

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GIANEY FERNANDES DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
UTILIZANDO GERADOR TRIFÁSICO MOVIDO A ETANOL E A  
DIESEL**

VIÇOSA  
2012

GIANEY FERNANDES DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
UTILIZANDO GERADOR TRIFÁSICO MOVIDO A ETANOL E A  
DIESEL**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Tarcísio de Resende.

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto P. Lopes.

VIÇOSA  
2012



**GIANEY FERNANDES DA SILVA**

**ESTUDO COMPARATIVO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
UTILIZANDO GERADOR TRIFÁSICO MOVIDO A ETANOL E A  
DIESEL**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 10 de Julho de 2012.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Orientador**  
Universidade Federal de Viçosa

---

**Prof. Dr. Roberto Precci Lopes – Co-orientador**  
Universidade Federal de Viçosa

---

**M.Sc. Hamilton Oliveira Reis - Membro**  
Universidade Federal de Viçosa

*“Criamos a época da velocidade, mas nos sentimos enclausurados dentro dela. A máquina, que produz abundância, tem nos deixado em penúria. Nossos conhecimentos fizeram-nos céticos; nossa inteligência, empedernidos e cruéis. Pensamos em demasia e sentimos bem pouco. Mais do que máquinas, precisamos de humanidade. Mais do que de inteligência, precisamos de afeição e doçura. Sem essas virtudes, a vida será de violência e tudo será perdido.”*

*Charles Chaplin (Trecho de: O último discurso de O grande ditador)*

*Dedico essa monografia a todos aqueles que de alguma forma fazem todos os dias valerem a pena.*

## *Agradecimentos*

- A FAPEMIG (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pela bolsa de iniciação científica e financiamento do projeto APQ 1529, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível;
- Ao professor Roberto Precci Lopes (DEA) e ao funcionário Hamilton Oliveira Reis (DEA) por todo o apoio prestado;
- Ao professor Juarez de Sousa e Silva (DEA) por ter acreditado no sucesso do projeto;
- Aos colaboradores Kattia Solís Ramírez, Pedro Casanova Treto e Gilberto Garcia Bonato Filho pela fundamental ajuda;
- A Deus que esteve comigo em todos os momentos, principalmente naqueles em que estive triste e esgotado, não me deixando desistir nas inúmeras vezes que pensei que tudo seria em vão;
- A meus pais, que não pouparam esforços para me ajudar;
- Ao meu irmão, que me alegrou com a sua alegria;
- A minha namorada, que por tantas vezes abriu mão de minha presença para que eu pudesse estudar e que me acalmou nas diversas vezes que tudo dava errado;
- Aos mestres, que tão solícitamente desfizeram minhas dúvidas;
- Aos amigos, que me ouviram quando nada podia ser feito;
- A todos que fizeram ou fazem parte do meu universo, que de uma ou outra forma estiveram comigo e me ajudaram a crescer como pessoa e futuro profissional;
- Finalmente, agradeço aqueles que passaram por mim como uma brisa rápida, deixando em meu coração uma doce lembrança;
- A cada um de vocês, deixo o meu muito OBRIGADO!!!!

## *Resumo*

Em muitas localidades a ausência de energia é o principal entrave ao desenvolvimento microrregional, fazendo com que muitos brasileiros vivam na penúria. A localização remota e isolada de algumas comunidades, a baixa densidade demográfica e o baixo poder aquisitivo das mesmas oneram os custos das redes de energia elétrica e desestimulam investimentos em eletrificação rural pelo setor elétrico. Além do mais, sistemas isolados de produção de energia baseados em combustíveis fósseis são altamente vulneráveis a conflitos internacionais, uma vez que os mesmos são diretamente responsáveis pelas alterações das taxas cambiais e, conseqüentemente, dos preços desses combustíveis.

Processos migratórios decorrentes da busca por mais conforto são comuns em regiões afastadas dos grandes centros urbanos, uma vez que a ausência de energia elétrica dificulta o acesso da população aos confortos da vida moderna e a expulsa de sua região em busca de melhores condições de bem-estar.

Não obstante da necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis na geração de energia elétrica e evitar processos migratórios deve-se levar em conta a importância de se reduzir a emissão de gases estufa para a atmosfera, sendo esses gerados principalmente pela queima dos combustíveis derivados do petróleo.

Como meio de contribuir de maneira positiva para a resolução dos problemas supracitados é que esse trabalho visa à análise da viabilidade de um sistema de geração de energia elétrica através do uso do combustível etanol. Para isso faz uso de grupos geradores de energia a etanol e a diesel, e analisa o comportamento de ambos mediante as variações de carga, bem como a relação de consumo de cada um, efetuando um comparativo entre os dois tipos de geradores.

Como resultado encontrou-se que os valores de consumo de combustível para ambos os geradores se mostraram adequados para suas respectivas potências. Também foi possível concluir que o baixo preço do etanol produzido na fazenda torna viável a produção de energia elétrica utilizando esse combustível.

## *Abstract*

In many places, the electric power lacking is the main obstacle to the development, leading a large number of Brazilians to live in a shortage way of life. The isolated and remote location of some communities, the low population density and low purchasing power burden the electric power networks cost and discourage investments in rural electrification by electricity sector. Moreover, isolated systems of energy production based on fossil fuels are highly vulnerable to international conflicts, since it is directly responsible by exchange rates variations and consequently by the fuels prices.

Migration processes caused by the search for more comfort are commons in regions located far from big cities, since the lack of electric power makes it difficult to the population to access some comforts introduced by the modern lifestyle, expulping people from their hometown, in search of better life conditions.

Not so far of the necessity to reduce the fossil fuels dependence in the electrical power generation and avoid migration processes, we should give more attention to greenhouse effect and reduce the emission of gases produced by fossil fuel burning and spread to the atmosphere.

As a way to contribute positively to solve the problems aforementioned, this work aims to analyze the viability of electric power generation based on ethyl alcohol fuel. To achieve it, it was used a group of two generators: the first one working with alcohol and another one working with diesel oil. Finally, varying the load and analyzing their fuel consumption, the behavior of both generators group were compared.

As a result it was found that the values of fuel consumption for both generators were suitable for their respective powers. It was also concluded that the low price of ethanol produced on the farm makes it feasible to produce electricity using this fuel.

## *Sumário*

1	Introdução .....	13
1.1	Geradores Síncronos Trifásicos .....	14
1.1.1	Introdução .....	14
1.1.2	Tipos de geradores síncronos .....	14
1.1.3	Circuito Equivalente do Gerador.....	17
1.1.4	Circuitos de Excitação de Campo.....	19
1.2	Dispositivos de Proteção e Acionamentos de Cargas.....	25
1.2.1	Introdução .....	25
1.2.2	Disjuntores Termomagnéticos.....	25
1.2.3	Contatores .....	28
1.2.4	Relés de Falta de Fase.....	29
1.3	Objetivo Geral.....	30
2	Materiais e Métodos .....	31
2.1	Materiais .....	31
2.2	Métodos .....	32
2.2.1	Testes Com o Gerador Movido a Etanol.....	37
2.2.2	Testes Com o Gerador Movido a Diesel.....	42
3	Resultados e Discussão.....	45
3.1	Gerador com Motor Movido a Etanol .....	45
3.2	Gerador com Motor Movido a Diesel.....	55
4	Conclusões .....	57

## *Lista de Figuras*

Figura 1 - (a) Estator do gerador síncrono de pólos girantes (b) Rotor de quatro pólos de um gerador de pólos girantes. ....	14
Figura 2 – Gerador síncrono de pólos fixos. ....	15
Figura 3 - (a) Armadura estacionária (b) Armadura girante. ....	16
Figura 4 – Circuito equivalente do gerador síncrono.....	17
Figura 5 – Fluxo versus corrente de campo. ....	18
Figura 6 – Diagrama fasorial para fator de potência unitário.....	19
Figura 7 – Diagrama fasorial para fator de potência atrasado.....	19
Figura 8 – Diagrama fasorial para fator de potência adiantado.....	19
Figura 9 – Configuração Shunt para gerador. ....	20
Figura 10 – Auto-excitação da máquina Shunt. ....	21
Figura 11 – Auto-excitação da máquina Shunt para diversos valores de $R_f$ . ....	22
Figura 12 – Conjunto excitatriz - gerador trifásico - regulador de tensão. ....	23
Figura 13 – Circuito de excitação com excitatriz piloto. ....	24
Figura 14 – Circuito de excitação sem excitatrizes. ....	25
Figura 15 – Lâmina bimetálica. ....	26
Figura 16 – Disparador magnético de curto-circuito. ....	26
Figura 17 – Exemplo de curva de disjuntor. ....	27
Figura 18 – (a) Contatos de força do contator (b) Contatos auxiliares do contator.....	28
Figura 19 – Relé de falta de fase. ....	29
Figura 20 – Quadro de comando e proteção.....	32
Figura 21 – Diagrama elétrico do painel de comando e proteção. ....	33
Figura 22 – Conjunto para dissipação da energia do gerador. ....	34
Figura 23 – Ligação em triângulo das resistências elétricas. ....	34
Figura 24 – Painel de disjuntores tripolares. ....	35
Figura 25 – Eletrodo de aterramento. ....	36
Figura 26 – Medidor digital de energia elétrica. ....	36
Figura 27 – Esquema de instalação do medidor digital de energia elétrica. ....	37
Figura 28 – Gerador trifásico com o motor movido a etanol. ....	37
Figura 29 – Ligação dos bornes do gerador ao painel de comando e proteção.....	38
Figura 30 – Possíveis esquemas de ligação das bobinas do gerador WEG.....	38
Figura 31 – Terminais do gerador WEG.....	38
Figura 32 – Medidor de nível de combustível.....	39

Figura 33 – Medidor universal de grandezas (MUG).....	40
Figura 34 – Esquema de ligação do medidor universal de grandezas (MUG).....	40
Figura 35 – Motor trifásico de 1,5 cv.....	41
Figura 36 – Motor trifásico de 5 cv. ....	42
Figura 37 – Gerador trifásico com motor movido a diesel. ....	43
Figura 38 – Medidor de nível de combustível para gerador a diesel. ....	43
Figura 39 – Excitatriz Shunt acoplada ao gerador.....	44
Figura 40 – Acelerador manual do sistema à diesel. ....	44
Figura 41 – Tensão de fase $V_{an}$ para 4500 W. ....	45
Figura 42 – Tensão de fase $V_{an}$ para 10500 W. ....	46
Figura 43 – Tensão de fase $V_{an}$ para 16500 W. ....	46
Figura 44 – Tensão de fase $V_{an}$ para 22500 W. ....	47
Figura 45 – Tensão de fase $V_{an}$ para 30000 W. ....	48
Figura 46 – Tensão de fase $V_{an}$ .....	51
Figura 47 – Variação da potência ativa trifásica. ....	52
Figura 48 – Variação temporal do fator de potência.....	52

### ***Lista de Tabelas***

Tabela 1 – Resultados para os testes com cargas resistivas com gerador movido a etanol. ....	49
Tabela 2 – Comparativo do custo do kWh. ....	50
Tabela 3 – Tempo versus Carga Alimentada. ....	51
Tabela 4 – Resultados dos testes com cargas indutivas. ....	53
Tabela 5 – Resultados do teste com gerador com motor movido a diesel. ....	55

# *1 Introdução*

Acender uma lâmpada, ligar o chuveiro, passar roupa e usar o forno microondas são algumas das diversas tarefas corriqueiras que realizamos durante nosso cotidiano, sem parar para pensar qual o real custo da energia elétrica que trás todo o conforto sobre o qual a nossa sociedade se sustenta. Desde que se concretizou a ideia dos benefícios que a energia elétrica poderia trazer a humanidade se preocupa em investigar maneiras de manipular as fontes disponíveis de energia a fim de tirar delas o maior proveito possível e por isso o homem anda a passos largos no caminho da exploração desenfreada da natureza, porém tateia no escuro na trilha do desenvolvimento sustentável.

Nossa sociedade aprendeu a lidar com diversas fontes de energia disponíveis, porém crescemos no campo energético baseados em fontes não renováveis, que um dia tendem a entrar em colapso. Mesmo os sistemas hidrelétricos sendo renováveis se confrontam com os entraves ambientais, uma vez que a sua implantação implica em destruição ambiental em grande escala.

Apesar de nosso país ter disponível para uso uma gama de usinas hidrelétricas nos deparamos ainda com a necessidade de complementar nosso parque energético com fontes fósseis, o que torna o preço da energia elevado, e aliado as grandes distâncias, inviabiliza a chegada de energia elétrica a comunidades interioranas.

Necessita-se apostar em fontes de energia renováveis que reduzam a dependência energética de variações cambiais internacionais. Ao encontro dessa necessidade se apresenta a utilização de álcool etílico (etanol), sendo o nosso país possuidor de tecnologia moderna para a produção do mesmo. Segundo Silva, 2007 [11], é possível produzir esse combustível a baixo custo utilizando micro destilarias, havendo como consequência redução dos custos com linhas de transmissão e riscos de acidentes ambientais. Além do mais, nesse sistema de produção isolada, o combustível poderia ser produzido pela comunidade, trazendo conforto e bem-estar a todos.

## 1.1 Geradores Síncronos Trifásicos

Antes de proceder o estudo do trabalho aqui proposto, será feita uma rápida introdução do gerador síncrono, a principal máquina utilizada na geração de energia elétrica, bem como dos acessórios necessários para o seu perfeito funcionamento.

### 1.1.1 Introdução

Desde os primórdios da civilização humana existe a preocupação em transformar as diversas fontes e formas de energias com a finalidade de se obter conforto e bem-estar. Quando a meta é obter energia elétrica, como exemplo, a fornecida pela força da água em uma usina hidrelétrica ou pelo vapor em uma usina termelétrica pode-se utilizar dispositivos conversores eletromecânicos, popularmente conhecidos como geradores elétricos.

Os geradores elétricos podem ser encontrados nos mais diversos tipos e potências. Eles podem ser síncronos, assíncronos e de corrente contínua (CC). Porém pela dificuldade de realizar o controle da tensão e da frequência em um gerador assíncrono, que necessita de uma fonte auxiliar de energia reativa, e pelo fato de um gerador CC não fornecer tensão alternada, bem como possuir elevado custo em relação aos demais, utilizam-se os geradores síncronos.

### 1.1.2 Tipos de geradores síncronos

Os geradores síncronos podem ser divididos em dois grupos: geradores síncronos de pólos girantes, Figura 1, e geradores síncronos de pólos fixos, Figura 2.

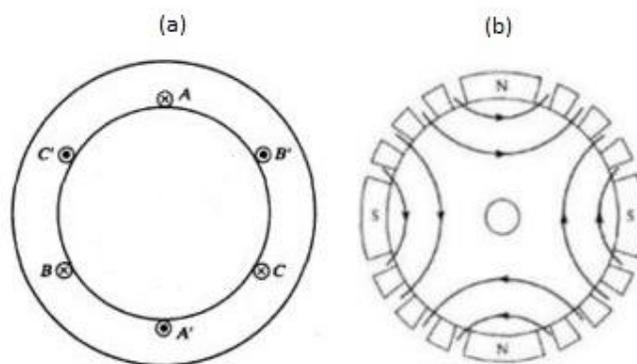


Figura 1 - (a) Estator do gerador síncrono de pólos girantes (b) Rotor de quatro pólos de um gerador de pólos girantes.

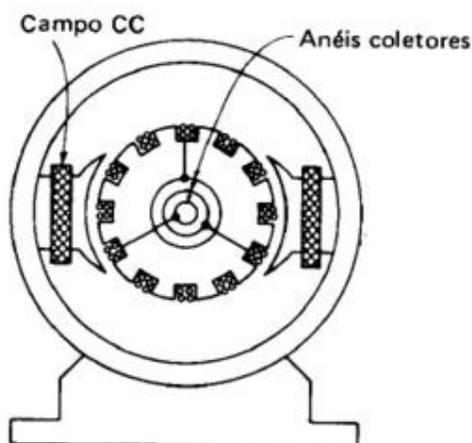


Figura 2 – Gerador síncrono de pólos fixos.

Na Figura 1 podemos ver o gerador síncrono de pólos girantes. Nesse tipo de gerador estão presentes no estator os enrolamentos trifásicos da armadura, que são fixos, e o enrolamento de campo no rotor, que é móvel, o qual recebe tensão contínua através de escovas e anéis deslizantes. Na Figura 2 podemos visualizar o gerador síncrono trifásico de pólos fixos. Nesse gerador as tensões trifásicas geradas na armadura girante são fornecidas para as cargas através de anéis deslizantes e escovas, enquanto o enrolamento de campo fica posicionado no estator e é excitado diretamente através de seus terminais, diferentemente do gerador da Figura 1.

O gerador mostrado na Figura 1 apresenta larga utilização em centrais elétricas. Geralmente o uso da máquina da Figura 2 fica restrito a baixas potências, o que não é uma característica desejável em sistemas de geração de energia elétrica. A razão disso segundo Kosow, 1979 [10], pode ser explicada pelos seguintes fatos:

- Quanto maior a potência a ser fornecida pelo gerador maior a quantidade de cobre que o mesmo usa e conseqüentemente maior será a profundidade necessária das ranhuras que acomodam os enrolamentos da armadura. Conforme pode ser visto na Figura 3, à medida que a profundidade das ranhuras em uma máquina de armadura estacionária aumenta mais forte os dentes da armadura se tornam, sendo capazes de suportar a força centrífuga de maneira melhor. No gerador da Figura 2 à medida que a potência aumenta os dentes da armadura se tornam mais fracos, logo para a utilização de máquinas de pólos fixos se faz necessário a confecção de enrolamentos mais complexos.

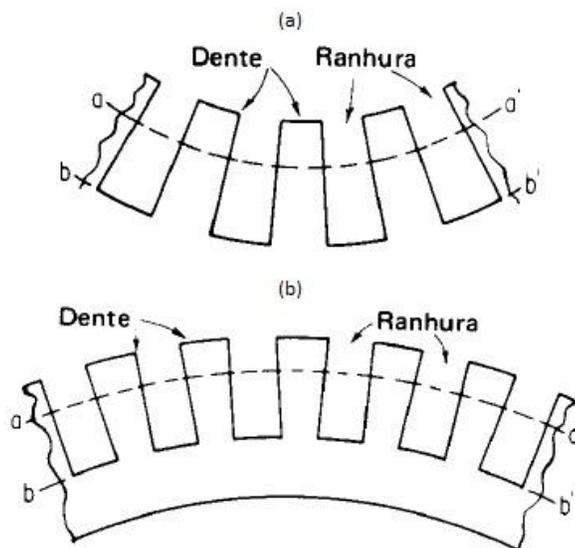


Figura 3 - (a) Armadura estacionária (b) Armadura girante.

- O fluxo magnético criado pelo campo de origem contínua deve passar pelo núcleo da armadura e pelos seus enrolamentos. No caso de um gerador de armadura estacionária a relutância que se opõe ao fluxo supracitado é menor do que a mesma existente em um gerador de armadura girante, proporcionando um melhor aproveitamento do fluxo magnético e conseqüentemente maior geração de energia elétrica.
- Para geradores de alta potência a armadura dos mesmos carrega correntes de valores razoáveis e logo se deve ter cuidado com a isolamento entre as fases. Para geradores de armadura estacionária o problema de isolamento entre as fases é facilmente resolvido pela isolamento das bobinas entre si. Para geradores de armadura girante existe o inconveniente de se garantir que os anéis deslizantes mantenham distância suficiente entre si para evitar arcos voltaicos e faiscamentos entre os anéis. Além do mais se deve garantir que não haja fuga de corrente entre os anéis deslizantes e o eixo do rotor, probabilidade essa que é drasticamente reduzida quando no rotor carrega o campo CC.
- Outro fator importante que desestimula o uso de geradores de armadura girante é o número de escovas necessárias ao funcionamento do mesmo. Para esse gerador são necessários de 3 a 4 pares de escovas, enquanto que para o gerador de armadura estacionária são necessários apenas dois pares de escovas responsáveis por conduzir tensão contínua ao circuito de campo do rotor, reduzindo assim a necessidade e custos de manutenção.

- E por fim rotores que possuem enrolamento de campo móvel são mais leves e mais fáceis de serem controlados devido à sua baixa inércia e outros fatores em relação ao alternador de pólos fixos.

### 1.1.3 Circuito Equivalente do Gerador

Segundo Chapman, 2002 [05], o circuito equivalente, por fase, do gerador síncrono pode ser visto na Figura 4:

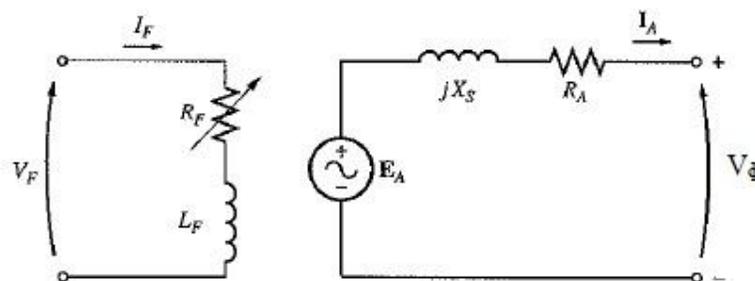


Figura 4 – Circuito equivalente do gerador síncrono.

Onde:

- $E_A$  é a tensão gerada da máquina síncrona, por fase;
- $V_\phi$  é a tensão terminal do gerador, por fase;
- $R_A$  e  $X_S$  são, respectivamente, a resistência de armadura e a reatância síncrona do gerador.

Quando uma fonte de força motriz primária aciona o eixo do gerador síncrono, que possui seu enrolamento de campo excitado em tensão contínua, pela Lei de Faraday, é induzida a tensão  $E_A$  na armadura, sendo que  $E_A$  depende basicamente de dois fatores, conforme indicado na equação (1).

$$E_A = k\omega\phi \quad (1)$$

Onde:

- $k$  é uma constante construtiva da máquina, que depende da construção do enrolamento;
- $\omega$  é a velocidade do rotor do gerador;

- $\phi$  é o fluxo que cruza o entreferro e enlaça o estator (armadura) da máquina síncrona, produzido no circuito de campo CC, que se relaciona com a corrente de campo  $I_F$  de acordo com a Figura 5.

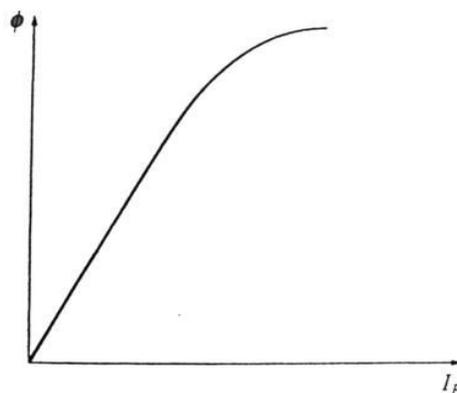


Figura 5 – Fluxo versus corrente de campo.

Para o caso do gerador síncrono de pólos girantes, quando em seus terminais existe uma carga conectada, haverá a circulação de uma corrente  $I_A$ . Essa corrente gera um campo girante no estator que fornece um fluxo de dispersão no estator e outro que interage com o rotor, chamado de fluxo de reação de armadura. A combinação desses dois fluxos produz a reatância síncrona do gerador  $X_S$ . A tensão terminal  $V_\phi$  diferencia-se da tensão gerada pela queda de tensão na impedância de armadura  $R_A + jX_S$ .

A tensão terminal  $V_\phi$  do gerador síncrono pode ser expressa em termos dos outros elementos segundo a equação (2).

$$V_\phi = E_A - (R_A + jX_S)I_A \quad (2)$$

Baseado na equação (2) é possível descrever as relações fasoriais entre a tensão gerada e a tensão terminal para diferentes fatores de potências das cargas conectadas aos terminais do gerador. Nas Figuras 6 e 7 é possível notar que conforme o fator de potência varia de unitário a atrasado a tensão gerada por fase é maior que a tensão terminal na mesma fase. Na Figura 8 podemos ver que para um fator de potência adiantado o comportamento é contrário ao que pode ser visto nas Figuras 6 e 7. Portanto, quando se tem uma carga com fator de potência adiantado melhora-se consideravelmente a regulação de tensão do gerador.

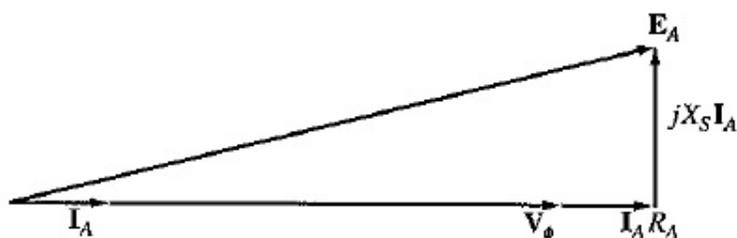


Figura 6 – Diagrama fasorial para fator de potência unitário.

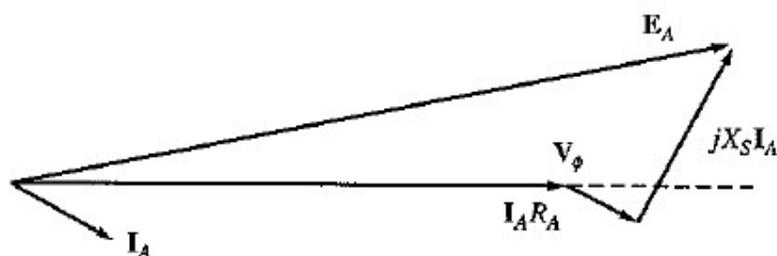


Figura 7 – Diagrama fasorial para fator de potência atrasado.

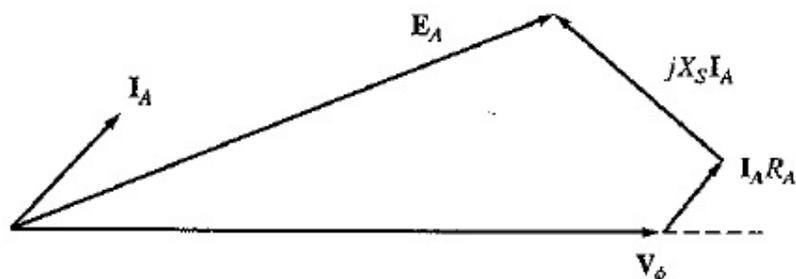


Figura 8 – Diagrama fasorial para fator de potência adiantado.

#### 1.1.4 Circuitos de Excitação de Campo

Conforme discutido anteriormente os geradores síncronos necessitam de tensão contínua em seu circuito de campo para que haja fornecimento de tensão alternada em seus terminais. Existem diversas formas para a obtenção dessa tensão, sendo a escolha de uma delas relacionada principalmente com o grau de automatização do gerador. Para máquinas antigas é comum encontrar geradores de CC Shunt trabalhando como excitatrizes. Para alternadores atuais é comum encontrar circuitos de excitação que se utilizam de recursos da eletrônica de potência para fornecer tensão contínua ao circuito de campo da máquina síncrona [03].

A configuração Shunt é utilizada principalmente devido ao fato que não se necessita de uma fonte de tensão contínua para controlar a corrente de campo, a mesma é obtida através das escovas do próprio gerador, conforme pode ser visto na Figura 9.

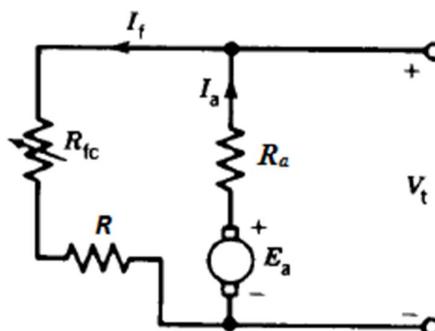


Figura 9 – Configuração Shunt para gerador.

Na Figura 9 é possível observar os seguintes componentes na configuração Shunt:

- $R_a$  é a resistência da armadura;
- $I_f$  é a corrente de campo;
- $I_a$  é a corrente de armadura;
- $R$  é a resistência da bobina de campo;
- $R_{fc}$  é o reostato usado para controlar a tensão de saída do gerador;
- $V_t$  é a tensão terminal do gerador;
- $E_a$  é a tensão gerada na armadura;

A partir da Figura 9 podemos deduzir algumas relações entre as grandezas, como pode ser visto nas equações (3) e (4).

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad (3)$$

$$V_t = I_f (R_{fc} + R) \quad (4)$$

Quando se considera a queda de tensão sobre a resistência de armadura desprezível, se obtém a curva de auto-excitação do gerador CC Shunt, como pode ser visto na Figura 10.

O processo de auto-excitação se inicia no momento em que o rotor do gerador CC Shunt é girado. Nesse instante, o fluxo de campo residual faz surgir nos terminais do gerador

uma pequena tensão, que por sua vez fará surgir uma corrente de campo que reforçará o fluxo existente, implicando em um novo aumento de tensão e conseqüentemente em outro aumento de corrente de campo. Esse ciclo continua até que as curvas expressas pelas equações (3) e (4) se interceptem, sendo esse o ponto de operação de gerador na ausência de cargas. Quando há cargas conectadas aos terminais do gerador ocorre reação de armadura, o que implica em um deslocamento do ponto de operação do gerador para um valor abaixo, conforme a carga aumenta.

Observando a Figura 10 pode-se notar que quanto maior for o valor de  $R_f$ , que equivale à soma de  $R$  e  $R_{fc}$ , mais baixo será o ponto de interseção entre (3) e (4) e conseqüentemente menor será o ponto de operação do gerador.

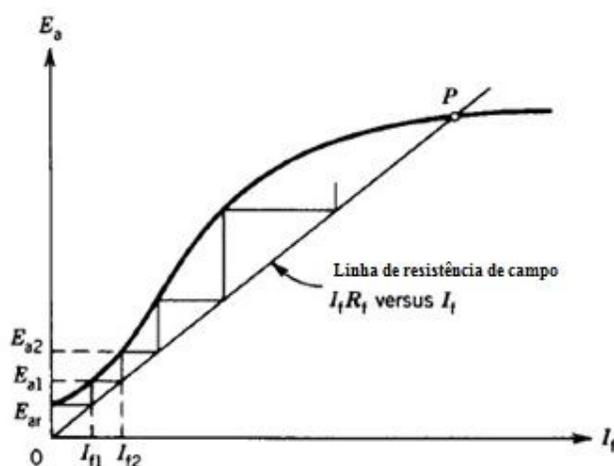


Figura 10 – Auto-excitação da máquina Shunt.

É importante garantir que  $R_f$  fique abaixo de um valor conhecido como resistência crítica de campo, representado por  $R_{f3}$  na Figura 11. Para valores de  $R_f$  superiores ao valor de resistência crítica, não é possível realizar a auto-excitação do gerador CC Shunt.

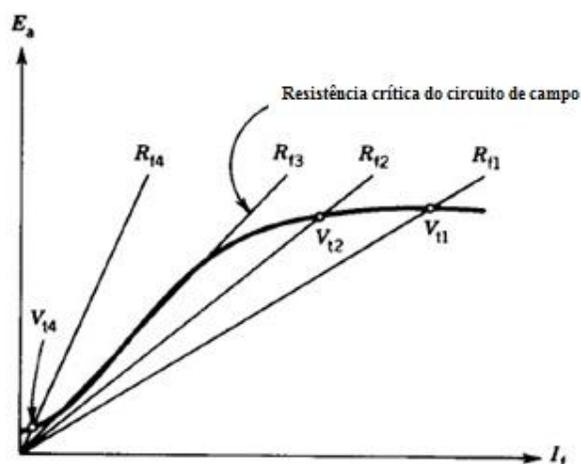


Figura 11 – Auto-excitação da máquina Shunt para diversos valores de  $R_f$ .

Outro importante fator que afeta a auto-excitação é a polaridade das bobinas de campo que devem estar ligadas de acordo com a polaridade das bobinas da armadura. Deve-se estar atento para que o fluxo produzido pela bobina de campo reforce o fluxo residual, e não o reduza. Porém se as bobinas de campo estiverem conectadas de forma correta e não houver auto-excitação, uma possível causa pode ser a ausência de fluxo residual, o que pode ser facilmente resolvido com o uso de uma fonte de tensão contínua no circuito de campo apenas para gerar fluxo residual, sendo dispensável o seu uso depois.

Para geradores modernos, a excitação do campo de um gerador síncrono se baseia no uso de controladores de tensão em conjunto com alternadores trifásicos e retificadores trifásicos a diodo. Basicamente a regulação de tensão funciona da seguinte forma: O controlador de tensão detecta a voltagem de saída dos terminais do gerador trifásico e a compara com o valor esperado. Baseado no erro encontrado esse sistema fornece em seus terminais de saída uma tensão contínua que é usada para alimentar o circuito de campo do alternador trifásico. Esse por sua vez possui sua saída alternada conectada ao retificador trifásico a diodos, que fornece a tensão contínua que o circuito de campo do gerador trifásico necessita para seu funcionamento. O conjunto supracitado pode ser visto na Figura 12.

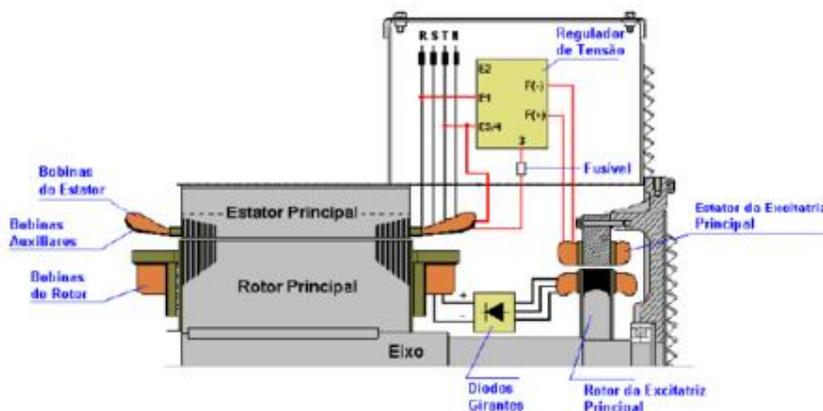


Figura 12 – Conjunto excitatriz - gerador trifásico - regulador de tensão.

No sistema de excitação supracitado o diferencial em relação aos geradores de campo estacionário se baseia no fato que a excitatriz deixa de ser uma máquina CC para ser um alternador. Uma vantagem desse tipo de sistema é que não é necessário utilizar nenhuma escova na confecção do gerador, pois a armadura do alternador da excitatriz se localiza sobre o eixo do gerador trifásico, bem como seu circuito de retificação, e seu circuito de campo se localiza fixado sobre o estator do gerador trifásico. Logo a tensão contínua que deve ser fornecida ao circuito de campo do gerador é produzida no mesmo eixo onde se encontra esse circuito, dispensando o uso de escovas.

Em adição ao sistema de excitação proposto no parágrafo anterior é possível também utilizar uma excitatriz auxiliar conhecida por excitatriz piloto. Essa, por sua vez nos permite a não dependência de qualquer fonte de potência externa para a excitação do gerador. A mesma se caracteriza por uma máquina CA de armadura estacionária e pólo formado por um ímã permanente. O movimento do rotor causado pela máquina primária produz tensão alternada em sua armadura, que por sua vez possui sua saída retificada por um retificador trifásico, cuja saída contínua alimenta o circuito de campo da excitatriz principal. Pode-se visualizar o esquema do circuito de excitação na Figura 13.

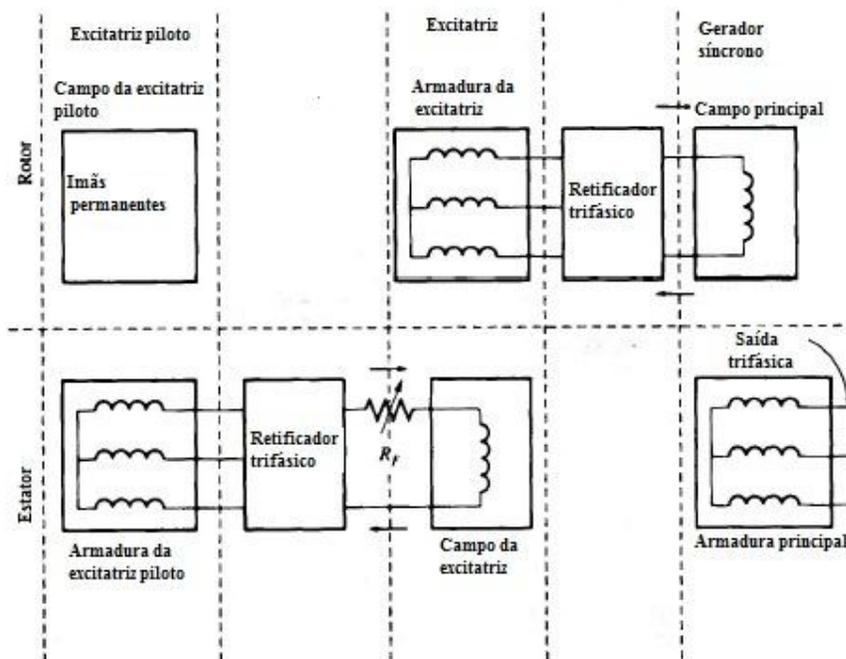


Figura 13 – Circuito de excitação com excitatriz piloto.

Ainda pode-se utilizar circuitos de excitação de campo que não empregam excitatrizes. Esses circuitos são constituídos basicamente de um controlador de tensão em conjunto com um retificador trifásico controlado, geralmente a tiristores. Nesse sistema a tensão terminal do gerador é fornecida simultaneamente ao controlador de tensão e ao retificador trifásico. O controlador realiza a comparação do valor esperado com o valor encontrado na saída do gerador e de acordo com o valor encontrado de erro ajusta o ângulo de disparo dos tiristores de modo a promover em sua saída uma maior ou menor tensão contínua, sendo essa conectada ao circuito de campo do gerador [04]. O modelo desse circuito pode ser visualizado na Figura 14. Esse método de excitação apresenta como vantagens a redução do comprimento da unidade geradora, bem como a redução de problemas de alinhamento de eixos e mancais, porém apresenta como desvantagem a necessidade do uso de escovas e anéis deslizantes.

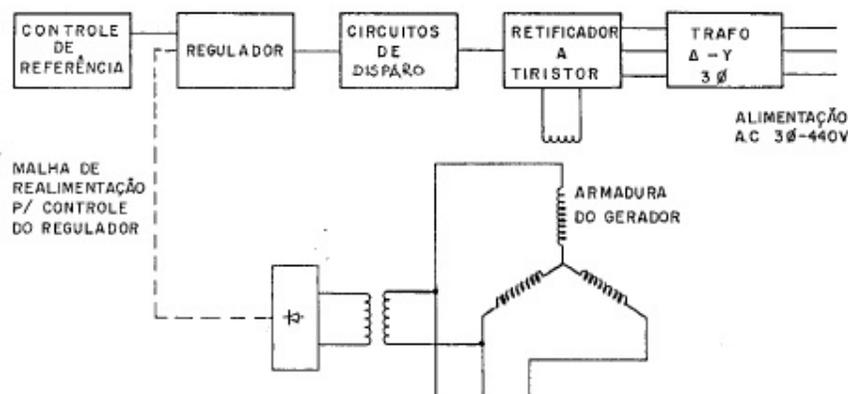


Figura 14 – Circuito de excitação sem excitatrizes.

## 1.2 Dispositivos de Proteção e Acionamentos de Cargas

### 1.2.1 Introdução

É uma necessidade de todo o sistema elétrico que o mesmo possua proteção adequada que suporte sua corrente de operação, mas que tenha a capacidade de protegê-lo de eventuais falhas que possam causar efeitos destrutivos, tais como derretimento da isolação dos cabos e fusão dos mesmos, bem como danos em geradores e nos demais elementos constituintes do sistema elétrico. Comumente são utilizados para a finalidade supracitada dispositivos de comando e proteção, tais como contadores, disjuntores termomagnéticos, fusíveis, relés de falta de fase, entre outros.

### 1.2.2 Disjuntores Termomagnéticos

Os disjuntores termomagnéticos são dispositivos destinados à proteção de equipamentos elétricos, bem como ao acionamento dos mesmos e são definidos segundo os seus valores nominais de tensão e corrente. Basicamente esse dispositivo deve ser capaz de proteger o circuito no qual está inserido quanto a duas possíveis situações: curto-circuito e sobrecarga. O primeiro problema consiste de um aumento súbito de corrente, chegando geralmente a valores muito altos, enquanto o segundo problema consiste em uma corrente de valor superior a nominal, mas inferior ao valor da de curto-circuito. No caso de qualquer uma das situações anteriores o disjuntor deve estar apto a interromper a passagem de corrente pelo circuito, evitando assim possíveis danos aos condutores e aos demais componentes da instalação elétrica. Portanto o disjuntor apresenta a função de comando, deixando passar a

corrente nas condições normais, e função de proteção em condições anormais de corrente, interrompendo o seu fluxo.

Para que o dispositivo seja capaz de realizar a proteção do circuito elétrico nas situações descritas acima, o mesmo conta com dois mecanismos: uma lâmina bimetálica e um disparador magnético de curto-circuito. O primeiro mecanismo supracitado geralmente é constituído de duas lâminas de coeficientes de dilatação diferentes, nas quais a passagem de corrente superior a nominal do disjuntor provoca deformação das lâminas e consequentemente o desarme do dispositivo. Um exemplo do processo de deformação de uma lâmina bimetálica pode ser visto na Figura 15.

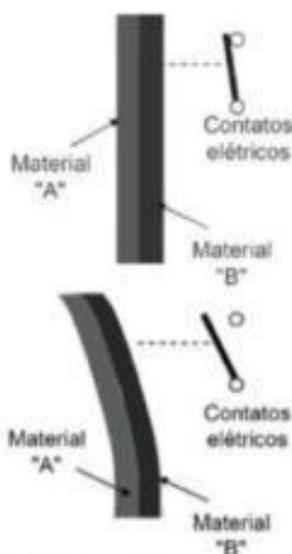


Figura 15 – Lâmina bimetálica.

Quanto ao segundo mecanismo citado no parágrafo anterior, o mesmo é constituído de um condutor envolto em um núcleo magnético com uma parte móvel, conforme pode ser visto na Figura 16. Quando do acontecimento de um curto-circuito a parte móvel desse do eletroímã é atraída e provoca o desarme do disjuntor. No momento desse desarme há o surgimento de um arco elétrico que é dissipado pela câmara de extinção de arco.

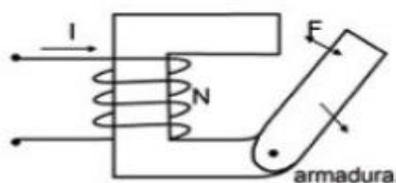


Figura 16 – Disparador magnético de curto-circuito.

Apesar da situação de sobrecarga ser indesejável a qualquer sistema, em algumas situações a mesma é admissível por curtos intervalos de tempo, como por exemplo, na partida de motores de indução. É necessário que o projetista do sistema esteja atento aos valores de corrente de partida de motores, bem como ao tempo de duração da mesma, e para essa finalidade pode ser consultada as curvas do disjuntor, conforme pode ser exemplificada na Figura 17.

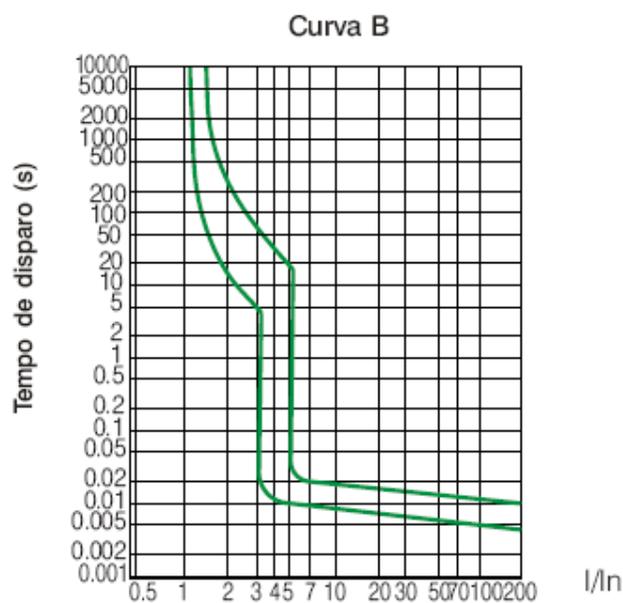


Figura 17 – Exemplo de curva de disjuntor.

Esse conjunto de curvas trás em seu eixo horizontal a razão entre a corrente que cruza o disjuntor e o valor nominal de corrente desse dispositivo e no seu eixo vertical o tempo necessário para que haja o desarme do dispositivo, sendo que a curva interna representa pontos de não atuação do disjuntor e a curva externa representa os pontos de atuação. Analisando o conjunto de curvas supracitado é possível perceber a importância de escolher o disjuntor que suporte a corrente de partida do motor a ser utilizado, pois do contrário o dispositivo irá se desarmar antes que o motor acabe de partir. Deve-se atentar para o fato de que o cálculo da duração da corrente de partida deve considerar fatores como potência do motor e carga conectada ao eixo do mesmo, uma vez que esse cálculo deve ser levado em consideração para o correto dimensionamento do disjuntor.

### 1.2.3 Contatores

O contator é o dispositivo de comando de mais larga utilização na indústria, especialmente no acionamento de motores e banco de capacitores. Segundo Nascimento, 2011 [06], um contator pode ser definido como um eletroímã em um invólucro que, quando energizado, atrai um conjunto de mecânico no qual está presa uma série de contatos elétricos, sendo normalmente três deles contatos abertos de força e os demais contatos abertos e/ou fechados, utilizados na lógica de comando.

O contator possui seus contatos divididos em dois grupos, sendo o primeiro deles o de contatos de força, responsável pela alimentação das cargas, e o outro o de contatos auxiliares. Quando o circuito de comando desse dispositivo é energizado pela aplicação de uma diferença de potencial em seus terminais, o estado de todos os contatos é invertido, sendo baseado nessa característica que os contatos auxiliares do tipo normalmente aberto encontram sua principal utilização, sendo seu uso como contatos de selo.

Em um diagrama de comandos elétricos o dispositivo contator possui a representação gráfica apresentada nas Figuras 18.

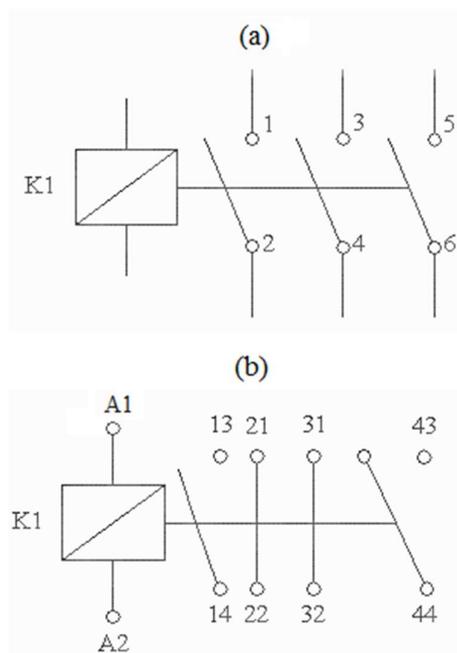


Figura 18 – (a) Contatos de força do contator (b) Contatos auxiliares do contator.

Portanto, o contator apresenta apenas função de comando e nunca de proteção.

### 1.2.4 Relés de Falta de Fase

Como discutido no item anterior, os contatos de força do contator são fechados apenas quando seu circuito de comando é energizado. Baseado nessa característica se pode agregar dispositivos de segurança ao circuito de comando do contator, dispositivos esses que sejam responsáveis por controlar a energização da bobina de campo do contator e logo o fornecimento de energia à carga nele conectada.

Com o intuito de controlar a qualidade da tensão fornecida para a carga, bem como proteger o sistema de eventuais faltas de tensão e desequilíbrios de fase, podemos fazer uso de um relé de falta de fase. Assim como o contator, esse dispositivo pode ser dividido em circuito de força e circuito de comando. O circuito de força é constituído por quatro entradas, sendo três delas para as fases e a quarta entrada para o neutro, sendo que o uso do ultimo é opcional. O circuito de comando é formado basicamente por um contato normalmente aberto, outro normalmente fechado e um contato comum. Além do mais, o dispositivo possui um trimmer cuja função é ajustar o percentual de tolerância de tensão em torno do valor nominal do sistema. Um exemplo desse dispositivo pode ser encontrado na Figura 19.



Figura 19 – Relé de falta de fase.

Para que o relé de falta de fase consiga controlar a energização da bobina de campo do contator, o seu circuito de comando deve ser colocado em série com o do contator. Isso é feito pela conexão do ultimo com o terminal do contato comum do relé, e com a conexão do terminal normalmente aberto do relé a uma fase de alimentação do sistema. Em condições normais de funcionamento do sistema, o contato comum do circuito de comando do relé é movido para a posição de normalmente aberto quando o circuito de força do mesmo é energizado. Porém, quando a tensão recebida pelo circuito de força possui valor que esteja fora da faixa de tolerância estabelecida no trimmer, ou acontece um desequilíbrio entre as

fases, o contato comum volta para a posição de normalmente fechado, abrindo o caminho do circuito de campo do contator e, conseqüentemente, os terminais de força do mesmo e logo cortando a corrente que flui para as cargas abastecidas pelo sistema.

### **1.3 Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo realizar a análise do custo e da viabilidade técnica do uso de grupo gerador a etanol em relação a um sistema tradicional de geração a diesel. O intuito é verificar a possibilidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis pela substituição dos mesmos pelo etanol, uma vez que o Brasil apresenta moderno desenvolvimento tecnológico para a produção desse combustível.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Analisar o funcionamento de geradores síncronos, visando os aspectos de tensão, fator de potência, frequência e outros, mediante as variações de carga entre o fator de potência indutivo e o unitário;
- Fazer um comparativo da produtividade em kWh/L e L/kWh entre o gerador que trabalha com etanol e o gerador que trabalha a diesel, analisando assim a viabilidade da implantação do sistema de geração a etanol em questão;
- Aplicar conhecimentos na área de comandos e proteção de circuitos elétricos;
- Realizar uma breve abordagem da produção de CO<sub>2</sub> em sistemas de geração de energia movidos a diesel em comparação com sistemas de geração de energia movidos a etanol.

## 2 *Materiais e Métodos*

### 2.1 *Materiais*

No desenvolvimento desse trabalho foram utilizados os seguintes componentes:

- Um gerador trifásico a etanol de 42 kVA/220 V, sendo o mesmo constituído de um motor de combustão de seis cilindros de uma caminhonete F1000, modificado para operar com etanol, associado a um gerador da marca WEG, modelo GTA162AIVD, ligado na configuração estrela, provido de sistemas de excitação de campo e controle de velocidade automáticos;
- Um gerador trifásico a diesel de 12,5 kVA/220 V, sendo o mesmo constituído de um motor de combustão de um cilindro da marca YANMAR associado a um gerador elétrico CARMOS, ligado na configuração estrela, provido de sistemas de controle de velocidade e excitação de campo manuais;
- Um medidor digital trifásico de energia elétrica, da marca NANSEN, de classe de exatidão B;
- Uma caixa de água de 1000 L;
- Um motor trifásico de 1,5 cv com as bobinas na configuração triângulo;
- Um motor trifásico de 5 cv com as bobinas na configuração triângulo;
- Um aparelho medidor de grandezas universais (MUG);
- Fios de diversas bitolas;
- Nove resistências monofásicas de 2000 W/220 V cada;
- Três resistências monofásicas de 2500 W/220 V cada;
- Três resistências monofásicas de 1500 W/220 V cada;
- Disjuntores;
- Contator;
- Relé de falta de fase;

- Lâmpadas sinaleiras;
- Botoeira;
- Caixa para montagem de painel de comando;
- Calhas para cablagem;
- Trilhos para montagem de componentes.

## 2.2 **Métodos**

Conforme foi descrito anteriormente, serão realizados testes em dois tipos de geradores trifásicos, sendo um deles movido a etanol e o outro movido a diesel. Para a realização dos mesmos se fez necessário a confecção de montagens que serão utilizadas para ambos os tipos de geradores.

Como primeiro passo do experimento foi realizado a confecção do painel elétrico contendo dispositivos de comando e proteção do gerador e das cargas elétricas a ele conectadas, como pode ser visto na Figura 20. Esse circuito é caracterizado pela presença de um disjuntor geral de 80 A, um relé de falta de fase para 220 V, um contator de capacidade nominal 100 A/220 V, quatro disjuntores do tipo DIN com valores nominais respectivos de 16 A, 32 A, 40 A e 50 A, quatro sinaleiras de 220 V e uma botoeira sem retenção.

Os disjuntores do tipo DIN diferem dos convencionais por apresentarem uma curva de atuação com tolerância de sobrecarga inferior, o que propicia o desarme em menor tempo.



Figura 20 – Quadro de comando e proteção.

Nesse circuito o disjuntor de 80 A, mostrado na Figura 20 abaixo do contator, exerce o papel de disjuntor geral para o circuito, sendo necessário que o mesmo seja ligado para energizar o restante do sistema. À bobina de comando do contator foram acoplados seus respectivos dispositivos de acionamento e proteção, sendo esses o relé de falta de fase, a botoeira, o contato de selo e um fusível de ação rápida de 500 mA. Em série com o circuito de força do contator foram colocados disjuntores DIN em paralelo, cujas saídas foram conectadas a carga suprida pelo sistema. Além do mais as mesmas saídas foram adicionadas sinaleiras para indicar a presença de tensão para as cargas elétricas. O diagrama elétrico do painel de comando acima pode ser visto na Figura 21 [02].

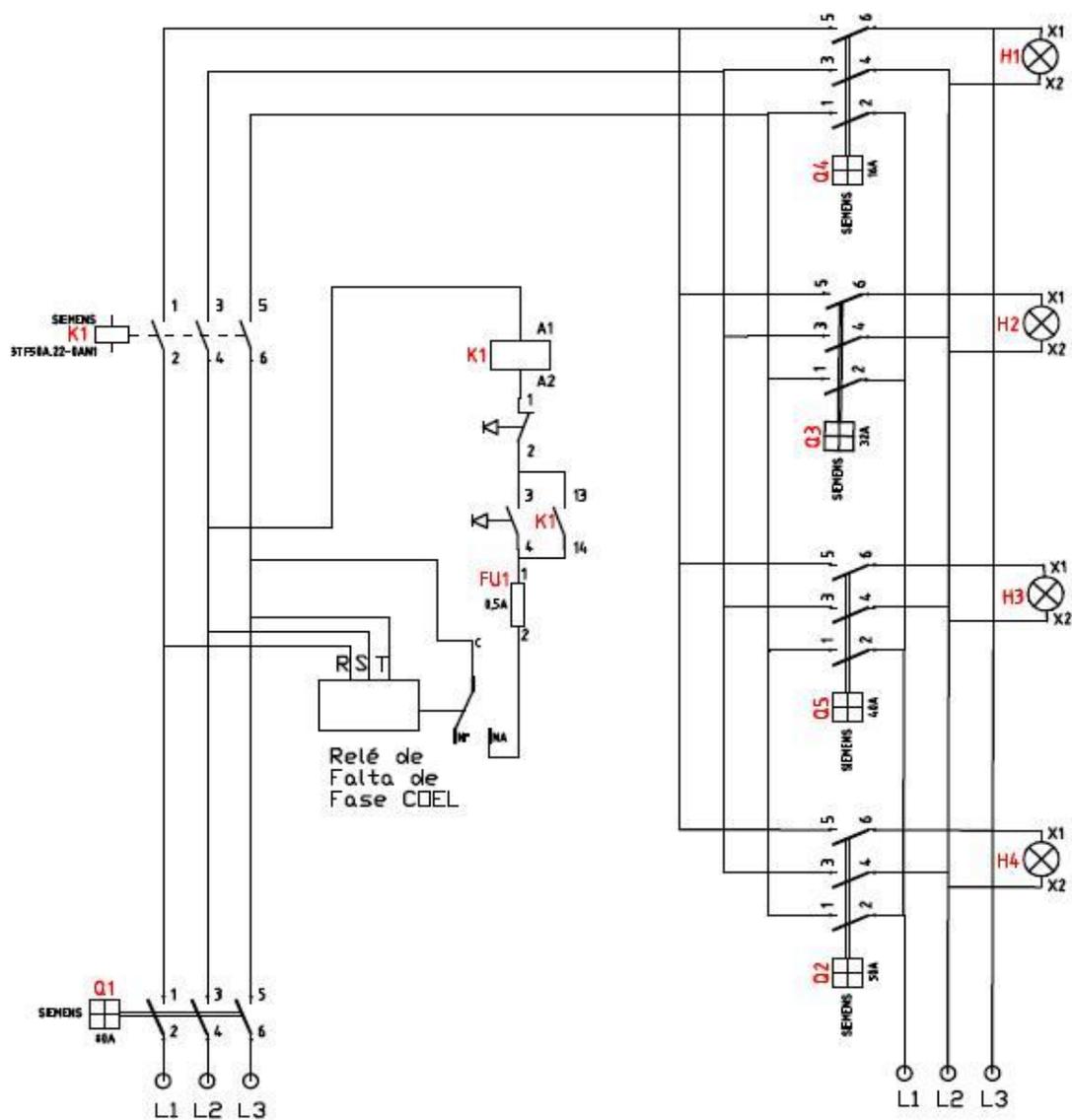


Figura 21 – Diagrama elétrico do painel de comando e proteção.

Como segunda etapa do experimento foi necessária a obtenção de cargas elétricas que pudessem dissipar a energia gerada pelos geradores e para isso foi criado um banco trifásico de resistências próprias para água. O banco consiste de cinco conjuntos trifásicos de resistências, sendo um conjunto de potência 4500 W, outro de 7500 W e os demais três de 6000 W, totalizando em 30000 W. Os conjuntos foram agrupados em um suporte de madeira que foi imerso em uma caixa d'água de 1000 L, cuja função é dissipar o calor gerado pelas resistências, uma vez que as mesmas são para uso restrito em água. O conjunto pode ser visto na Figura 22.



Figura 22 – Conjunto para dissipação da energia do gerador.

Devido ao fato de que o valor de tensão das resistências elétricas ser de 220 V, sendo essa a tensão de trabalho dos geradores, foi necessário realizar a ligação das resistências na configuração triângulo [07]. O diagrama elétrico das resistências pode ser visto na Figura 23.

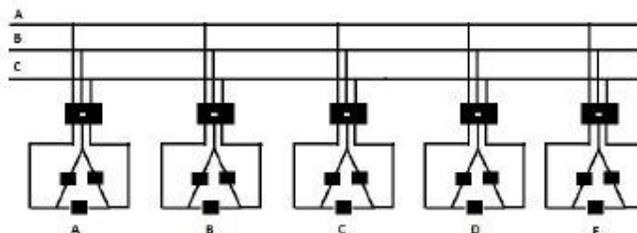


Figura 23 – Ligação em triângulo das resistências elétricas.

Como é possível notar pela Figura 23, conectado as resistências existem disjuntores tripolares, cuja função era selecionar quais conjuntos de resistências que se desejava alimentar, possibilitando assim a variação da carga suprida pelo sistema, sendo o conjunto de disjuntores montados sobre um painel de madeira, conforme pode ser visto na Figura 24.



Figura 24 – Pannel de disjuntores tripolares.

O valor nominal de cada disjuntor foi escolhido baseado no conjunto de resistências ao qual deveria estar conectado, se baseado na equação (5). Além do mais a cada valor calculado de corrente nominal se acrescentou 20% de tolerância, para garantir que os disjuntores não desarmassem devido a qualquer transitório de tensão. Após os devidos cálculos foram obtidos os seguintes valores: Um disjuntor de 25 A, três disjuntores de 20 A e um disjuntor de 15 A, usados nos conjuntos de 7500 W, 6000 W e 4500 W, respectivamente. Além do mais foram disponibilizados mais dois disjuntores de 15 A, para a ligação de eventuais cargas [01].

$$I = \frac{P}{220 \cdot \sqrt{3}} \quad (5)$$

Onde:

P é o valor de potência do conjunto de resistências a ser suprido pelo disjuntor.

Para ambos geradores a serem testados, realizou-se o aterramento do terminal de neutro dos mesmos, uma vez que cargas na configuração triângulo dispensam o uso do neutro dos alternadores, sendo recomendado o seu aterramento para que uma eventual corrente no mesmo, proveniente de desequilíbrios entre as fases, flua para a terra, contribuindo assim para a redução dos riscos para o sistema e para o operador do mesmo. O aterramento realizado pode ser constatado na Figura 25, na qual é possível observar a presença do eletrodo enterrado recebendo os cabos de neutro dos geradores trifásicos.



Figura 25 – Eletrodo de aterramento.

Como instrumento de medida da energia elétrica consumida pela carga foi instalado um medidor digital de energia, como pode ser visto na Figura 26, sendo o mesmo trifásico e capaz de ler o consumo das potências ativa e reativa. Esse dispositivo foi instalado na saída do painel de comando e proteção da Figura 20, e por sua vez a sua saída foi levada ao painel de disjuntores da Figura 24. Foi escolhido um medidor que atendesse ao requisito de classe B, ou seja, a diferença entre o valor registrado pelo mesmo e o valor real consumido é de no máximo 1%. Na Figura 27 é possível ver o esquema de ligação desse medidor. Nesse esquema os terminais identificados pelas mesmas letras equivalem aos pontos de entrada e saída de cada fase no medidor. Além do mais os dois terminais centrais devem ser conectados entre si e aterrados.



Figura 26 – Medidor digital de energia elétrica.

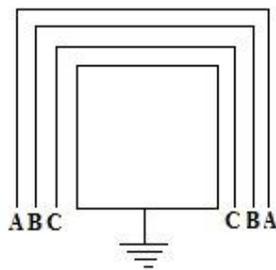


Figura 27 – Esquema de instalação do medidor digital de energia elétrica.

### 2.2.1 Testes Com o Gerador Movido a Etanol

Após a montagem da estrutura necessária para a realização dos testes iniciou-se a os mesmos, utilizando para tal o gerador trifásico a etanol exibido na Figura 28.



Figura 28 – Gerador trifásico com o motor movido a etanol.

Como primeiro passo realizou-se a ligação dos bornes de saída do gerador ao quadro de comando e proteção, como pode ser visto na Figura 29. Esse gerador possui doze terminais, sendo possível trabalhar nas tensões de 220/440 V nas configurações estrela paralelo/série ou 220 V na configuração triângulo série, conforme pode ser visto na Figura 30, sendo que o mesmo foi montado na configuração estrela paralelo. Para a configuração adotada é possível encontrar na Figura 31 a indicação dos terminais do gerador WEG. Ao lado dos bornes de saída da Figura 29 é possível notar a presença do controlador de tensão, que funciona segundo os princípios citados na seção 1.1.4.



Figura 29 – Ligação dos bornes do gerador ao painel de comando e proteção.

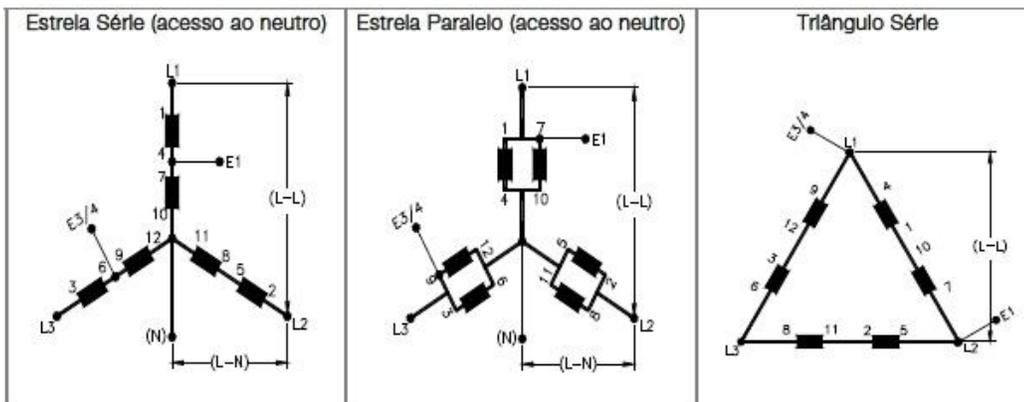


Figura 30 – Possíveis esquemas de ligação das bobinas do gerador WEG.

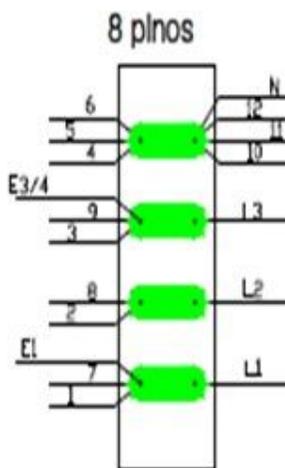


Figura 31 – Terminais do gerador WEG.

Para analisar o consumo de combustível do sistema foi necessário a instalação de um sistema medidor, visto na Figura 32, e para esta finalidade foi utilizada uma mangueira transparente e uma proveta, com a qual se adicionou combustível ao tanque. À medida que o etanol foi adicionado ao reservatório de combustível o nível da mangueira foi registrado em uma escala feita de papel, o que segundo o princípio de Pascal equivale ao nível do combustível presente no tanque. É importante ressaltar que a extremidade inferior da mangueira se encontra conectada a base do tanque de combustível e a parte superior está em contato direto com o ar.



Figura 32 – Medidor de nível de combustível.

Após a confecção dos itens acima se deu início a realização dos testes. Os mesmos foram divididos em seis etapas, sendo que cada uma delas foi repetida por duas vezes, cada repetição tendo duração de duas horas.

Na primeira etapa realizou-se testes com o conjunto trifásico de resistências de 4500 W, habilitando para esse fim seu respectivo disjuntor de 15 A. A cada teste realizado foram tomados os valores de consumo de combustível e de energia elétrica. Além do mais foram colhidas informações sobre grandezas tais como tensão, corrente, fator de potência e frequência, utilizando para tal o aparelho Medidor Universal de Grandezas (MUG), mostrado na Figura 33, que possibilita a tomada de dados, bem como seu armazenamento em memória interna e transferência para computador.



Figura 33 – Medidor universal de grandezas (MUG).

Na Figura 34 é possível encontrar o esquema de ligação do MUG ao sistema. Esse aparelho possui cinco cabos com conectores do tipo jacaré e mais seis cabos que devem ser ligados a três alicates amperímetros. Os conectores do tipo jacaré, cuja função é captar as tensões do sistema, devem ser conectados as três fases na saída do gerador, bem como ao neutro do mesmo e ao aterramento do sistema. No caso do gerador em questão o neutro foi aterrado e logo os conectores referentes ao aterramento e ao neutro foram conectados no mesmo ponto, como pode ser visto pelo esquema. Os cabos referentes aos alicates amperímetros são conectados aos pares, de acordo com a indicação em seus terminais. Deve-se atentar para que em uma determinada fase do gerador estejam conectados os cabos de tensão e o alicate amperímetro correspondentes entre si, pois do contrário o aparelho fornecerá valores incorretos de medida.

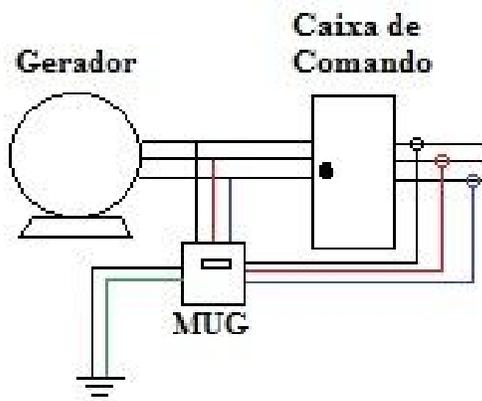


Figura 34 – Esquema de ligação do medidor universal de grandezas (MUG).

Para a segunda etapa realizou-se testes com os conjuntos trifásicos de resistências de 4500 W e 6000 W, habilitando para tal seus respectivos disjuntores de 15 A e 20 A. A cada repetição foram coletados os consumos de energia elétrica e combustível, bem como as mesmas grandezas da etapa anterior utilizando o MUG.

Na realização da terceira etapa realizou-se testes com o conjunto trifásico de resistências de 4500 W e com dois conjuntos de 6000 W, habilitando para tal seus respectivos disjuntores e tomou-se as mesmas grandezas das etapas anteriores.

Para a realização da quarta etapa utilizou-se o conjunto trifásico de resistências de 4500 W e os três conjuntos de 6000 W, habilitando para tal seus respectivos disjuntores e coletando as mesmas grandezas das etapas anteriores.

Durante a execução da quinta etapa foram utilizados todos os conjuntos trifásicos de resistências e como nas etapas anteriores foram tomados os consumos de combustível e energia elétrica, bem como tensão, corrente, frequência e fator de potência, utilizando o MUG.

Para a última etapa foi analisado o efeito que a inserção de motores no sistema provoca. Para tal objetivo foram utilizados o conjunto trifásicos de resistências de 4500 W, dois conjuntos de 6000 W e o conjunto de 7500 W. Além dessas cargas foram utilizados dois motores trifásicos na configuração triângulo, sendo um deles de 1,5 cv e o outro de 5 cv, conforme pode ser visto respectivamente nas Figuras 35 e 36, sendo que ambos os motores foram utilizados a vazio, ou seja, sem carga conectada ao seu eixo.



Figura 35 – Motor trifásico de 1,5 cv.



Figura 36 – Motor trifásico de 5 cv.

O motor de 1,5 cv foi conectado a um dos disjuntores sobressalentes do painel da Figura 24, enquanto o outro motor teve de ser conectado a um dos disjuntores de 20 A devido ao fato de que a duração e o nível de sua corrente de partida provocariam o desarme do disjuntor de 15 A, segundo a análise da curva desse dispositivo.

Para a avaliação da capacidade do sistema mediante a presença de cargas indutivas houve a inserção gradativa de cargas. Inicialmente o gerador funcionou a vazio por dez minutos e após esse período inicial as cargas foram inseridas gradualmente, a cada dez minutos, seguindo a seguinte ordem: Motor de 1,5 cv, motor de 5 cv, conjunto trifásico de resistências de 4500 W, conjunto de 6000 W, conjunto de 6000 W e por fim conjunto de 7500 W. Após a inserção da última carga manteve-se o funcionamento do gerador até que se completassem duas horas de teste. Foram tomados com o auxílio do MUG dados como tensão, corrente, fator de potência e frequência.

### **2.2.2 Testes Com o Gerador Movido a Diesel**

Para realizar um comparativo do funcionamento e do consumo de combustível do gerador a etanol supracitado com sistemas tradicionais de geração de energia utilizou-se o gerador a diesel da Figura 37. Esse alternador é caracterizado por valores nominais de tensão de 220 V e frequência de 60 Hz, bem como por um motor de combustão de um cilindro, sendo a utilização desse gerador na configuração estrela. Além do mais o mesmo é caracterizado pela existência do enrolamento de campo estacionário e também pela existência de um circuito de excitação de campo baseado em uma excitatriz Shunt, conforme o modelo descrito na seção 1.1.4.



Figura 37 – Gerador trifásico com motor movido a diesel.

Para realizar um comparativo com o sistema a etanol foi realizado um teste com duração de uma hora e trinta minutos, utilizando para tal o conjunto trifásico de resistências de 4500 W. Porém antes da realização do mesmo foi necessário a instalação de um medidor de combustível, que foi construído de maneira semelhante ao que foi usado para o gerador a etanol, como pode ser visto na Figura 38.



Figura 38 – Medidor de nível de combustível para gerador a diesel.

Além da instalação de um medidor de combustível foi necessária a configuração do gerador CC de forma que o mesmo trabalhasse como excitatriz na configuração Shunt, o que foi obtido pela colocação em paralelo dos circuitos de campo e armadura da máquina CC, bem como pela adição do reostato de campo, conforme pode ser visto na Figura 39. Além do mais foi realizada a instalação dos terminais do gerador ao painel de comandos da Figura 20.



Figura 39 – Excitatriz Shunt acoplada ao gerador.

Para a realização do teste para o sistema a diesel inicialmente habilitou-se o disjuntor de 15 A responsável pelo conjunto trifásico de resistências de 4500 W. Sequencialmente foram regulados o reostato de campo da excitatriz Shunt e o acelerador do motor a diesel, mostrado na Figura 40, com a finalidade de garantir os valores nominais de tensão e frequência do sistema. Assim como realizado nos teste com o gerador a etanol foram tomadas as grandezas elétricas, utilizando-se para tal o MUG. Em adição foram coletados os consumos de energia elétrica e combustível.



Figura 40 – Acelerador manual do sistema à diesel.

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Gerador com Motor Movido a Etanol

Para os testes realizados com cargas de 4500, 10500, 16500, 22500 e 30000 (W) podemos visualizar o comportamento da tensão  $V_{an}$  (tensão RMS entre a fase A e o neutro do gerador), respectivamente nas Figuras 41, 42, 43, 44 e 45. É importante salientar que nessas figuras a exibição dos valores do eixo vertical foi limitada de maneira que mostrasse apenas um intervalo contendo os valores máximos e mínimos atingidos pela tensão  $V_{an}$ . Os dados foram obtidos com o auxílio do aparelho Medidor Universal de Grandezas (MUG) e tratados utilizando um computador.

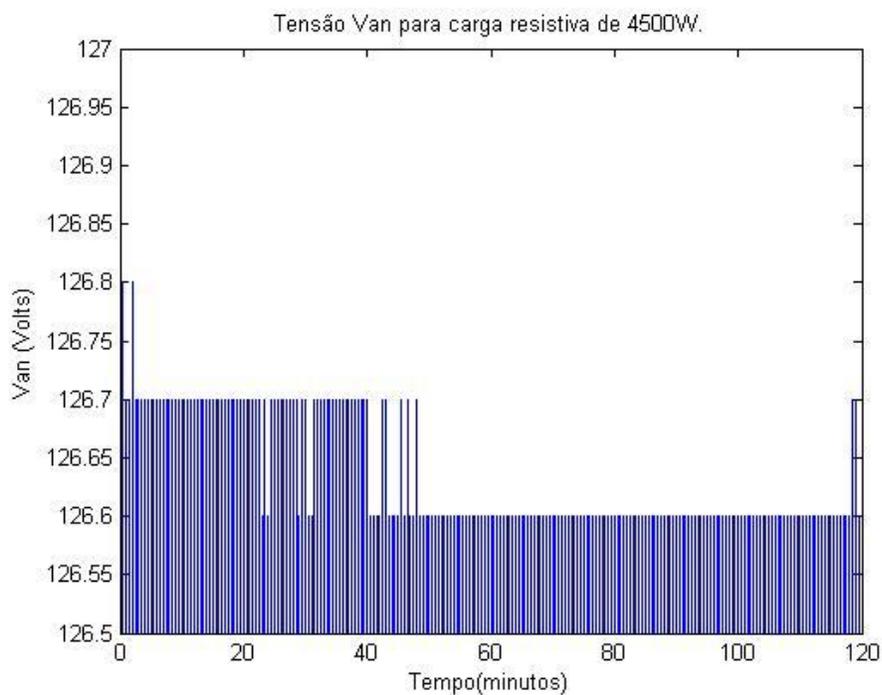


Figura 41 – Tensão de fase  $V_{an}$  para 4500 W.

Pela interpretação da Figura 41 nota-se que a faixa de variação dos valores de  $V_{an}$  está compreendida entre 126,6 V e 126,8 V.

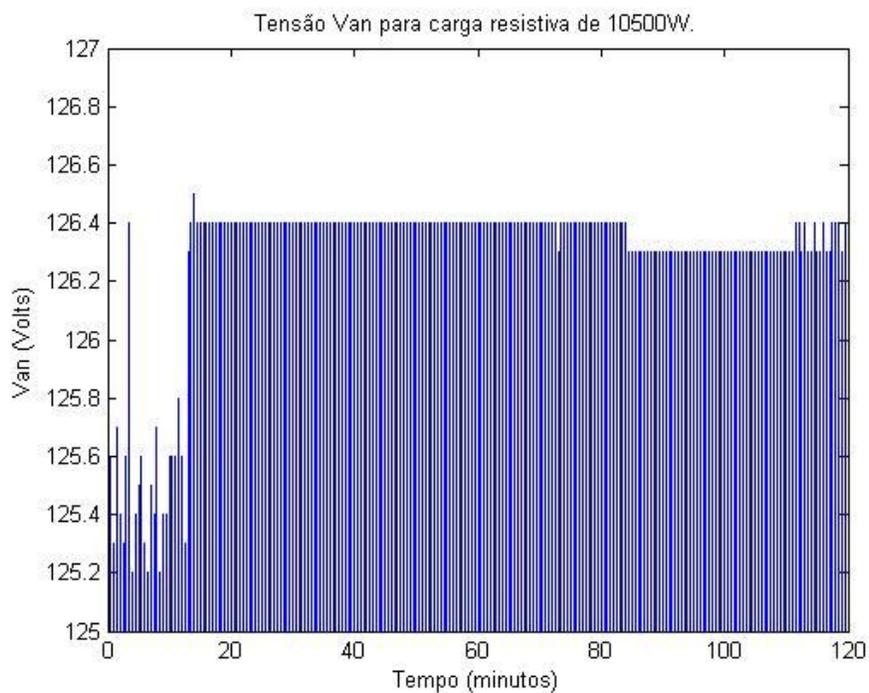


Figura 42 – Tensão de fase  $V_{an}$  para 10500 W.

Pela interpretação da Figura 42 é possível notar que os valores de  $V_{an}$  ficaram situados entre 125,2 V e 126,6 V.

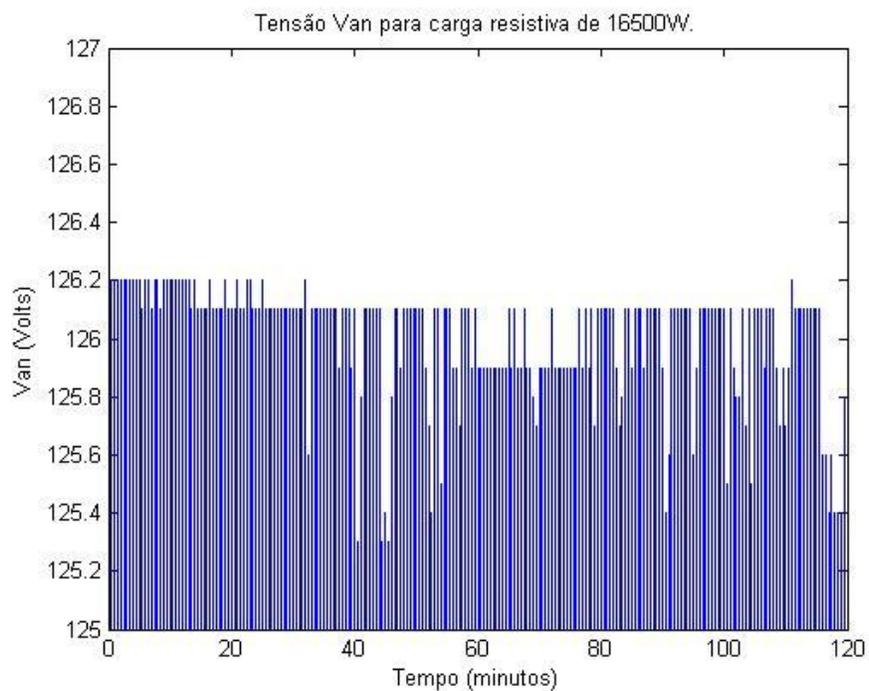


Figura 43 – Tensão de fase  $V_{an}$  para 16500 W.

Pela análise da Figura 43 nota-se que a faixa de variação dos valores de  $V_{an}$  está compreendida no intervalo de 125,3 a 126,2 V.

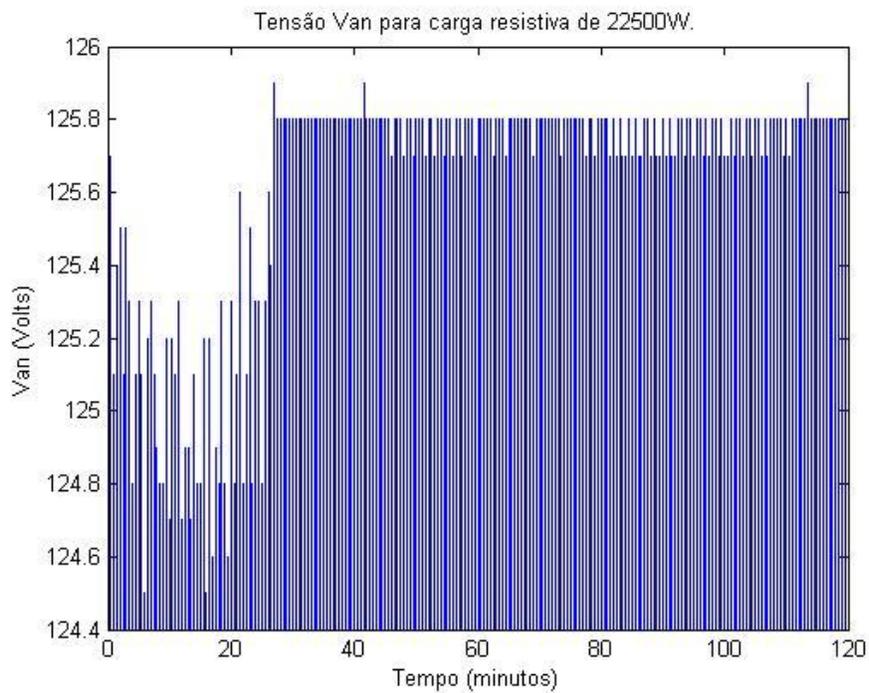


Figura 44 – Tensão de fase  $V_{an}$  para 22500 W.

Pela interpretação da Figura 44 é possível notar que os valores de  $V_{an}$  ficaram limitados entre 124,5 V e 125,8 V.

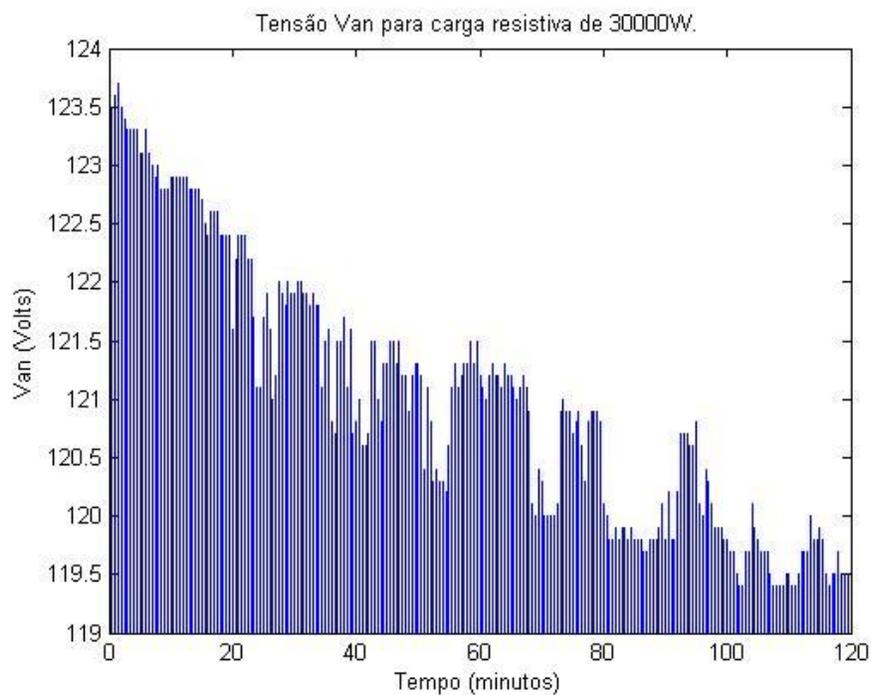


Figura 45 – Tensão de fase  $V_{an}$  para 30000 W.

Pela avaliação da Figura 45 nota-se que os valores de  $V_{an}$  ficaram situados entre 119,5 V e 123,5 V.

Na Tabela 1 é possível encontrar os dados referentes ao consumo de energia elétrica e combustível do gerador, bem como a tensão média de  $V_{an}$  para cada carga testada e as relações kWh/L e L/kWh.

Tabela 1 – Resultados para os testes com cargas resistivas com gerador movido a etanol.

	Carga (kW)				
	4,5	10,5	16,5	22,5	30,0
Tensão Média (V)	126,6	126,4	126,1	125,8	120,95
Consumo de Etanol (L)	16	22	25	30	32
Energia Produzida por Litro (kWh/L)	0,6	0,98	1,34	1,44	1,69
Consumo de etanol por kWh produzido (L/kWh)	1,67	1,02	0,75	0,69	0,59

Pela análise da Tabela 1 é possível constatar que à medida que a carga demandada do gerador cresce, a tensão média tem seu valor reduzido. Pelos gráficos das Figuras 41 a 45 pode-se notar que a máxima variação em torno da média se dá para a carga de 30 kW, sendo possível verificar que a variação da tensão  $V_{an}$  para essa carga esteve entre 119,5 V e 123,5 V.

É importante salientar que para todos os valores de carga utilizados a tensão  $V_{an}$  se manteve dentro da faixa de tolerância de 116 V a 133 V em torno do valor nominal de 127 V, sendo essa faixa de tolerância uma das condições contratuais de fornecimento de energia elétrica aplicada pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), sendo a mesma responsável por atender a região de Viçosa [12].

Ainda pela análise das Figuras de 41 a 45 nota-se que os gráficos apresentam variações de seus valores de  $V_{an}$  ao longo do tempo, sendo essa mesma uma consequência da variação de frequência do sistema. Isso revela a existência de deficiências no sistema de controle de velocidade, uma vez que o mesmo deveria promover uma regulação de frequência em 60 Hz, o que não foi visto no sistema em questão, onde o caso mais crítico se mostrou para a carga de 30 kW onde a frequência de trabalho atingiu valores de 47 Hz.

É função do controlador de tensão do gerador a compensação da queda de velocidade da máquina primária com o aumento da excitação CC do circuito de campo do alternador trifásico, e pela observação das Figuras 41 a 45 é possível constatar que esse controle foi efetivo, porém também foi possível notar que à medida que as potências foram aumentadas essa regulação de tensão se tornou mais difícil devido à baixa frequência, uma vez que o sistema de excitação do alternador em questão é diretamente dependente da frequência do mesmo, conforme foi explicado na seção 1.1.4.

Observando o consumo de combustível e tendo o prévio conhecimento que no período de realização dos testes o custo do litro de etanol foi de R\$ 2,28, em comparação com o valor de aproximadamente R\$ 0,50 do custo do litro de álcool produzido na fazenda, a partir da cabeça e cauda da produção de cachaça de qualidade é possível obter a Tabela 2, em que se compara o custo do kWh produzido no gerador movido a etanol em relação ao preço do mesmo comercializado pela CEMIG nas áreas rurais em que atende.

Tabela 2 – Comparativo do custo do kWh.

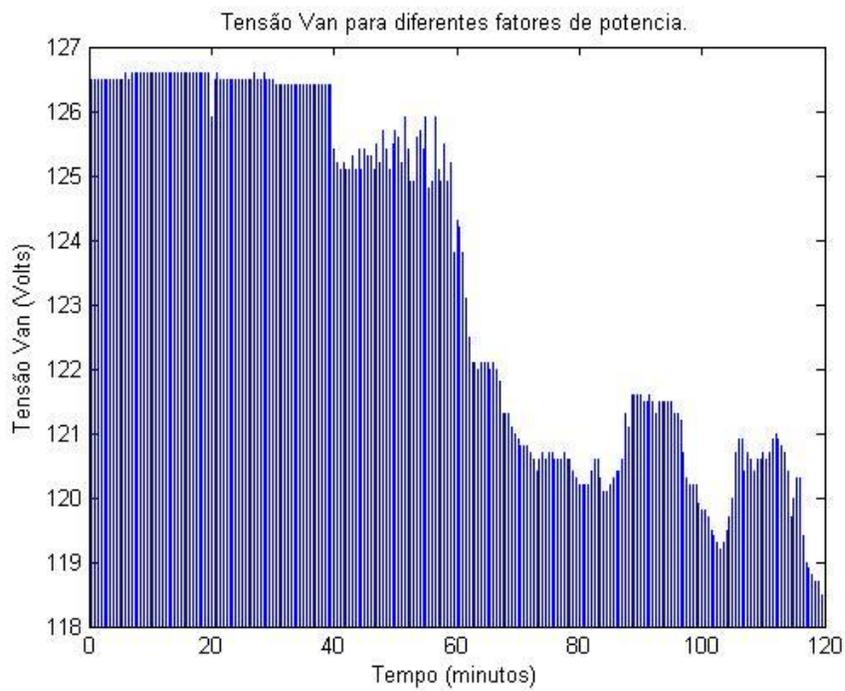
Preço do kWh				
Gerador			Concessionária	
	Álcool do Posto	Álcool da Fazenda		
Carga (kW)	Valor (R\$)	Valor (R\$)	Carga (kW)	Valor (R\$)
4,5	3,80	0,84	-----	0,31
10,5	2,33	0,51		
16,5	1,70	0,38		
22,5	1,58	0,35		
30,0	1,35	0,30		

É possível notar também que o custo do kWh se torna menor à medida que a potência fornecida aumenta.

Como resultado do teste realizado com cargas indutivas pode-se encontrar os gráficos das Figuras 46, 47 e 48 representando, respectivamente, os comportamentos de  $V_{an}$ , potência ativa e fator de potência indutivo. Na Tabela 3 é possível encontrar a distribuição das cargas em função do tempo.

Tabela 3 – Tempo versus Carga Alimentada.

Carga Alimentada	Intervalo
Vazio	0 a 10 min
1,5 cv	10 a 20 min
1,5 cv + 5 cv	20 a 30 min
1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW	30 a 40 min
1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW + 6 kW	40 a 50 min
1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW + 6 kW + 6 kW	50 a 60 min
1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW + 6 kW + 6 kW + 7,5 kW	60 a 120 min

Figura 46 – Tensão de fase  $V_{an}$ .

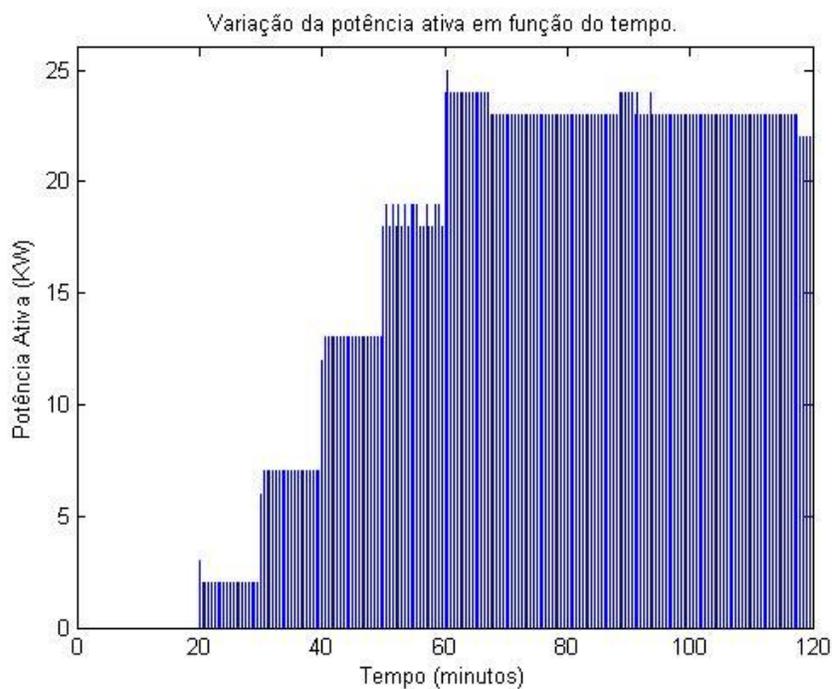


Figura 47 – Variação da potência ativa trifásica.

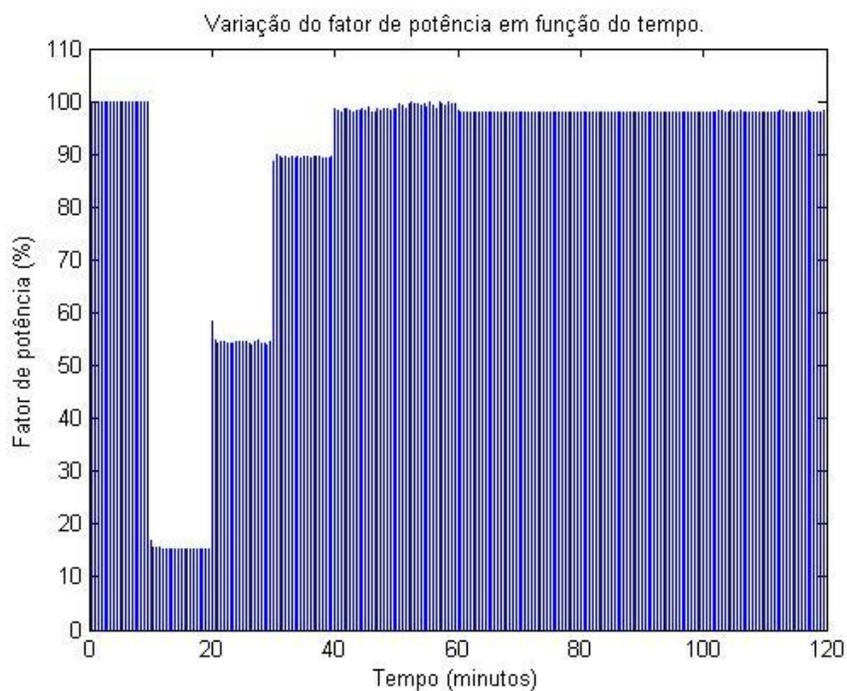


Figura 48 – Variação temporal do fator de potência.

Na Figura 47 é possível verificar que à medida que cargas resistivas foram adicionadas a potência ativa aumentou, conforme esperado. Na Figura 48 nota-se que acompanhando o acréscimo de cargas resistivas há uma melhora no fator de potência, também como esperado.

Como resultado obteve-se a Tabela 4, contendo a da tensão  $V_{an}$  para cada valor de carga.

Tabela 4 – Resultados dos testes com cargas indutivas.

Cargas	Descrição	Média de $V_{an}$ (Volts)
1	Vazio	126,535
2	1,5 cv	126,6
3	1,5 cv + 5 cv	126,485
4	1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW	126,405
5	1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW + 6 kW	125,275
6	1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW + 6 kW + 6 kW	125,260
7	1,5 cv + 5 cv + 4,5 kW + 6 kW + 6 kW + 7,5 kW	120,757

Pela análise da Tabela 4 é possível constatar que análogo ao que aconteceu com as cargas resistivas a média de  $V_{an}$  apresentou redução gradativa de valores conforme a potência ativa suprida pelo gerador aumentava. Da análise da Figura 46 constata-se que a tensão respeitou a faixa de tolerância de 116 V a 133 V em torno do seu valor nominal de 127 V, porém no instante em que o motor de 5 cv foi ligado houve o desarme do contator provocado pela atuação do relé de falta de fase que estava ajustado para trabalhar em um intervalo de tolerância de tensão de 10% da tensão nominal, e logo pode-se concluir que houve uma queda de tensão superior a 10%.

Ainda pela análise da Figura 46 é possível constatar que houve oscilação de frequência ao longo do teste, sendo que após a inserção da carga de 7,5 kW a frequência atingiu valores de 48 Hz, o que implica que houve queda de 20% em seu valor nominal de 60 Hz. Para o funcionamento de motores de indução a variação de frequência é um fator de risco, uma vez que para essas máquinas a corrente se mostra diretamente proporcional ao fluxo de entreferro, que nesse caso é inversamente proporcional à frequência de operação da rede de energia. Logo quanto menor a frequência maior é a corrente da máquina girante, sendo que para motores essa não deve ultrapassar os limites do seu fator de serviço ( $f_s$ ), geralmente encontrado nas placas dessas máquinas. A não observância a esse valor implica no risco de queima dos enrolamentos do motor devido a forte dissipação de calor por efeito Joule, o que

implica em danos na isolação dos mesmos. Ainda em relação à frequência de operação do gerador a mesma apresentou-se instável ao longo do seu regime de operação.

### 3.2 Gerador com Motor Movido a Diesel

Para este teste realizado com finalidade de comparar o consumo com o gerador a etanol para uma carga resistiva de 4500 W obteve-se os resultados mostrados na Tabela 5. Deve-se salientar que devido ao comportamento linear do gerador movido a diesel o valor de combustível gasto em uma hora e trinta minutos foi adequado a um teste de duas horas de duração através de uma regra de três, com o intuito de permitir o comparativo com o gasto de combustível do gerador movido a etanol.

Tabela 5 – Resultados do teste com gerador com motor movido a diesel.

Média de $V_{an}$ (Volts)	Desvio Padrão de $V_{an}$	Média Frequência (Hertz)	Desvio Padrão Frequência
124,493	1,073	60,5	0,4
Consumo de diesel (L)		Energia Produzida por Litro (kWh/L)	
4,9		1,905	
Consumo de diesel por kWh produzido (L/kWh)			
0,52			

Pela análise da tabela acima é possível constatar o funcionamento adequado do sistema a diesel. Tendo conhecimento que no período de realização dos testes o litro do óleo diesel custava R\$ 2,139 pode-se concluir que o preço do kWh foi de R\$ 1,12. Analisando o preço do kWh gerado por esse sistema é possível notar que analogamente ao sistema à etanol o custo da energia gerada de maneira isolada se mostra superior ao custo da concessionária de energia local.

Se realizado um comparativo entre o desempenho de ambos os sistemas de geração é possível notar que o funcionamento do sistema à diesel se mostrou mais eficiente do que o do sistema à etanol. Para o primeiro houve melhor regulação da tensão e da frequência, bem como menor consumo de combustível e maior relação kWh/L para a carga de 4500 W. Deve-se levar em consideração que ambos os sistemas são constituídos por motores de combustão com diferentes volumes de cilindradas, bem como diferentes condições operacionais.

O consumo superior de combustível do sistema à etanol em relação ao sistema à diesel pode ser explicado pelo fato do primeiro sistema ser formado por um gerador síncrono acoplado a um motor de combustão interna que originalmente funcionava a gasolina, tendo sofrido uma adaptação para funcionar com álcool etílico. Esse motor a combustão em sua versão original possuía potência de 148 cv (109 kW), que se comparado com a potência do gerador de 42 kVA se apresenta demasiadamente sobredimensionado, quando o valor recomendado é de 10% para compensar as perdas mecânicas e nos enrolamentos do alternador. Esse sobredimensionamento leva a um alto gasto de combustível para suprir baixas potências, como pôde ser visto nos resultados obtidos para os testes realizados com as resistências trifásicas. Ainda pela análise do consumo obtido nos testes realizados com o sistema à etanol nota-se que à medida que a potência demandada do gerador foi aumentando a diferença entre os valores de consumo diminuiu. Isso evidencia que para o gerador operando a vazio tem-se um alto consumo de etanol e logo como alternativa pode-se utilizar motores de combustão de potência adequada ao gerador em questão. Para esse alternador poderia ser utilizado um motor de combustão *flex* do tipo 1.0 a 1.4, como os encontrados em veículos.

## 4 Conclusões

É possível concluir baseado no comparativo dos consumos de combustível de ambos os sistemas de geração que o alto gasto de etanol dificulta a implantação do sistema utilizando o gerador em questão.

Pela análise do comportamento do controlador de frequência do sistema a etanol em comparação com o acelerador manual do gerador a diesel podemos ressaltar graves deficiências do mesmo, pois como foi visto nos resultados o gerador apresentou grande oscilação de sua frequência, bem como frequência final de operação inferior ao valor desejado de 60Hz. Logo podemos concluir que é necessário a implementação de um sistema mais eficiente de controle de velocidade. Talvez o sistema apresente algum problema de ordem eletrônica, fato que não foi o objetivo desse trabalho.

Apesar do alto consumo de etanol se comparado ao consumo de diesel, pode-se ainda salientar o benefício ambiental encontrado na utilização do álcool etílico. Para a produção do mesmo se utiliza como matéria prima a cana-de-açúcar, sendo que a mesma retira do meio ambiente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para crescer. Quando a queima do combustível etanol acontece é liberado para a natureza o  $\text{CO}_2$  extraído da mesma. Já no caso da queima do óleo diesel, invés do sequestro de carbono verifica-se o acúmulo deste na atmosfera, uma vez que se está retirando do petróleo o carbono armazenado a milhares de anos.

Portanto, quando se trata do aspecto ambiental se mostra vantajosa a utilização do etanol como combustível para a geração de energia elétrica, contudo se faz necessário a adequação do conjunto a um sistema de combustão de menor consumo de combustível.

Quando se compara o preço do kWh gerado por ambos os sistemas de produção de energia elétrica é possível concluir que a utilização do álcool produzido na fazenda se mostra vantajosa em comparação com o sistema de geração de energia movido a diesel. Mesmo quando se compara os valores do kWh produzido com a tarifa da concessionária local aplicada à zona rural é ainda possível concluir que a instalação de um sistema de geração de energia movido a etanol produzido na fazenda pode se mostrar vantajosa para regiões isoladas, pois geralmente a população que reside nessas áreas é de baixa renda e não apresenta

retorno financeiro atrativo para as concessionárias de energia elétrica, o que geralmente desestimula os investimentos das mesmas em eletrificação dessas áreas.

Como continuidade do trabalho pode-se realizar a adequação supracitada e com o sistema obtido realizar testes em vilas e comunidades, analisando os aspectos elétricos dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como os aspectos de consumo de combustível. Além disso, baseado nos estudos do desenvolvimento da produção de álcool etílico na fazenda pode-se empregar uma micro destilaria com o intuito de criar um sistema sustentável no qual os beneficiários da energia elétrica gerada seriam responsáveis pela produção do combustível em questão.

## **Referências Bibliográficas**

- [01] Creder, H., Instalações Elétricas, 14ª edição, 2000, editora LTC.
- [02] Papenkort, F., Esquemas Elétricos de Comando e Proteção, 2ª edição, 2010, editora EPU.
- [03] Fitzgerald, A., E., Junior, C., K., Umans, S., D., Máquinas Elétricas com Introdução a Eletrônica de Potência, 6ª edição, 2008, editora Bookman, págs. 239 a 294.
- [04] Mohan, N., Undeland, T., M., Robbins, W., P., Power Electronics, Converters, Applications and Design, 3ª edição, 2003, editora Wiley & Sons, págs. 77 a 121.
- [05] Chapman, S., J., Electric Machinery and Power System Fundamentals, 1ª edição, 2002, editora McGraw-Hill, editora Wiley, págs. 163 a 264.
- [06] Nascimento, G., Comandos Elétricos, Teoria e Atividades, 1ª edição, 2011, editora Érica, págs. 29 a 101.
- [07] Junior, C., A., C., Tanaka, M., R., Circuitos de Corrente Alternada, um curso introdutório, 2ª edição, 1995, Editora da Unicamp.
- [08] Sen, P., C., Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2ª edição, 1997, editora Wiley & Sons.
- [09] Junior, W., H., H., Buck, J., A., Eletromagnetismo, 6ª edição, editora LTC.
- [10] Kosow, I., L., Máquinas Elétricas e Transformadores, 3ª edição, 1979, Editora Globo.
- [11] Silva, J. de S., Produção de álcool na fazenda e em sistemas cooperativos. Viçosa: 2007
- [12] Atendimento on-line CEMIG: <http://application.voxage.com.br/voswebchatserver/pages/clientPopup.jsp>