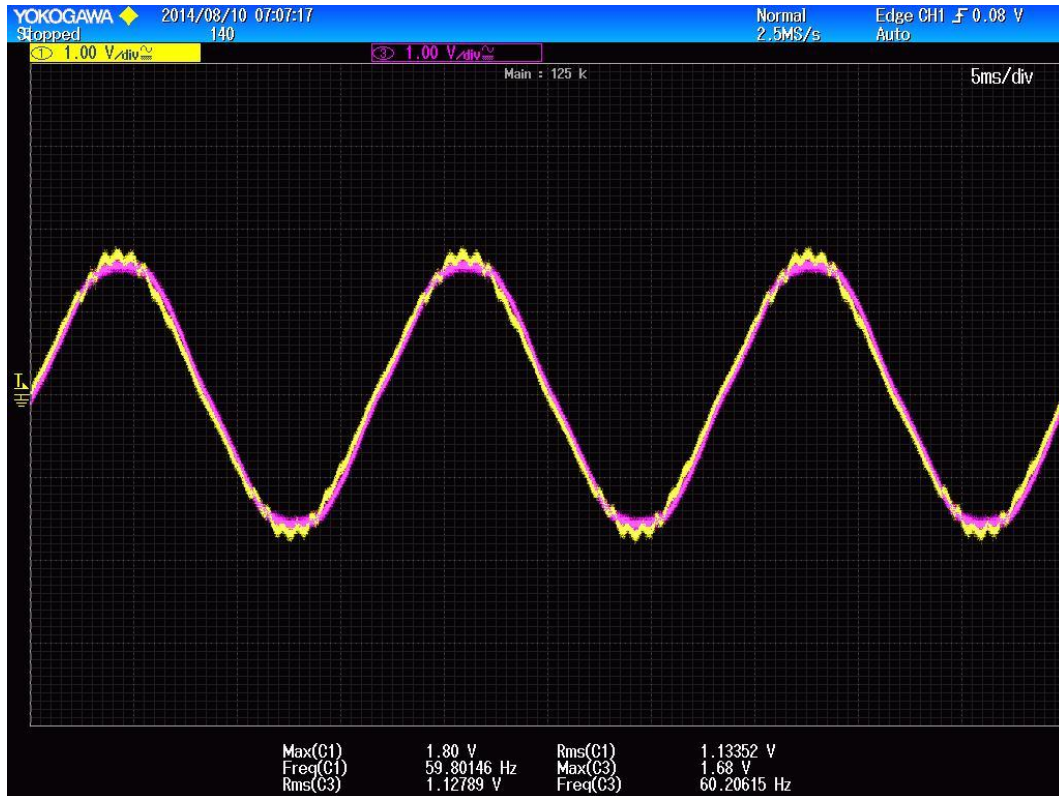
O paralelismo com a rede deve obedecer aos mesmos critérios em que paralelismo entre alternadores. O método utilizado é o mesmo (lâmpadas apagadas). Na Figura 49 são apresentadas as formas de onda de tensão do grupo gerador (já em paralelo) e da tensão da rede (barramento infinito). Nesta imagem, ambas as ondas estão defasadas, o que ocasionaria um brilho intenso nas lâmpadas utilizadas como sincronoscópio (pode ser observado na Figura 23). Já na Figura 50 são apresentadas as formas de onda no momento em que o paralelismo é realizado. As ondas estão praticamente em fase. Posteriormente, na Figura 51 são apresentadas as formas de onda já com o funcionamento em paralelo do grupo de geração e a rede.

**Figura 49 - Fase A (grupo gerador) e Fase A (rede) defasados 180 graus.**



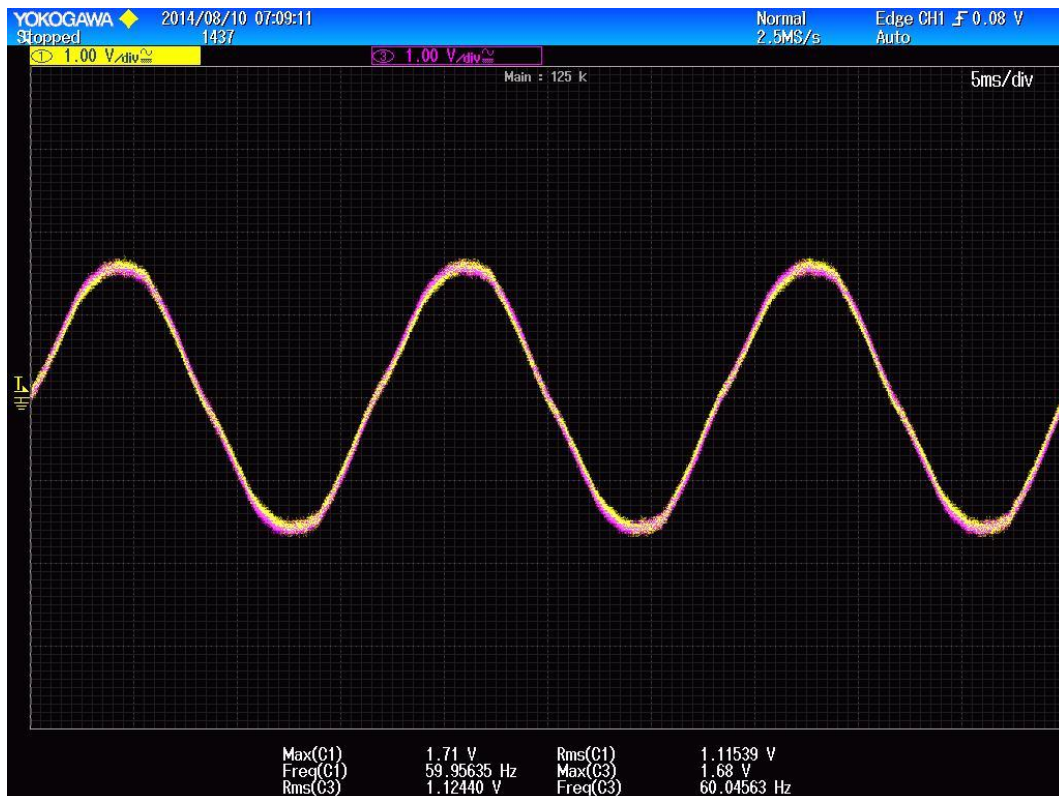
Fonte: Yokogawa

**Figura 50 - Fase A (grupo gerador) e Fase A (rede) no momento que os geradores são colocados a operar de forma paralela.**



Fonte: Yokogawa

**Figura 51 - Fase A (grupo gerador) e Fase A (rede) com operação em paralelo.**



Fonte: Yokogawa



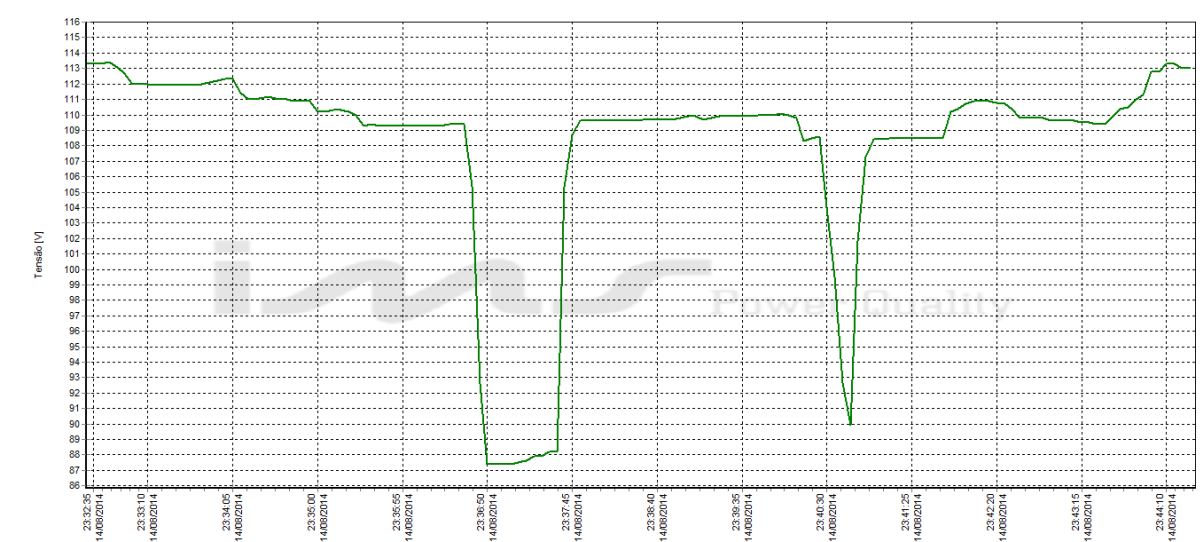
#### 4.5.4. Alimentação de cargas

A alimentação das cargas é feita de forma aleatória. O levantamento de dados é feito de maneira mais complexa devido ao aumento na quantidade de equipamentos fornecedores de energia, e também de equipamentos de aquisição de dados. Em cada componente fornecedor de energia é instalado um analisador de energia.

- Gerador 1 – PowerNET PQ-600
- Gerador 2 – PowerNET PQ-600
- Barramento infinito – RE-400

Os softwares de cada analisador de energias são as ferramentas capazes de fazer a visualização dos dados levantados. Nesta Atividade, ao invés de apresentar a visualização gráfica no software MATLAB, os dados de cada analisador serão apresentados em imagens exportadas direto do devido software. Na Figura 52 é apresentado o nível de tensão nos terminais do Gerador 1 (componente do grupo de geração que opera em paralelo com o Gerador 2) para a Atividade 5.

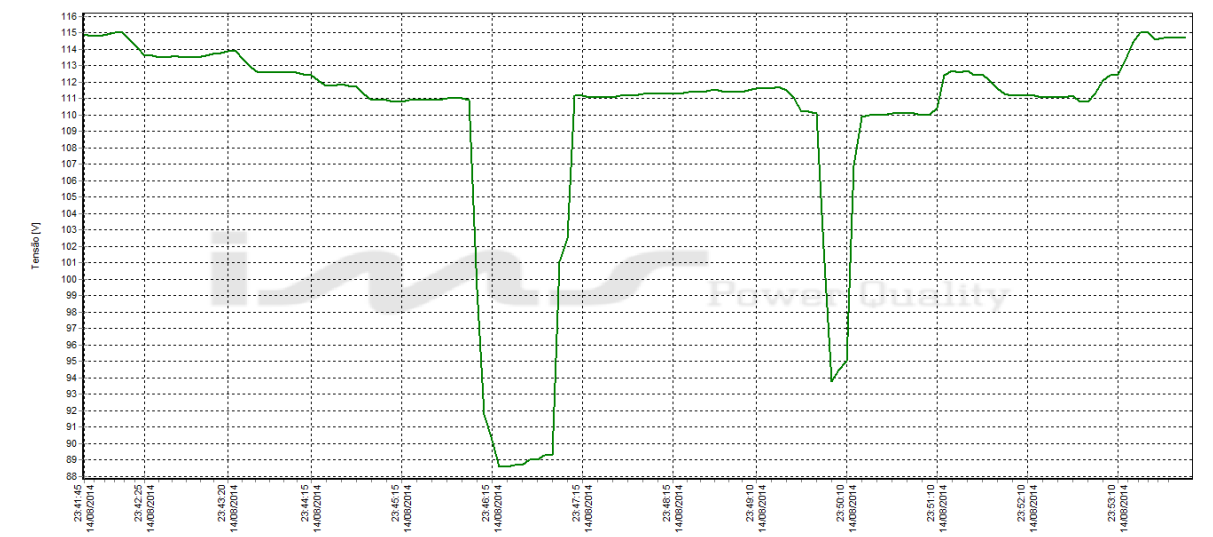
**Figura 52 - Variação do nível de tensão  $V_a$  do Gerador 1 na Atividade 5.**



Fonte: IMS

Na Figura 53 é apresentado o nível de tensão nos terminais Gerador 2. A semelhança se dá pela operação ser praticamente igual. O que difere entre ambos, em alguns pontos, é regulação de tensão e frequência individual.

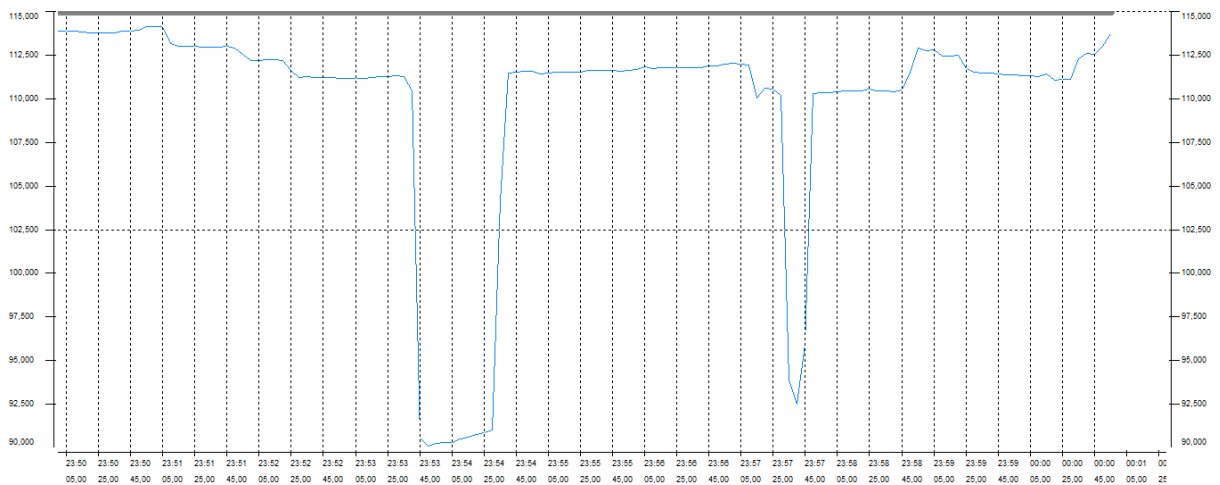
**Figura 53 - Variação do nível de tensão Va do Gerador 2 na Atividade 5**



Fonte: IMS

A Figura 54 apresenta o nível de tensão (em V) da rede no decorrer da Atividade 5.

**Figura 54 - Variação do nível de tensão Va da rede na Atividade 5**



Fonte: EMBRASUL

Para obter este nível de tensão (220/110 V) foi feita a utilização de um transformador de potência (Figura 55) de 1 kVA por fase.

Figura 55 - Transformador monofásico 1 kVA



Fonte: Autor

Diante do que fora apresentado nas imagens é possível perceber que o nível de tensão não variou significativamente no decorrer da simulação, para todos os componentes fornecedores de energia. Exceto nos momentos que houve bloqueio no eixo dos motores M1 e M2, onde apresenta um afundamento no nível de tensão, visível nas três imagens apresentadas (Figura 52, Figura 53 e Figura 54). Assim, portanto, é possível afirmar que mesmo com a entrada de carga não houve queda significativa no nível de tensão nos terminais das cargas. Isso se dá devido à presença de alimentação do barramento infinito, do sistema elétrico na qual está inserido.

Os demais dados levantados para cada componente fornecedor de energia estão presentes no Anexo D.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Trabalhos futuros

O fato de envolver uma gama de casos e abordar diversas disciplinas torna este documento uma referência inicial a projetos futuros, o que não havia no princípio deste projeto. A inexistência de uma linha conceitual a ser trabalhada, levou a uma repetição da literatura nos assuntos abordados em sua revisão bibliográfica. Desta forma, o assunto tratado neste Trabalho é possível dar novas características ao processo de aprendizagem na área de SEP.

Além de acrescentar o número de componentes do sistema elétrico, uma maior diversificação nas atividades executadas será de grande relevância ao iniciar um novo projeto. Podendo haver, também, comparação no resultado da simulação com os resultados obtidos nos demais métodos hoje adotados: simulação matemática e simulação através de softwares.

Isso implicará em complexidade no processo de execução das atividades e também na análise dos resultados obtidos. Porém, levando este Trabalho em consideração, o desenvolvimento se tornará viável. Assim sendo, o estudante adquire experiência prática, de suma importância. Portanto, tomando este documento como referência, os projetos subsequentes tendem a elevar o nível de aprendizagem prática do aluno quando se trata de sistemas elétricos.

### 5.2. Conclusões

Este documento apresentou cinco atividades para acrescentar no aprendizado de SEP e seus componentes didáticos. Nas atividades foi trabalhada a conexão de cargas em diversos tipos de sistemas, incluindo operação isolada e também operação em conjunto com um barramento infinito. A variação das cargas geraram consequências ao sistema como um todo. Podendo citar a variação no nível de tensão do sistema, chegando a um patamar baixo ao ponto de não ser capaz de suprir a alimentação dos motores elétricos, durante a Atividade 1.

O processo de bloqueio do eixo dos motores M1 e M2 levou o sistema a declínios súbitos no nível de tensão, atingindo um alto nível de corrente circulando pelo sistema. É um caso parecido ao de um curto-circuito em determinado ponto do sistema, a tensão decresce drasticamente e a corrente do sistema se eleva. Em

operação isolada pode-se perceber a variação da frequência do sistema ocasionado pelo bloqueio do eixo de M1 e M2.

Com operação em paralelo com a rede, o grupo gerador basicamente não forneceu energia ativa durante a Atividade 5. Entretanto, quando houve bloqueio do eixo de M1 e M2, todos os componentes fornecedores de energia entregaram energia ao sistema. Desta forma, a energia requisitada pelas cargas em operação normal foi suprida pelo barramento infinito.

É possível acreditar que o objetivo principal foi atingido. O aprendizado se torna válido quando o entendimento é pleno. E isso foi encontrado ao fim das execuções aqui dispostas. Do ponto de vista didático profissional, as atividades aqui apresentadas acrescentam no estudo de SEP. Portanto, este Trabalho é finalizado com a ideia de que a utilização destas atividades na aprendizagem na área de SEP seja realizada de maneira mais eficaz.

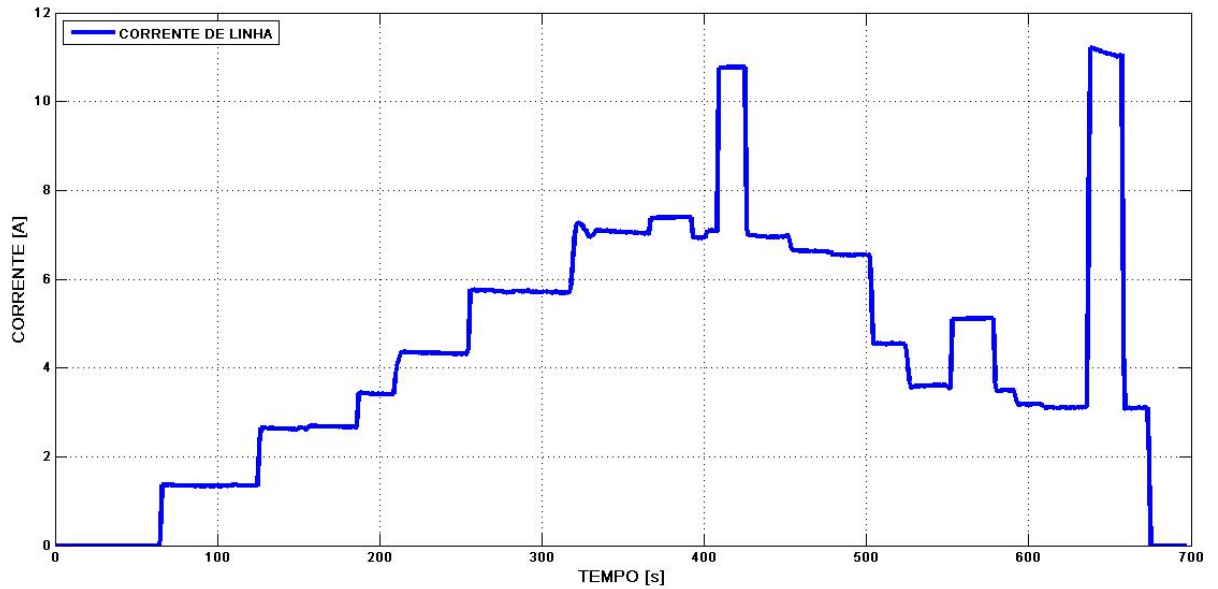
## REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL), “*Informações Gerenciais 3º Trimestre de 2014*”, Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z\\_IG\\_Set\\_14v4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Set_14v4.pdf)>. Acesso em: 18/12/2014
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL), “*Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*”, Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica, Resolução Normativa nº 641/2014.
- [3] BORGES T., Carmen Lucia, “*Análise de Sistemas de Potência*”, Departamento de Eletrotécnica – UFRJ, 2005. Disponível em: <[http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Apostila\\_Completa\\_ANALISE\\_DE\\_SISTEMAS\\_D\\_E\\_POTENCIA.pdf](http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Apostila_Completa_ANALISE_DE_SISTEMAS_D_E_POTENCIA.pdf)>
- [4] CASTRO, Henrique Siqueira, “*Especificação Funcional de Simulador para Treinamento de Operadores de Centros de Controle de Geração e Transmissão*”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, 2007, Belo Horizonte-MG.
- [5] CHAPMAN, Stephen J. “*Fundamentos de Máquinas Elétricas*” – 5ª Ed. Bookman, 2013
- [6] DE LIMA, Júlio César M., “*Aspectos de Proteção e Controle do Gerador Síncrono Subexcitado*”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PUC-MG, 2002, Belo Horizonte-MG
- [7] Site Engenharia é, Disponível em: <<http://www.engenhariae.com.br/>>
- [8] Equacional, “*Grupo Simulador de Usina Elétrica ETC-26*”, Equacional Elétrica e Mecânica LTDA
- [9] Grupo Globo, “*Conhecendo a energia elétrica*”, Revista Época Edição nº 713, Editora Globo, 2011
- [10] KIM, Yong-Hak, KIM, Tae-Kiun, YOON, Yong-Beum, CHOO, Jin-Boo, Koh, Kyoo-Kun, NAM, Hae-Kon, “*Construction of Largest Equivalent Systems for Power System Simulator*”, International Conference on Electrical Engineering, 2002.
- [11] Kosow, I. Irving; Máquinas elétricas e transformadores – Editora Globo, 5ª Edição - 2005
- [12] LEGER, Aaron St., “*Transmission Line Modeling for the Purpose of Analog Power Flow Computation of Large Scale Power System*”, Master of Science in Electrical Engineering, Drexel University, 2005, Philadelphia, PA
- [13] LEITE, Carlos Roberto R., OLIVEIRA, José Rodrigues, OLIVEIRA, Jaldemir Gomes, “*O Uso de Simuladores no Treinamento de Operadores da CHESF como Ferramenta para Disseminação de Conhecimentos na Operação do Sistema Elétrico*”, GESEL – II Seminário Internacional, UFRJ, 2007.
- [14] MARINHO, José Mauro Teixeira, “*Simulação em Sistemas de Energia Elétrica com Modelagem Flexível - Monofásica e Trifásica*”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UFRJ, 2008, Rio de Janeiro-RJ

- [15] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS - MME (Brasil), EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, "*Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 - PDE 2022*", 2013.
- [16] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS - MME (Brasil), EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, "*Plano Decenal de Expansão de Energia 2023 - PDE 2023*", 2014.
- [17] MORALE, Michel dos Santos, "*Técnicas para Treinamento de operadores de Sistema Elétrico Utilizando Simulador com Base na Interface de Tempo Real*", Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, 2007, Florianópolis-SC.
- [18] TecQuipment, "*Simulador de Linhas de Transmissão (PS120) - Guia do Usuário*", TecQuipment Ltda, 2009.
- [19] SGUAREZI, Alfeu Joãozinho Filho, "*Controle de potências ativa e reativa de geradores de indução trifásicos de rotor bobinado para aplicação em geração eólica com a utilização de controladores baseados no modelo matemático dinâmico do gerador*", Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UNICAMP, 2010, Campinas-SP
- [20] SOUZA, Luciano Moraes, "*Compensador Síncrono de Velocidade Variável*", Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2003, Rio de Janeiro-RJ

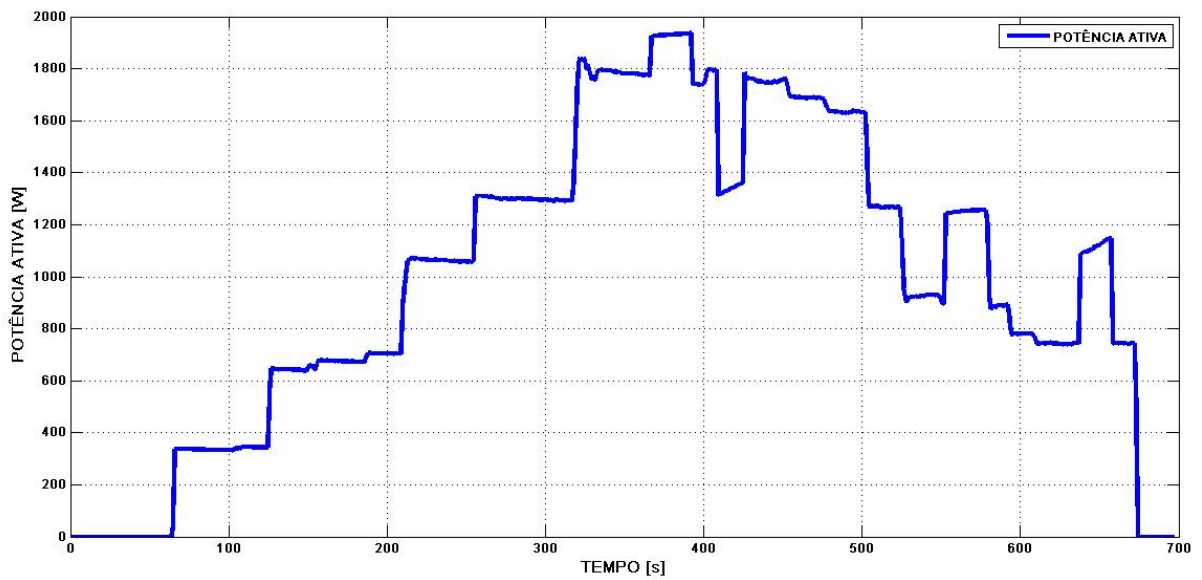
## ANEXO A – Dados obtidos na Atividade 2

Figura 56 - Variação da corrente de linha na Atividade 2.



Fonte: MATLAB

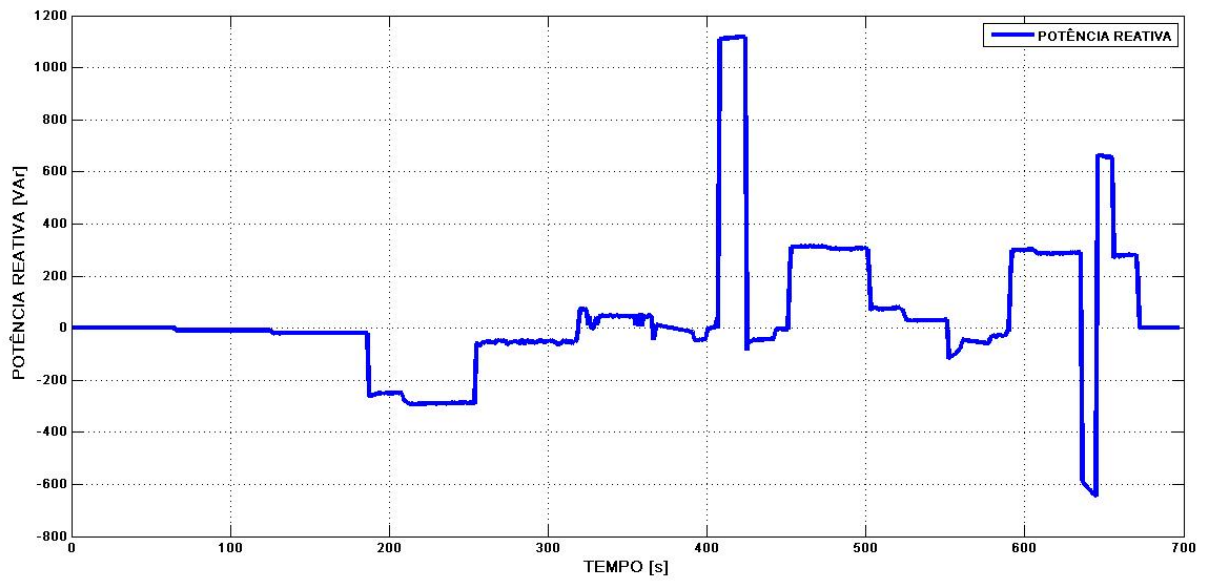
Figura 57 - Variação de potência ativa na Atividade 2.



Fonte: MATLAB

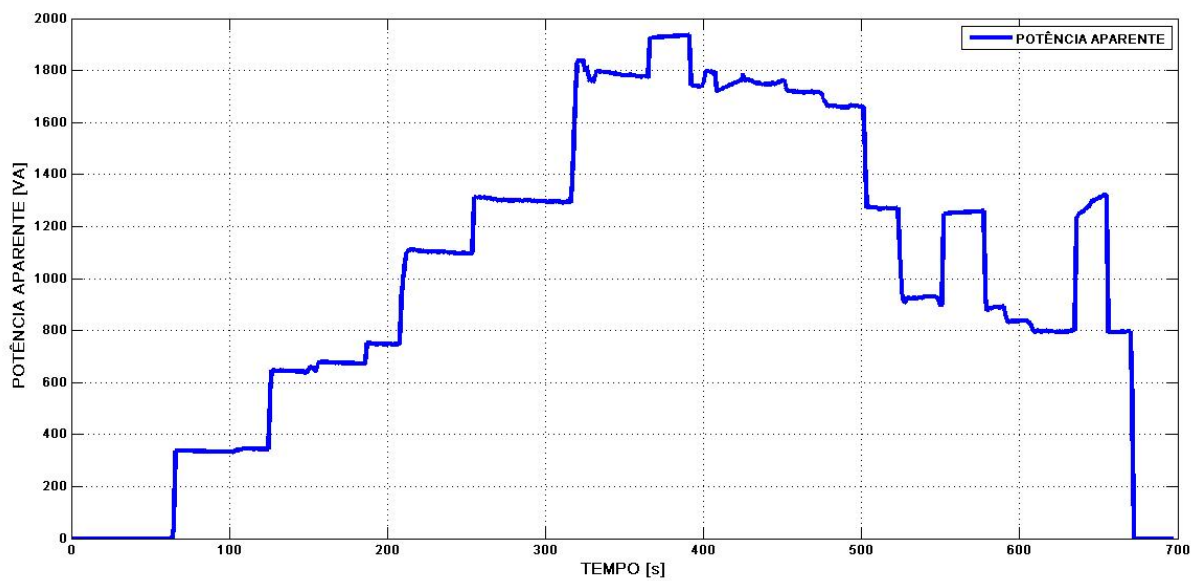


Figura 58 - Variação da potência reativa na Atividade 2

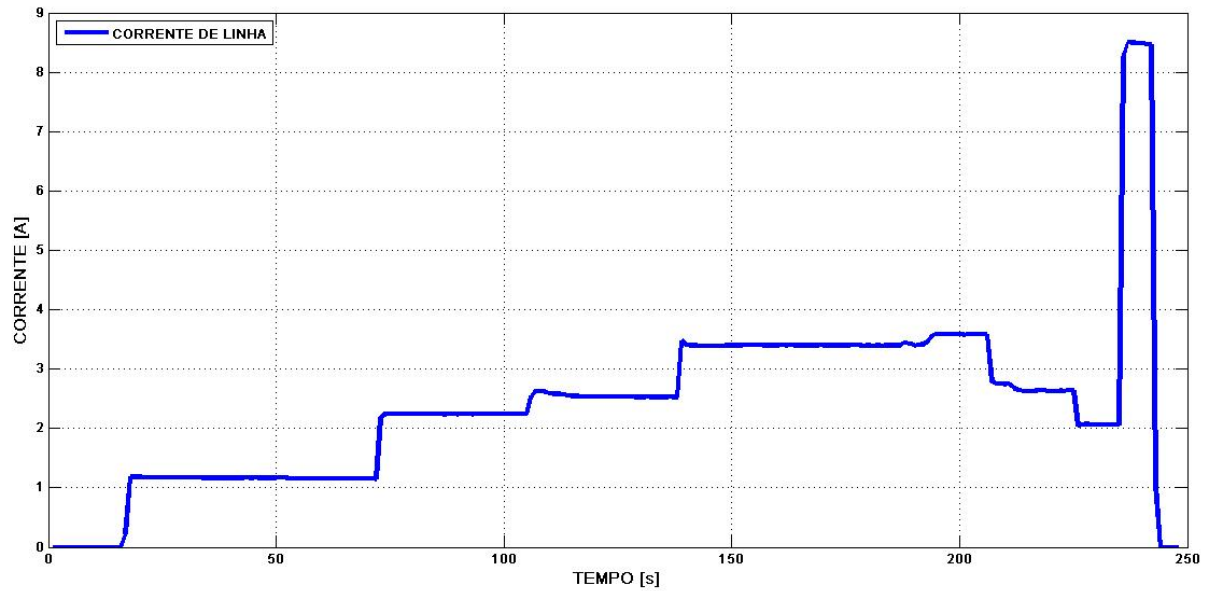


Fonte: MATLAB

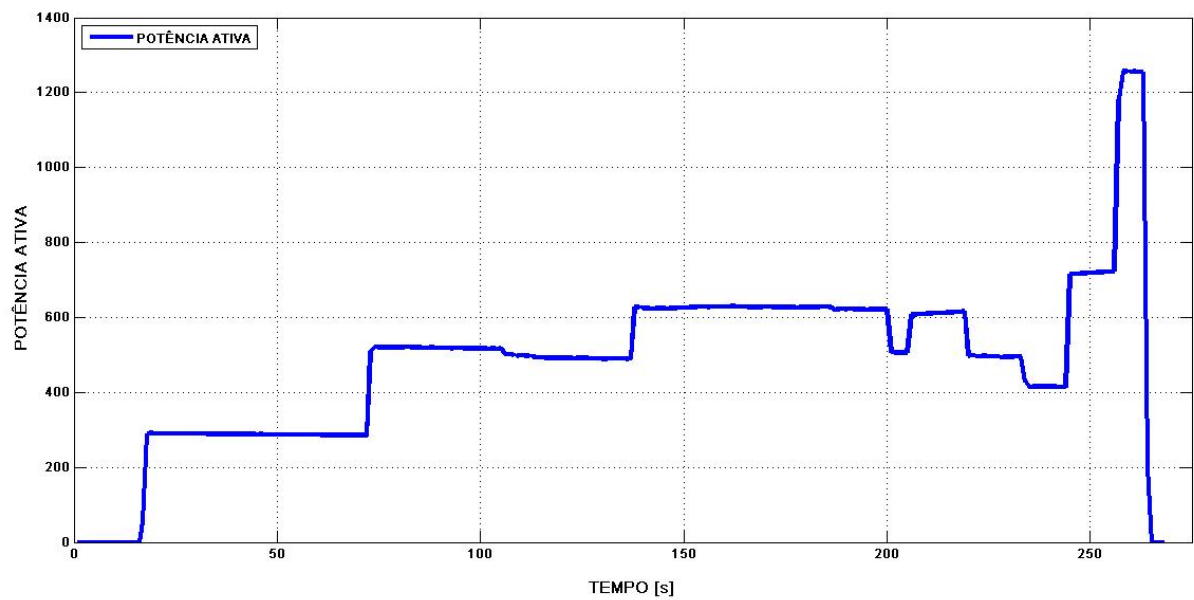
Figura 59 - Variação da potência aparente na Atividade 2



Fonte: MATLAB

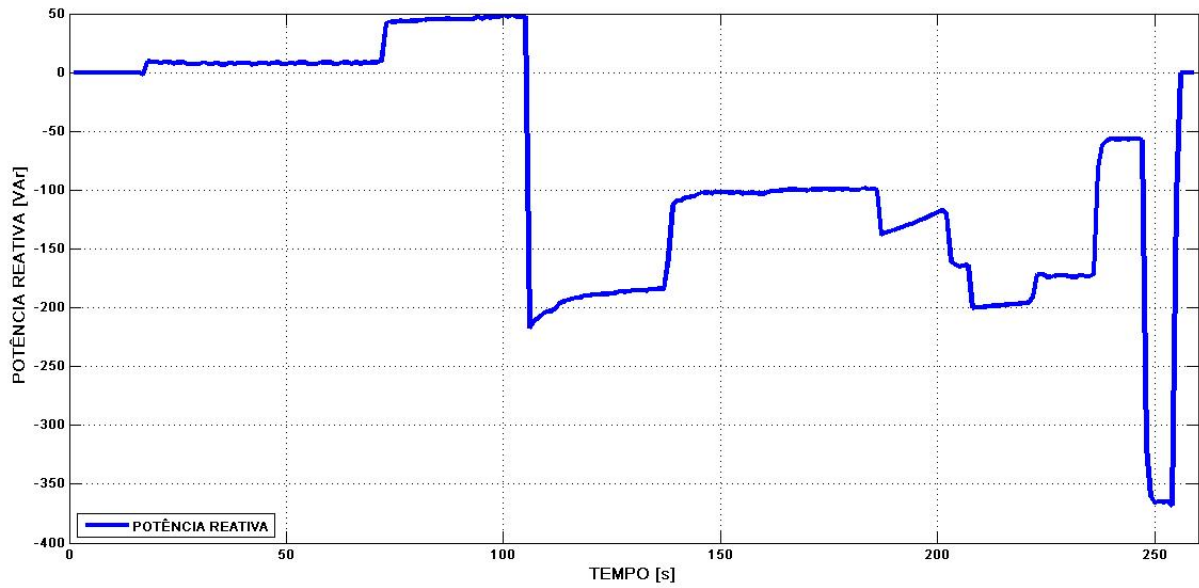
**ANEXO B – Dados obtidos na Atividade 3****Figura 60 - Variação da corrente de linha na Atividade 3.**

Fonte: MATLAB

**Figura 61 - Variação de potência ativa na Atividade 3.**

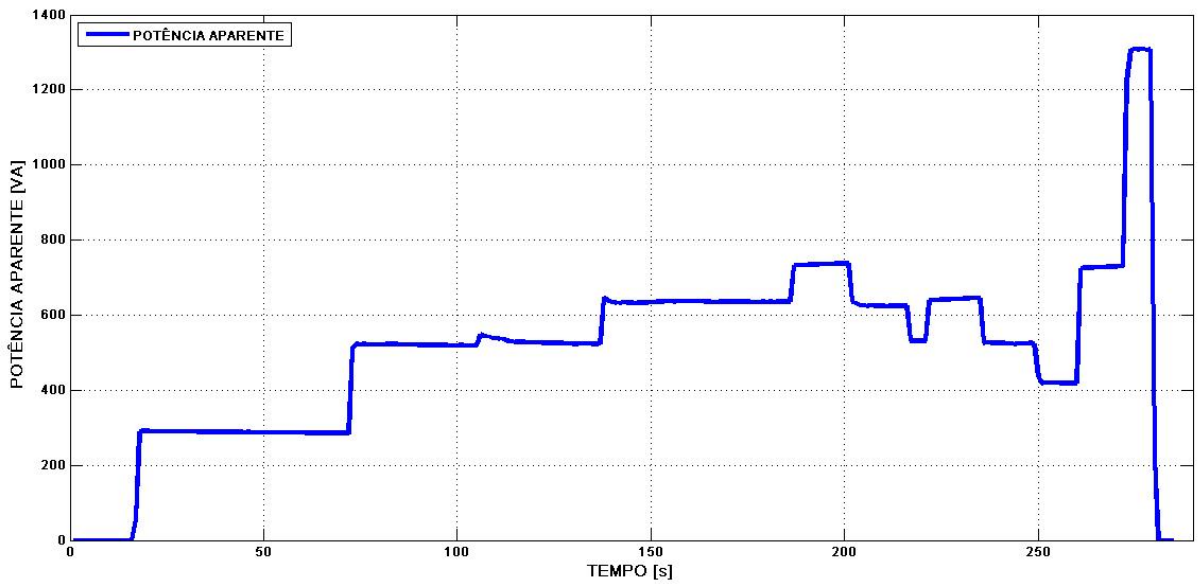
Fonte: MATLAB

**Figura 62 - Variação da potência reativa na Atividade 3**



Fonte: MATLAB

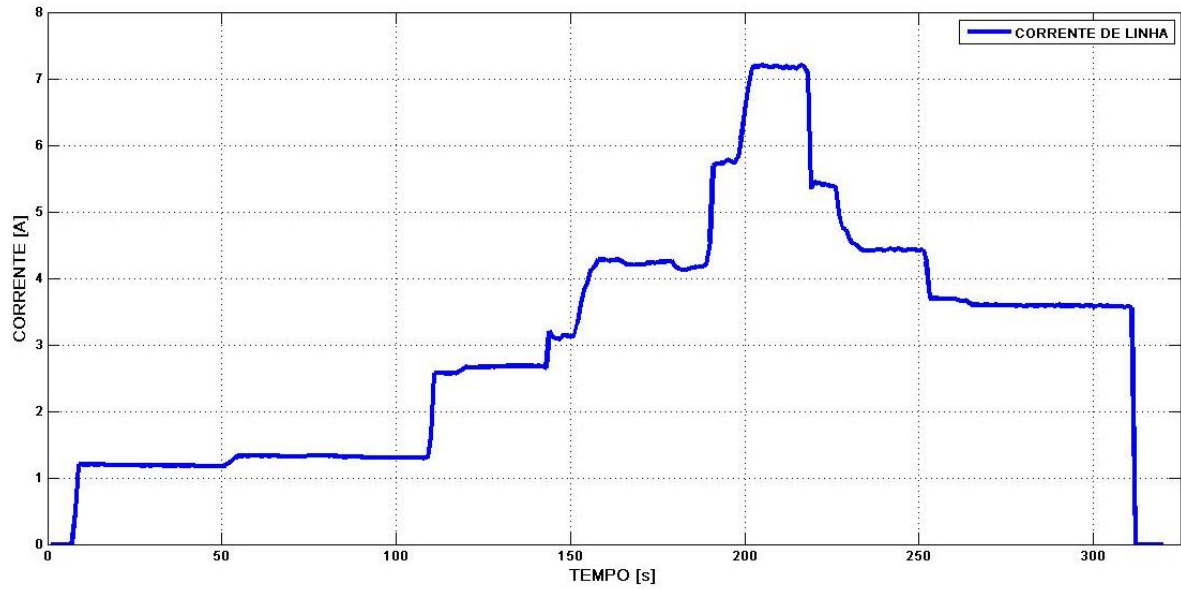
**Figura 63 - Variação da potência aparente na Atividade 3**



Fonte: MATLAB

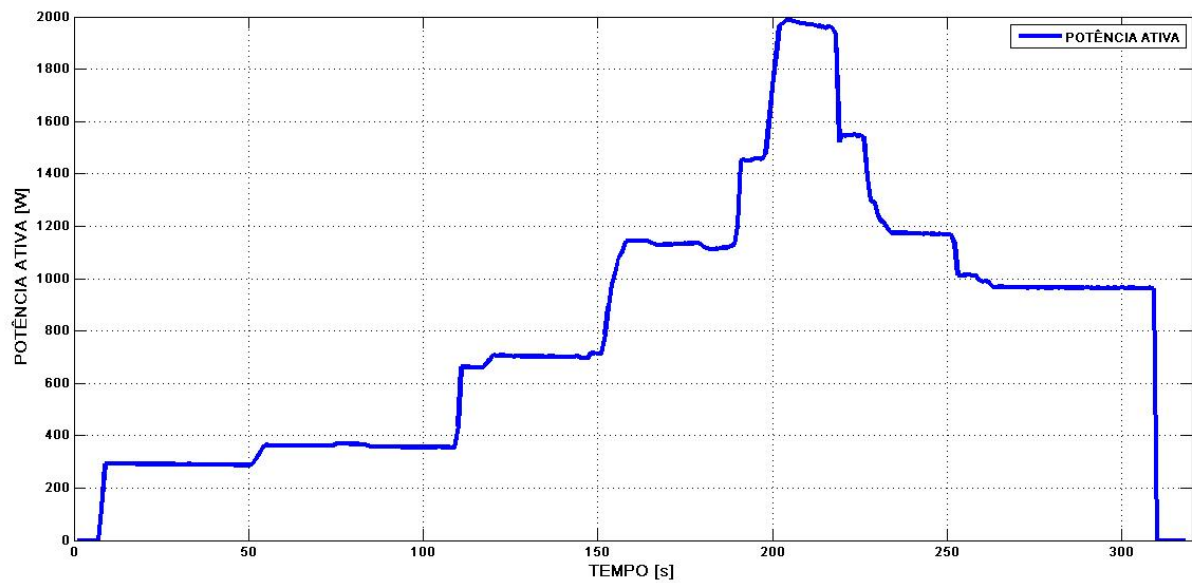
## ANEXO C – Dados obtidos na Atividade 4

Figura 64 - Variação da corrente de linha na Atividade 4.



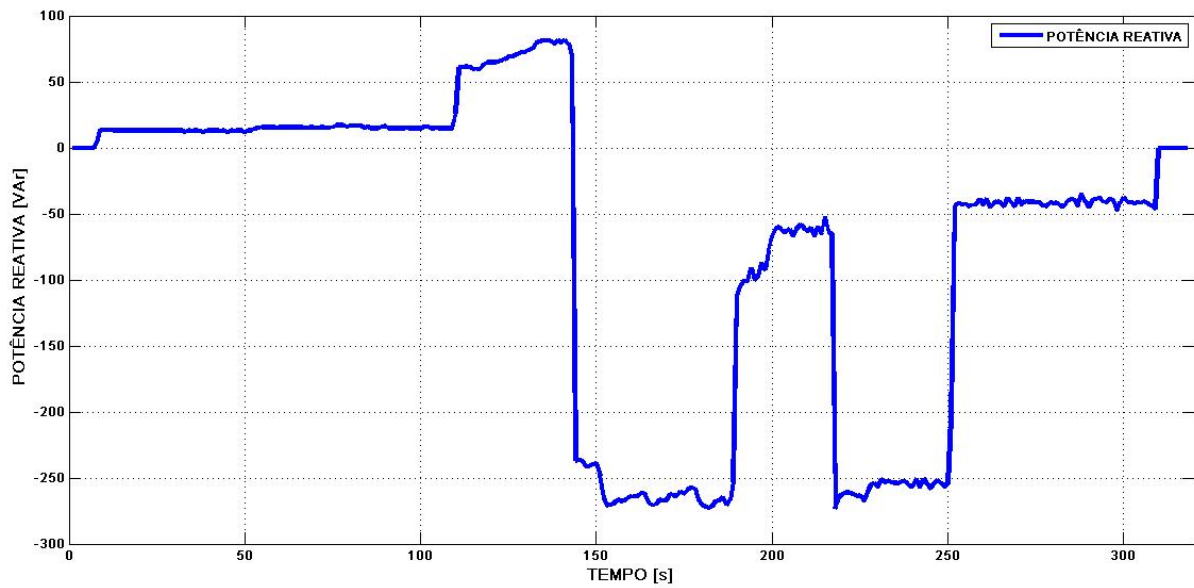
Fonte: MATLAB

Figura 65 - Variação de potência ativa na Atividade 4.



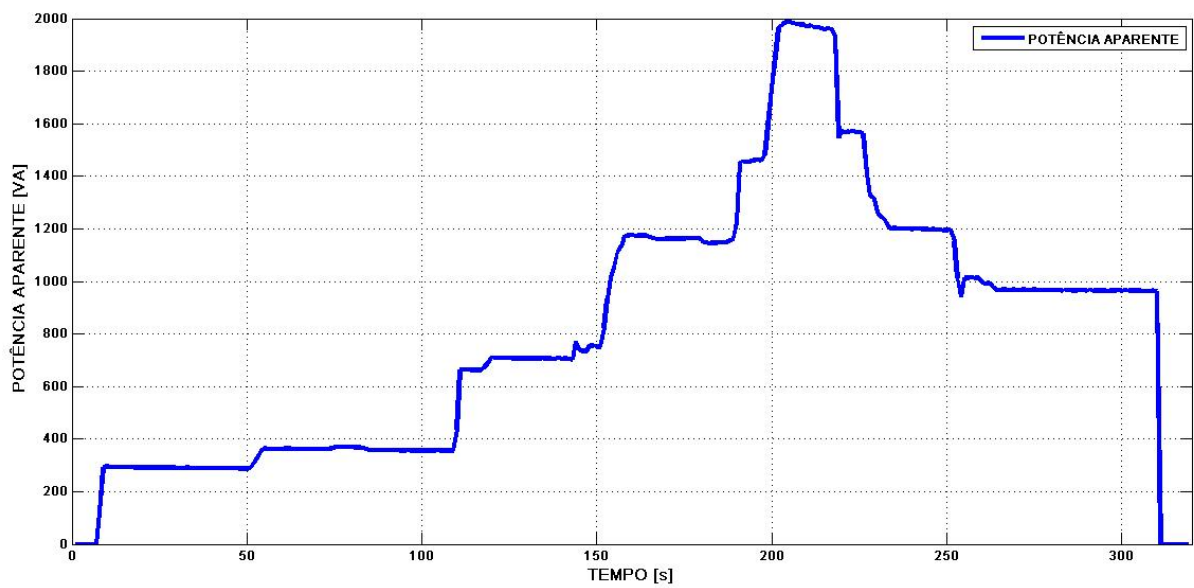
Fonte: MATLAB

Figura 66 - Variação da potência reativa na Atividade 4



Fonte: MATLAB

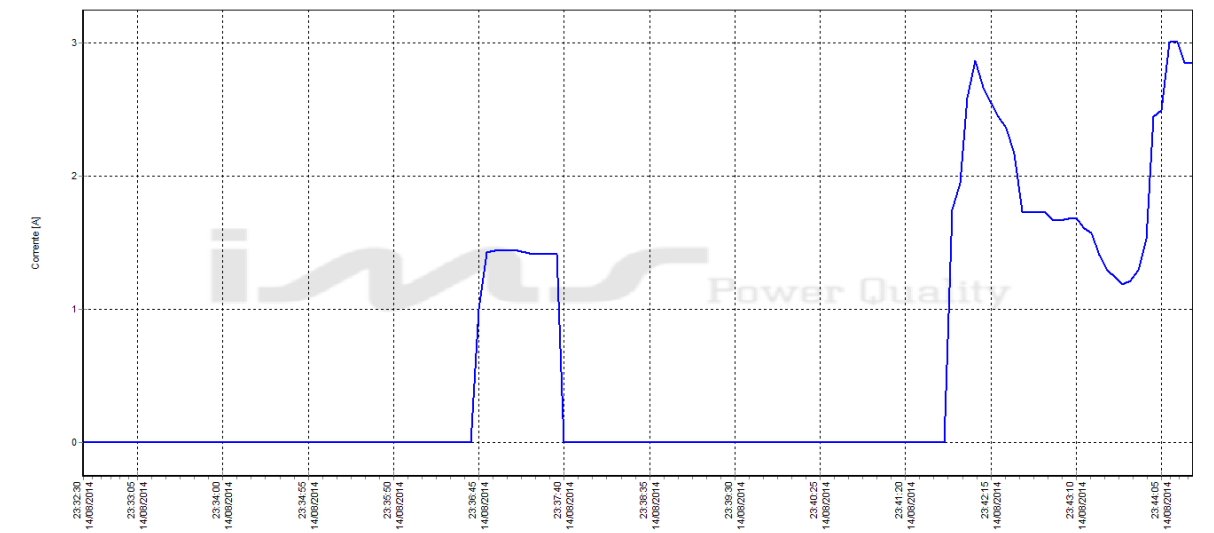
Figura 67 - Variação da potência aparente na Atividade 4



Fonte: MATLAB

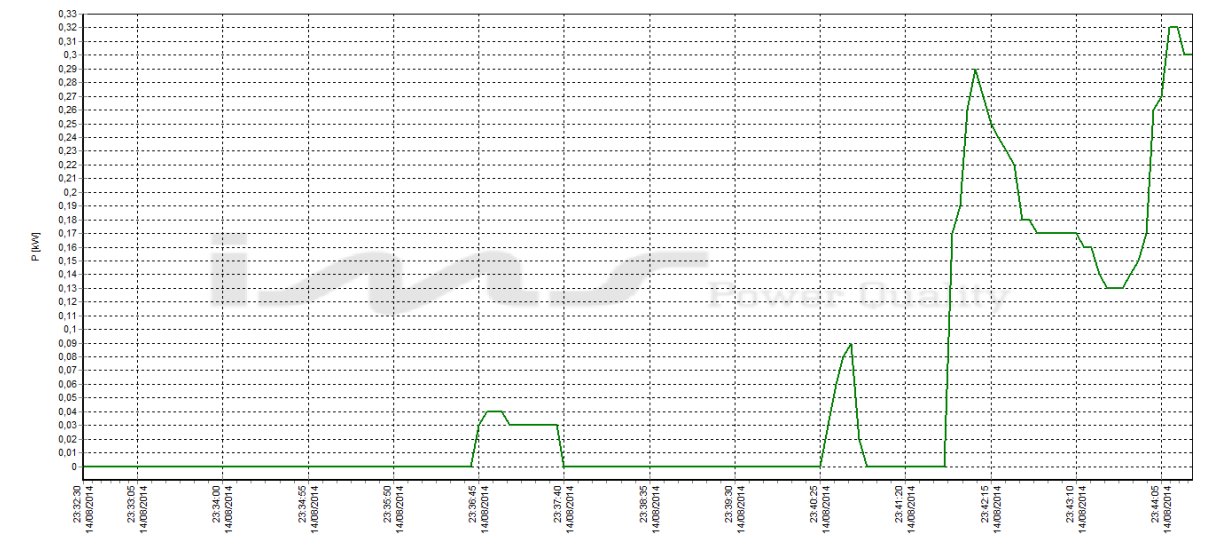
## ANEXO D – Dados obtidos na Atividade 5

Figura 68 - Variação da corrente de linha do Gerador 1 na Atividade 5.



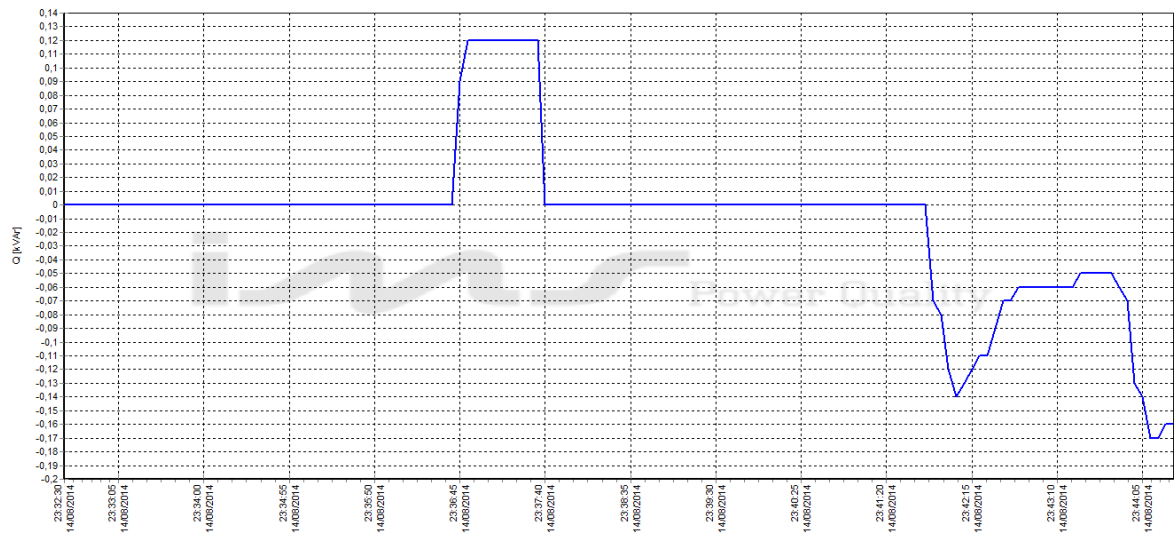
Fonte: IMS

Figura 69 - Variação de potência ativa do Gerador 1 na Atividade 5.



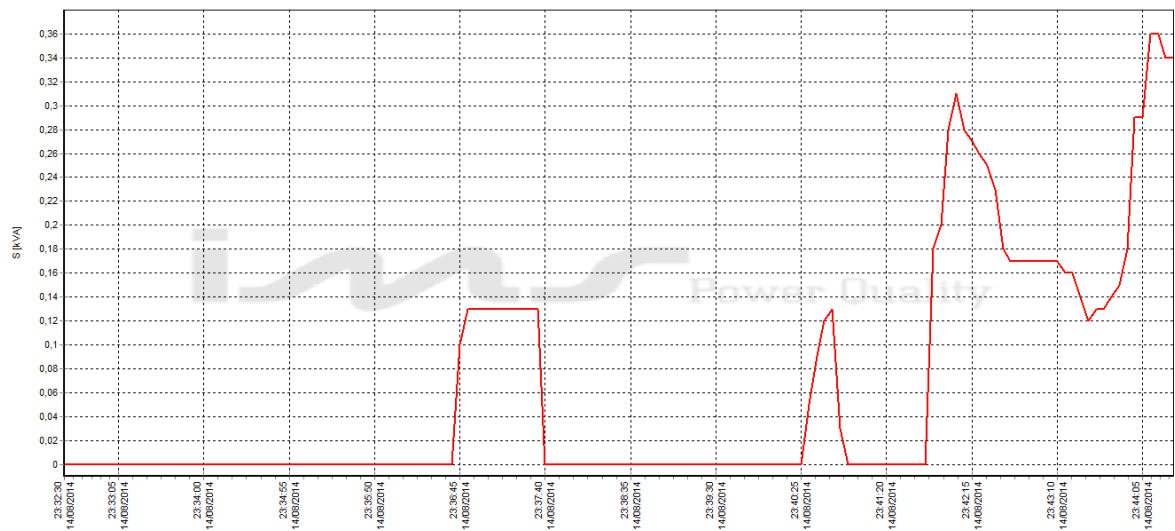
Fonte: IMS

**Figura 70 - Variação da potência reativa do Gerador 1 na Atividade 5.**



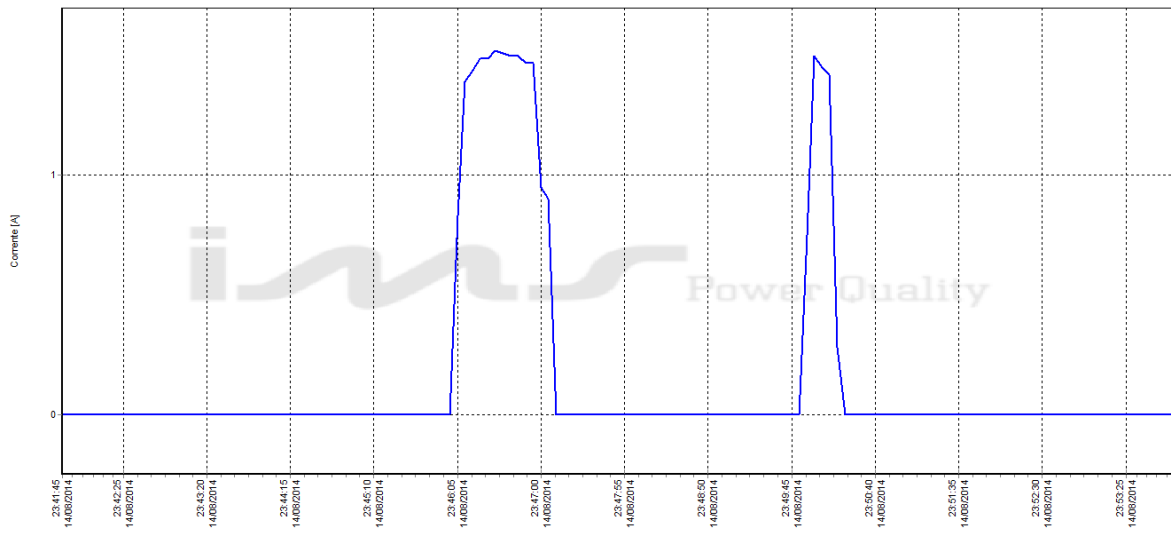
Fonte: IMS

**Figura 71 - Variação da potência aparente do Gerador 1 na Atividade 5.**



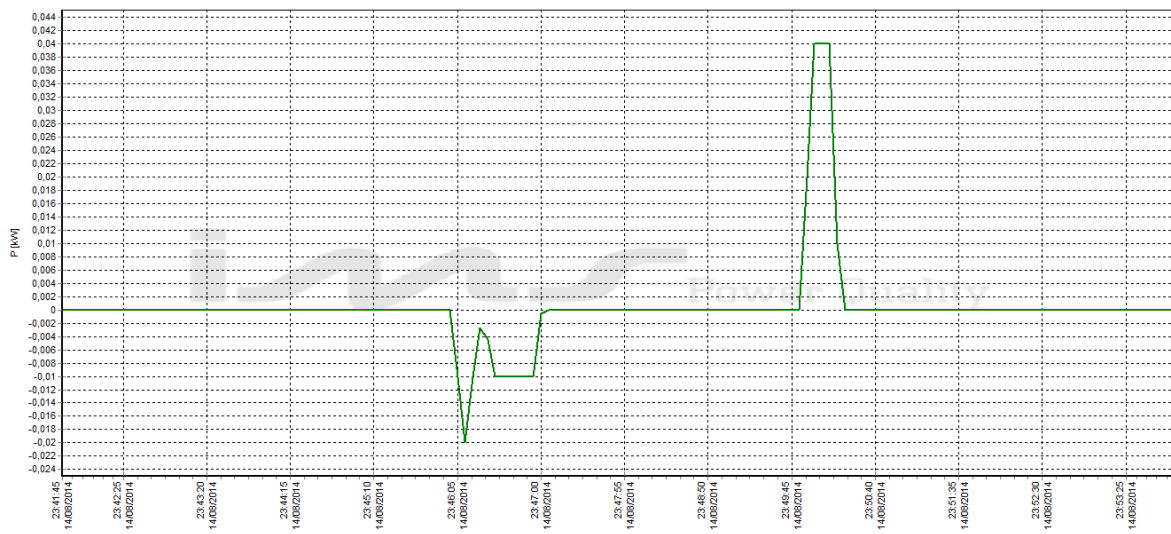
Fonte: IMS

**Figura 72 - Variação da corrente de linha do Gerador 2 na Atividade 5.**



Fonte: IMS

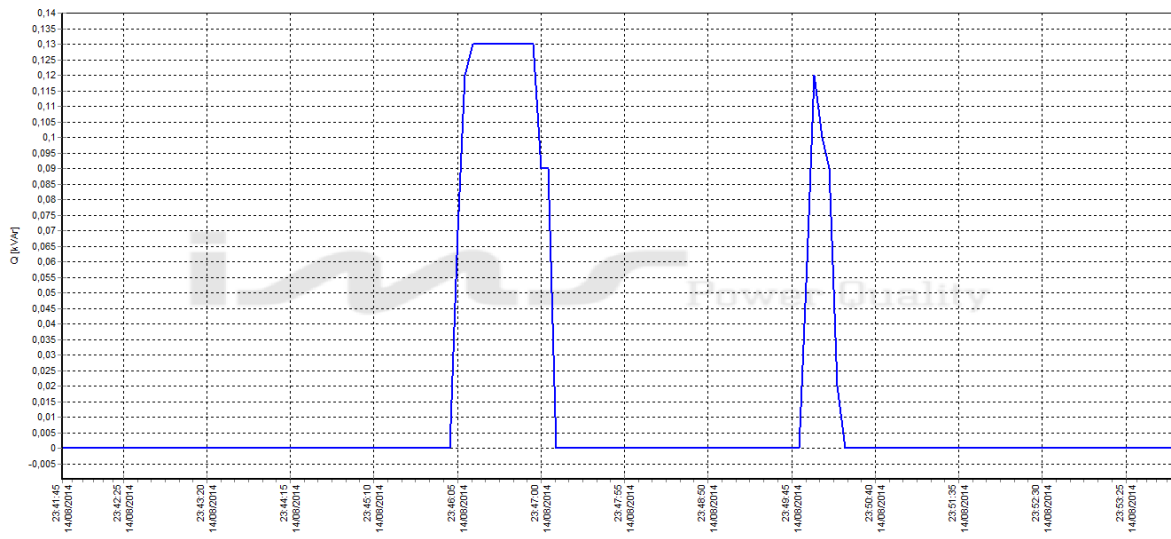
**Figura 73 - Variação de potência ativa do Gerador 2 na Atividade 5.**



Fonte: IMS

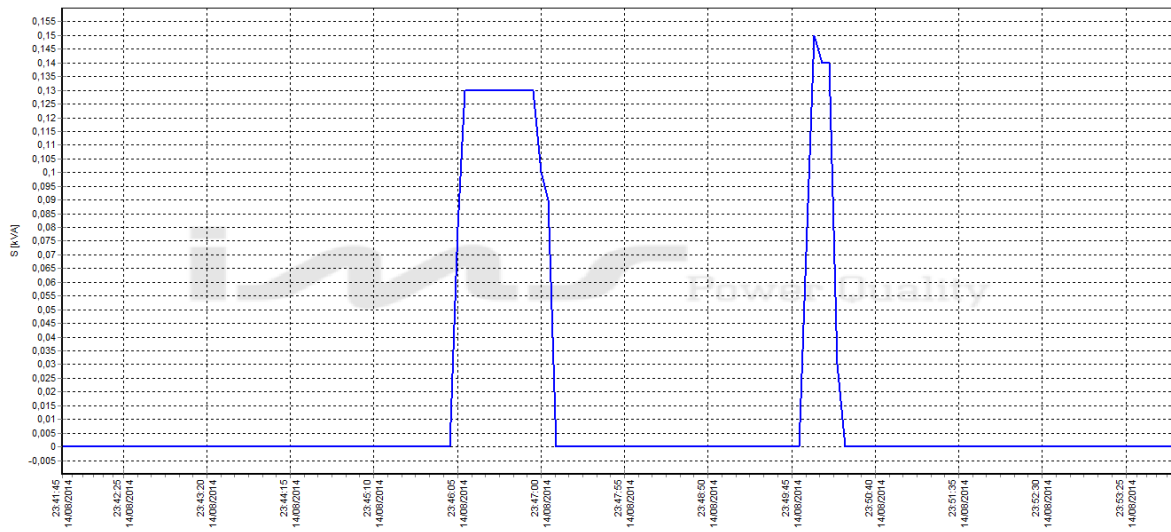


**Figura 74 - Variação da potência reativa do Gerador 2 na Atividade 5.**



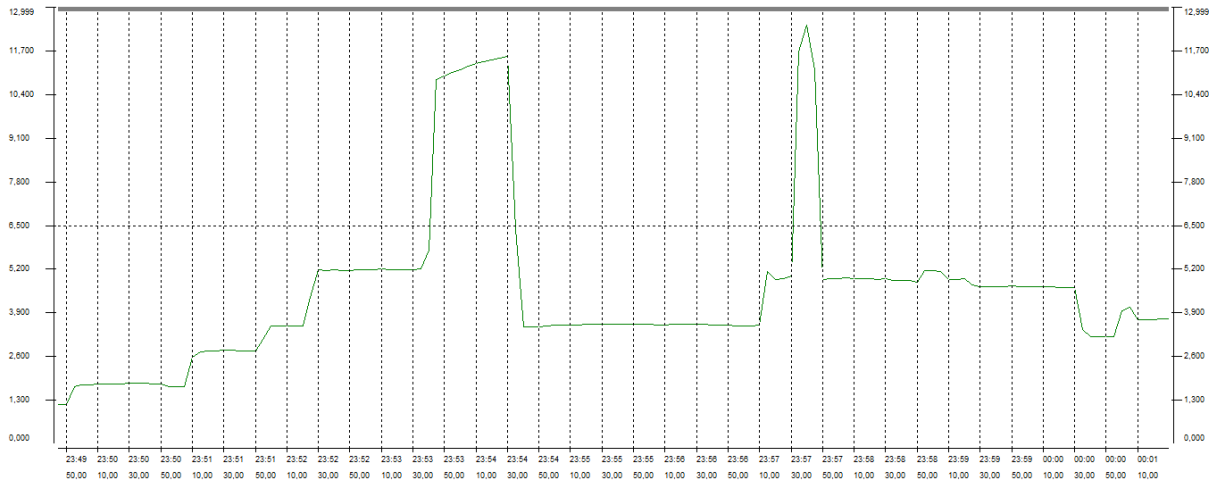
Fonte: IMS

**Figura 75 - Variação da potência aparente do Gerador 2 na Atividade 5.**



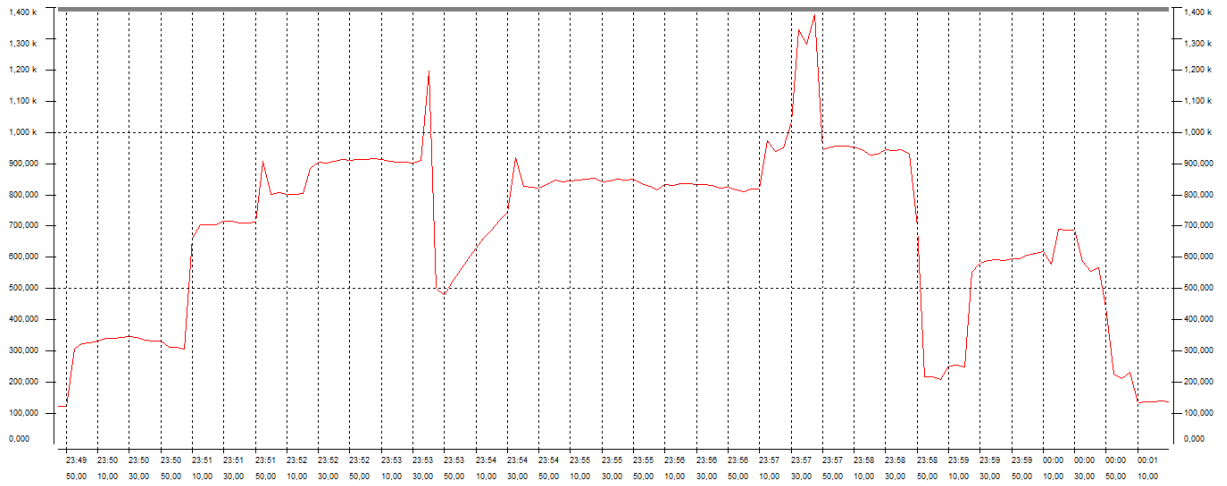
Fonte: IMS

**Figura 76 - Variação da corrente de linha do barramento infinito na Atividade 5.**



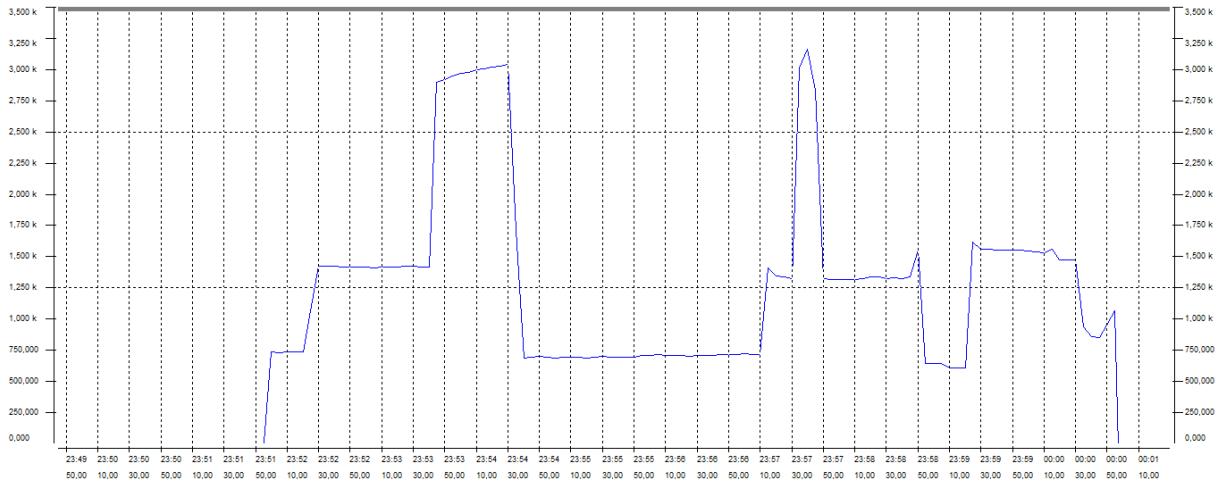
Fonte: EMBRASUL

**Figura 77 - Variação de potência ativa do barramento infinito na Atividade 5.**



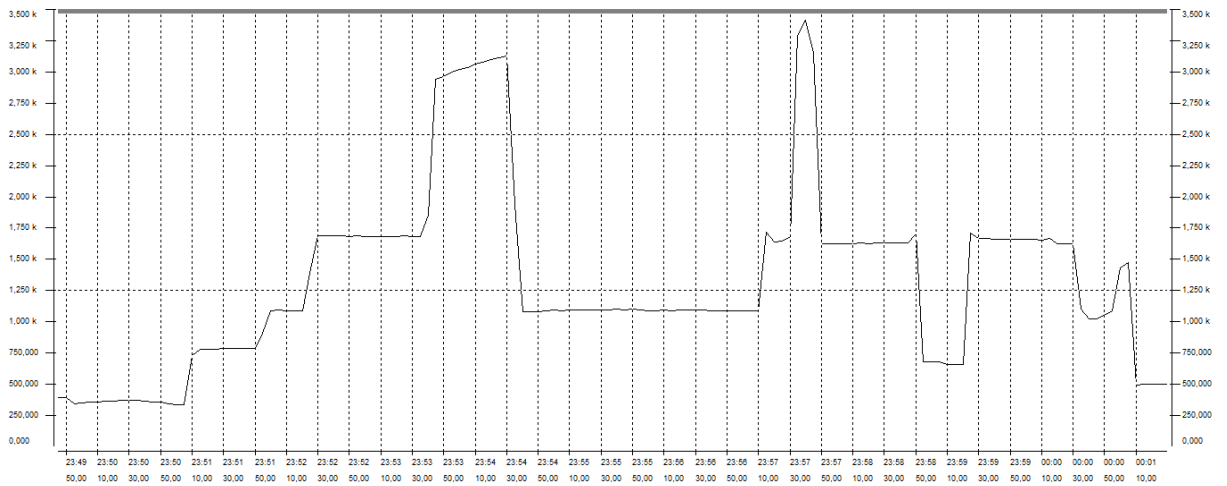
Fonte: EMBRASUL

**Figura 78 - Variação de potência reativa do barramento infinito na Atividade 5.**



Fonte: EMBRASUL

**Figura 79 - Variação de potência aparente do barramento infinito na Atividade 5.**



Fonte: EMBRASUL