



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Campina Grande, Paraíba
Março de 2014

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

*Relatório de Estágio Integrado submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Máquinas Elétricas

Orientador:

Professor Antonio Marcus Nogueira de Lima, Dr.

Campina Grande, Paraíba
Março de 2014

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

Relatório de Estágio Integrado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Máquinas Elétricas

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Antonio Marcus Nogueira de Lima, Dr.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a Idalva Lacerda e a José
Geraldo, meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força que me foi dada.

Agradeço a minha família, que, mesmo a distância, encorajou-me e absorveu com compreensão meus momentos de impaciência.

Agradeço aos meus amigos pela extrema compreensão nos meus dias de ausência, e pelo suporte nos momentos de fragilidade.

Agradeço a Empresa SUNA ENGENHARIA por me permitir participar de um projeto de inovação tecnológica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Empresas que utilizam o serviço da SUNA ENGENHARIA	2
Figura 2. Metodologia de projeto da SUNA ENGENHARIA	5
Figura 3. Etapas no processo de geração do movimento linear.	9
Figura 4 - Fases de funcionamento do motor de Stirling. EC = Espaço de compressão. EE = Espaço de expansão. P = Pistão. D = deslocador. A = Aquecedor. R = Regenerador. C = Cooler.	9
Figura 5. Corte na estrutura da topologia 1 que permite observar os enrolamentos no estator e a disposição dos ímãs na parte móvel da máquina [7].	13
Figura 6. Vista da máquina da topologia 2 que permite observar os enrolamentos no estator e a disposição dos ímãs na parte móvel [8].....	14
Figura 7. Corte transversal da máquina correspondente a topologia 3 permitindo ver o arranjo estator/rotor do Gerador e a Indicação das fases B, A e C [9].	15
Figura 8. Corte transversal na topologia 3 que permite observar a distribuição de fluxo em duas diferentes posições da parte móvel [9].	16
Figura 9. Vista da topologia 4 que permite observar a disposição dos ímãs na parte móvel, bem como a estrutura do estator.	18
Figura 10. Etapas no processo de geração distribuída.	19
Figura 11. Sistema de Geração Distribuída utilizando <i>Grid-Tie</i>	21
Figura 12. Arranjo Gerador/Retificador/Inversor.	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações do gerador.	11
Tabela 2. Especificações do inversor Grid-Tie.....	22

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Lista de Ilustrações.....	vii
Lista de Tabelas.....	viii
Sumário.....	ix
1 Introdução.....	1
1.1 A Empresa.....	1
1.2 Clientes.....	2
1.3 Posição do estagiário na empresa.....	3
2 Metodologia de projeto.....	5
3 Pré-Projeto Gerador Linear.....	6
3.1 Geração distribuída.....	7
3.2 Características da Máquina Primária.....	8
3.2.1 Motor de <i>Stirling</i>	9
3.2.2 Justificativa para o uso do movimento linear.....	10
3.3 Requisitos e Especificações do Gerador Linear.....	10
3.4 Estudo Comparativo.....	12
3.4.1 Topologia 1 – Gerador linear para veículos híbridos.....	12
3.4.2 Topologia 2 – Gerador linear híbrido 2.....	14
3.4.3 Topologia 3 – Gerador linear com ímãs no estator.....	15
3.4.4 Topologia 4 – Gerador de Curso Curto.....	17
3.5 Inversores <i>Grid-Tie</i>	19
3.6 Retificador.....	23
4 Conclusão.....	25
Bibliografia.....	26

1 INTRODUÇÃO

O Estágio é uma importante etapa na formação de um engenheiro. É indispensável para a consolidação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso. O Estágio Integrado foi realizado na empresa SUNA ENGENHARIA, no período de 21 de outubro de 2013 a 17 de fevereiro de 2014. Este relatório tem como objetivo descrever as atividades desenvolvidas durante o mesmo, bem como alguns princípios importantes para o funcionamento de uma Máquina de Fluxo Transverso de Curso Curto (Gerador Linear).

1.1 A EMPRESA

A SUNA ENGENHARIA é uma empresa jovem de caráter inovador, comprometida com valores éticos e ambientais. Localizada na cidade de Campina Grande-PB, a mesma nasceu com o desejo de romper com o ciclo vicioso de combate à seca. Mostrou que o problema das áreas áridas é, basicamente, a falta de tecnologia adequada ao convívio com a seca. Assim a empresa tem como seu maior objetivo possibilitar o convívio do homem do campo com a seca.

A empresa atua em várias áreas. Os principais serviços prestados em cada área são:

- Pesquisa e desenvolvimento: Estudos de viabilidade técnica e econômica; construção de protótipos;
- Sistemas fotovoltaicos: Dimensionamento, montagem e manutenção;
- Processos industriais: Análise de viabilidade técnica de aquecimento solar para uso industrial; dimensionamento de sistema de aquecimento solar para fornecimento de calor ao processo;
- Geração de energia: Medição do potencial eólico; medição do potencial solar.

1.2 CLIENTES

Dentre os clientes da SUNA ENGENHARIA podemos citar:



Figura 1. Empresas que utilizam o serviço da SUNA ENGENHARIA

Como clientes da SUNA ENGENHARIA pode-se destacar o Instituto Eco – Engenho e a empresa de pesquisa e desenvolvimento ThinkTank. Que seja do conhecimento do estagiário, para o Instituto Eco – Engenho, a SUNA ENGENHARIA realizou o projeto de e instalação de dois Soft-Starters trifásicos para realizar a partida em rampa de aceleração de dois motores (0,5 CV e 1,0 CV) do Projeto Aroeira desenvolvido pelo instituto em Piaçabuçu-AL

Ainda para o Instituto Eco – Engenho, a SUNA ENGENHARIA fez o projeto e a interligação elétrica de um painel solar fotovoltaico de 1,5 kW do Projeto Aroeira desenvolvido pelo instituto em Piaçabuçu-AL. Além disso, fez a ligação elétrica do painel a rede elétrica através da utilização de um inversor *Grid-Tie*.

Dentre os projetos em execução na empresa, podemos destacar:

- Concentrador de Sólidos Solúveis: é um equipamento que promove a separação de um líquido dos sólidos dissolvidos através do processo de umidificação e desumidificação, com reaproveitamento do calor latente de vaporização.

- Estudos de viabilidade técnica e econômica do uso de concentradores em painéis fotovoltaicos para aumentar a produção de energia elétrica. Prevê a utilização de células fotovoltaicas comuns para esse fim.
- Rastreador Solar: construção de um rastreador solar que proporcione o um aumento de 35% da energia gerada em painéis fotovoltaicos comuns.
- Softstart Monofásico: em parceria com a Teslatec, prevê o desenvolvimento de um dispositivo que elimina picos de potência de partida de motores elétricos monofásicos.

1.3 POSIÇÃO DO ESTAGIÁRIO NA EMPRESA

A SUNA ENGENHARIA apresenta as seguintes divisões: setor administrativo, setor de pesquisa e desenvolvimento, setor de sistemas fotovoltaicos, setor de processos industriais. O setor de pesquisa e desenvolvimento é dirigido pelo sócio majoritário da empresa, Sebastião Coutinho, engenheiro químico e meu supervisor nesse período de estágio. A equipe é formada ainda pelo engenheiro mecânico Leonardo Pereira, que ajudou no seguimento do estágio.

Na condição de estagiário, foi-me atribuída as seguintes atividades:

- Elaborar o dimensionamento de um sistema de conversão eletromecânica que funcione a partir de um movimento linear (Gerador Linear);
- Elaborar o dimensionamento de um sistema de eletrônica de potência que fará o acoplamento elétrico entre o sistema de conversão e a rede elétrica;

Juntos, o sistema de conversão e o de eletrônica de potência compõem um sistema de geração distribuída de pequeno porte. Com a tarefa designada, fiquei responsável pelo levantamento de informações importantes sobre geradores a ímãs permanentes, com fluxo magnético transversal e que funcione a partir de um movimento linear. A partir disto, foi realizado um estudo comparativo entre topologias encontradas para selecionar aquela que melhor atende as necessidades em pauta. Depois, foi necessário o dimensionamento de um retificador, para ser acoplado a um inversor *Grid-*

Tie. Outras etapas do projeto previam análise pormenorizada dos resultados obtidos a partir de simulações computacionais, para os casos da máquina parada e em movimento. Depois, promover alterações de parâmetros da máquina para chegar num ponto de operação ótimo. Por último, estava prevista a construção de um protótipo para teste de conceito, que não foi realizada, devido à falta de resultados ideais nas fases anteriores.

2 METODOLOGIA DE PROJETO

A elaboração de um pré-projeto de um gerador linear foi a principal atividade do estágio. Para a sua execução, foram definidos requisitos e especificações pela empresa. Estes foram obtidos a partir da definição de objetivos. A definição de necessidades diretas, sem embasamento teórico, deu-se principalmente pela existência de cláusulas de confidencialidade. Eu não tinha pleno conhecimento de todas as esferas do problema em questão. Desta forma, para execução da atividade, foi utilizada a metodologia de projeto apresentada na figura 2. Nem todas as etapas pré-definidas foram cumpridas.

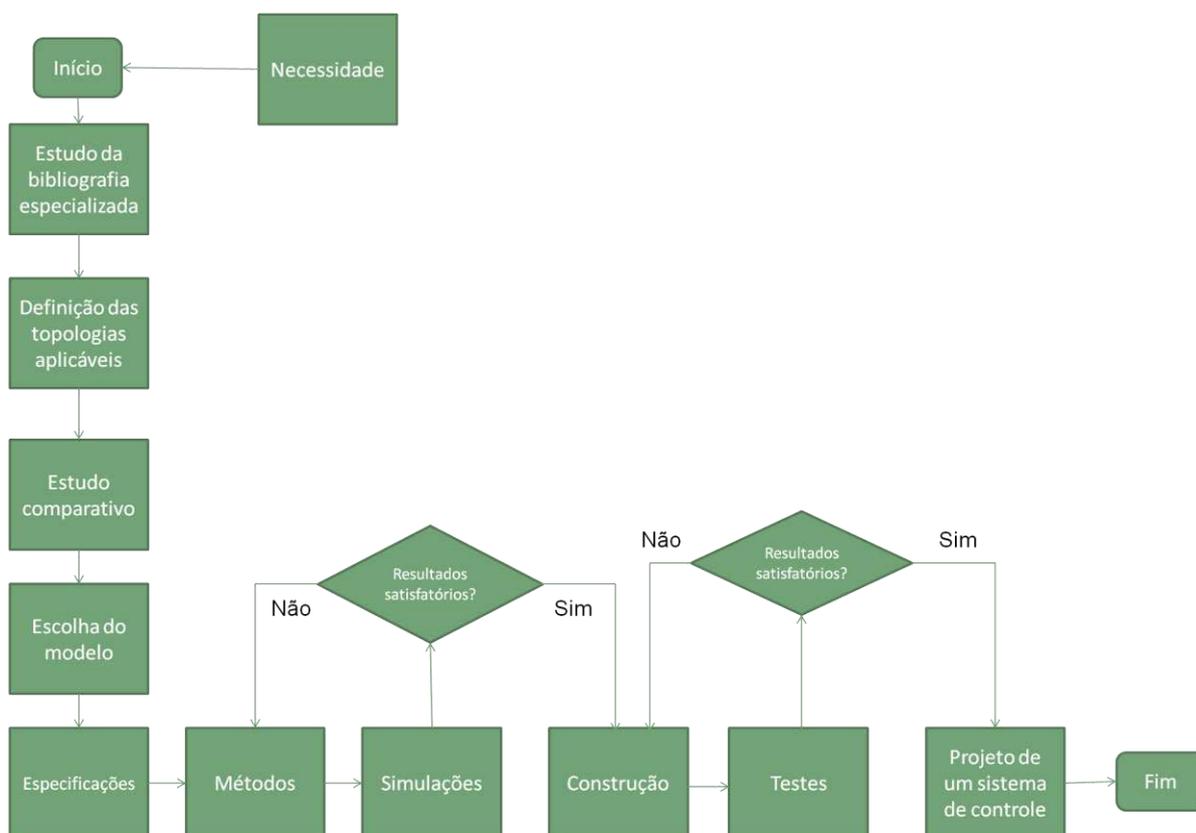


Figura 2. Metodologia de projeto da SUNA ENGENHARIA.

3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO

A intenção da empresa é o desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico para conversão de energia solar em energia elétrica. Este dispositivo conta com movimento atuante peculiar, do tipo linear. A empresa tem como meta ser a primeira a pôr no mercado um conversor eletromecânico desse tipo. Isso possibilitará a implantação de sistemas de geração distribuída, para atender consumidores diurnos de energia elétrica. Tais como: shoppings, supermercados, indústrias, escritórios, hospitais e clínicas.

Para a realização do pré-projeto, foi necessário um levantamento sobre as características gerais da máquina primária. Por questões de termos de confidencialidade, o funcionamento detalhado da máquina primária não me foi revelado. Desta forma, trabalhei em cima de uma série de especificações e requisitos diretos, que explorava o processo de funcionamento da máquina primária de uma maneira genérica.

De posse de requisitos e especificações, foi preciso levantar o estado da técnica para análise do que já estava em desenvolvimento. Um estudo comparativo a partir das informações obtidas foi feito, e o modelo que melhor se encaixou as nossas necessidades foi escolhido.

A aplicação que se objetiva, é a implantação de sistemas de geração distribuída. Sendo assim, foi necessário o entendimento sobre os processos de funcionamento de tais sistemas. Atrelado a isto, está o conhecimento sobre inversores *Grid-Tie*, dispositivos que permitem a distribuição. Eles funcionam convertendo a tensão elétrica contínua que recebe de fontes de energia, em corrente alternada. A escolha do tipo de inversor *Grid-Tie* para ser usado também fez parte do estágio.

As tensões e correntes geradas pelo gerador serão alternadas. Para alimentação do inversor *Grid-Tie*, é necessário o uso de um retificador. Aspectos importantes sobre este dispositivo também foram discutidos durante o estágio.

3.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Dois fatos recentes aceleraram ainda mais o aumento da demanda por energia elétrica. O primeiro foi o programa Luz para Todos do governo federal. Esse programa teve início em 2003 e tinha como objetivo levar energia elétrica para localidades que até então não dispunham da mesma. O resultado desse programa é que até 2011 ele tinha atendido 14,2 milhões de pessoas. O segundo é uma relativa ascensão social alcançada pelas camadas mais baixas da população brasileira. Fato que aumentou o seu poder aquisitivo, e possibilitou a aquisição bens como geladeiras, televisões, entre outros objetos que consomem energia. Assim vemos que a demanda por energia no Brasil aumentou em um ritmo mais acelerado que o usual, e que a tendência é manter esse ritmo.

Sendo assim, há a necessidade de constante aumento da capacidade instalada da matriz elétrica brasileira. Associado a isso, temos uma das tarifas elétricas mais caras do mundo, o que torna muito atrativo a possibilidade de uma empresa ou até mesmo um consumidor residencial vir a se tornar um gerador da sua própria energia elétrica.

Esse sistema é conhecido internacionalmente pelo termo em inglês “*net metering*”. Nele, um consumidor de energia elétrica instala pequenos geradores em sua unidade consumidora (como, por exemplo, painéis solares fotovoltaicos ou pequenas turbinas eólicas) e a energia gerada é usada para abater o consumo de energia elétrica da unidade. A geração distribuída tem os seguintes propósitos:

- Propósito de Engenharia: Corresponde a utilização da geração distribuída como suporte ao sistema elétrico. O entendimento da geração distribuída como uma ajuda para prover parte da energia requerida e para melhorar o desempenho do sistema;
- Propósito Econômico: Corresponde a utilização da geração distribuída com caráter econômico. Como por exemplo, a utilização de reserva energética para garantir o fornecimento de energia elétrica das cargas nos horários em que a energia proveniente das fontes convencionais for mais cara;
- Propósito ambiental: Corresponde a utilização da geração distribuída em substituição da geração poluente de energia elétrica;

- Propósito social: Corresponde a utilização da geração distribuída em casos nos quais não há possibilidade de alimentação da carga por meio da rede elétrica convencional.

Há pouco tempo essa possibilidade não era economicamente viável, e as empresas que o faziam tinham como objetivo maior o marketing. Essa inviabilidade econômica ocorria por diversos motivos, por exemplo: alto custo dos painéis e a necessidade do uso de acumuladores (baterias), que são caras e possuem uma vida útil muito curta.

Em 2012, a Resolução Normativa N° 482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Os consumidores residenciais, comerciais e industriais podem gerar parte de sua energia nos seguintes moldes: o consumidor cuja geração exceder o consumo, receberá créditos para serem usados no momento em que o consumo exceder a geração, com validade de 3 anos, dispensando o uso de acumuladores.

Tendo em vista esse novo nicho de mercado, a SUNA ENGENHARIA tem o interesse em desenvolver novos dispositivos eletromecânicos para conversão de energia solar em energia elétrica.

3.2 CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA PRIMÁRIA

Por questões de termos de confidencialidade, o funcionamento detalhado da máquina primária não foi revelado. Sendo passadas apenas informações genéricas. Entretanto, de maneira geral, podemos explicar um pouco sobre seu processo de funcionamento.

A máquina primária consiste em um sistema de utilização do calor obtido a partir de painéis fotovoltaicos. Este calor aquece uma substância que se expande quando aquece, e contrai quando resfria. Com isso, é possível implantar um sistema de pistão-livre, semelhante ao motor de *Stirling*, que promove a geração de um movimento de vai e vem (linear). As etapas do processo de geração do movimento linear são mostradas na Figura 3.



Figura 3. Etapas no processo de geração do movimento linear.

3.2.1 MOTOR DE *STIRLING*

O ciclo termodinâmico no qual esse motor funciona, é composto de 4 fases: compressão isotérmica (temperatura constante), aquecimento isocórico (volume constante), expansão isotérmica e resfriamento isocórico. Este ciclo tem características muito próximas do chamado Ciclo de Carnot, que estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas.

É um motor simples, consistindo apenas de duas câmaras em diferentes temperaturas. Essas câmaras aquecem e resfriam o gás de forma alternada, o que provoca expansões e contrações cíclicas. Esses fenômenos fazem com que dois êmbolos ligados a um eixo comum se movimente. É instalado um regenerador entre as câmaras quente e fria, onde o calor que seria rejeitado na câmara fria fique armazenado para a fase seguinte de aquecimento. A Figura 4 ajuda a entender o processo.

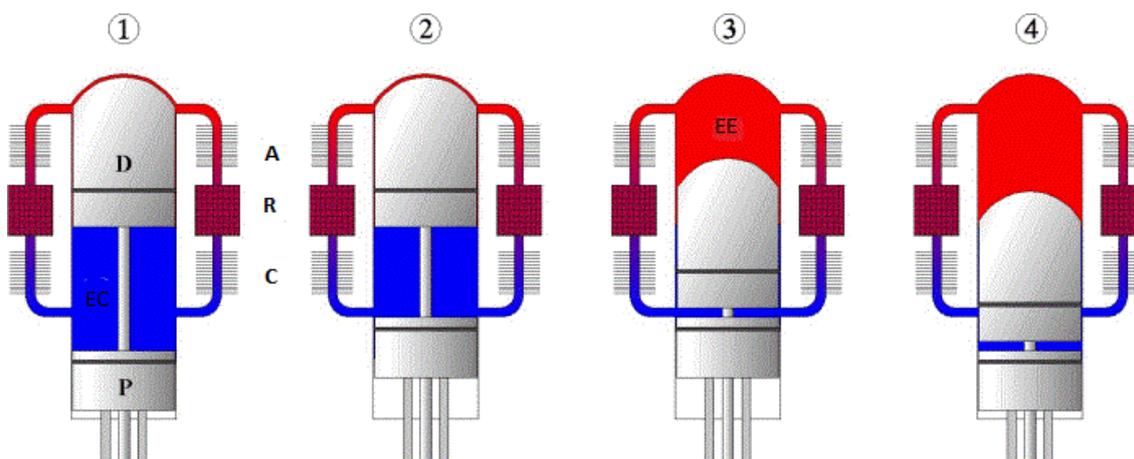


Figura 4 - Fases de funcionamento do motor de Stirling. EC = Espaço de compressão. EE = Espaço de expansão. P = Pistão. D = deslocador. A = Aquecedor. R = Regenerador. C = Cooler.

A carga que o conjunto máquina primária/gerador linear/conversor estático é a rede elétrica. O perfil de consumo é o doméstico.

3.2.2 JUSTIFICATIVA PARA O USO DO MOVIMENTO LINEAR

Na maioria dos sistemas a pistão-livre, ou motores de *Stirling*, o movimento linear gerado por estes é convertido em rotativo por um sistema de eixos. A máquina primária produz, então, um movimento giratório. Geradores elétricos rotativos são os mais comuns, e já tem tecnologia madura.

A partir dessas informações, surge o questionamento: por que ao invés de usar um gerador linear, não usar um convencional? Para responder a esta pergunta, é preciso uma análise das características da máquina primária em questão.

Não me foi revelado características minimalistas da máquina primária. A informação mais preciosa sobre o atuador primário, é que seu comportamento se assemelha a um motor de *Stirling*.

A partir de estudos mecânicos feitos pela empresa, comprovou-se que o sistema do atuador primário não pode trabalhar sob muito esforço de vibrações mecânicas. O movimento rotativo atua com dois graus de liberdade, o que contribui para o aumento destas vibrações. Desta forma, o movimento linear, que atua em apenas um grau de liberdade, foi definido como o mais adequado.

3.3 REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR LINEAR

Uma etapa importante do pré-projeto, é a definição de alguns requisitos, e a consequente elaboração de uma lista de especificações da máquina. A empresa tem uma série de necessidades, que culminam em alguns requisitos importantes. O gerador deve ser projetado de forma que:

- Converta energia mecânica proveniente de um movimento linear em elétrica;
- A estrutura deve ser leve;
- A estrutura deve ser compacta;

- A máquina deve estar pronta para trabalhar em frequência variável;
- Não deve haver excitação externa (máquina de ímãs permanentes);
- Máquina primária com comportamento semelhante aos motores de *Stirling*.
- Máquina monofásica.

Algumas especificações são definidas pensando na minimização dos gastos e maximização da potência gerada. Outras são designadas a partir do conhecimento prévio do comportamento da máquina primária, que tem funcionamento semelhante a um motor de *Stirling*. Entretanto, a maioria leva em consideração os requisitos acima expostos. As especificações do gerador estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações do gerador.

Descrição	Valor
Potência	1 kW
Eficiência	95%
Frequência máxima do movimento	50 Hz
Comprimento máximo do curso do ímã	45 mm
Material do estator	Aço laminado
Material da parte móvel	Aço laminado
Ímã	$\mu_r = 1.05$; $B_r = 0,84$ T
Material do enrolamento	Cobre; $\sigma = 5.77 \times 10^7$ S/m
Peso máximo	15 kg
Comprimento máximo	30 mm
Largura máxima	140 mm

Buscou-se na literatura projetos de modelos que atendessem as necessidades da SUNA ENGENHARIA. Fez um estudo comparativo, e o modelo que melhor atendeu as especificações foi escolhido para a fase de pré-projeto. As especificações acima expostas serviram de base para a decisão.

3.4 ESTUDO COMPARATIVO

Com base nos aspectos anteriormente evidenciados, pesquisou-se uma série de topologias. Dentre as topologias estudadas, quatro se destacaram por apresentarem características que melhor casam com as especificações pretendidas, sendo realizado nestas um estudo mais minucioso. Definiu-se como figuras de mérito para o estudo comparativo, por ordem de prioridade:

- Característica do movimento da parte móvel;
- Distribuição de linhas de fluxo na estrutura;
- Tipo de acoplamento magnético a ser usado;
- Modelagem matemática;
- Modos de construção;
- Formas de teste de funcionalidade.

Estas estruturas utilizam uma orientação transversal de fluxo no núcleo do estator, e uma orientação radial do entreferro de ar. As topologias foram comparadas entre elas, e uma foi escolhida.

3.4.1 TOPOLOGIA 1

O primeiro modelo trata-se de um *gerador linear de pistão livre* capaz de transformar energia química em energia elétrica por meio de sucessivos processos de combustão. Projetado para gerar energia utilizada na alimentação da parte elétrica de veículos híbridos. O projeto desta máquina é feito para aplicações em frequências constantes.

O gerador baseia-se em um sistema de pistão duplo construído em um cilindro. No início do cilindro há uma câmara de combustão que vai comportar o portador de energia que será usado no processo de combustão, que pode ser líquido ou gasoso. Uma mola de gás ajustável é construída na extremidade oposta. O volume da mola de gás

pode ser ajustado por meio de uma válvula de controle, e vai depender dos níveis de potência que se quer gerar. Quando a substância líquida ou gasosa entra na câmara, uma faísca é acesa, e a combustão acontece. Depois, os resíduos da queima são retirados por meio de uma das válvulas, dando espaço para uma substância fresca entrar pela outra válvula. Então, outra faísca é gerada, e o processo continua ininterruptamente [7].

Uma parte móvel com ímãs colados é montada entre os dois pistões do pistão duplo. A estrutura do gerador é completada por um estator onde as bobinas são enroladas. O processo de troca de substância e as sequentes combustões fazem com que um movimento de vai e vem seja gerado, e haja variação de fluxo, que é transverso, no núcleo das bobinas, induzindo tensão nos seus terminais. O arranjo do gerador é feito de modo que a parte móvel esteja sempre no interior do estator, em uma topologia que pode ser vista na Figura 5.

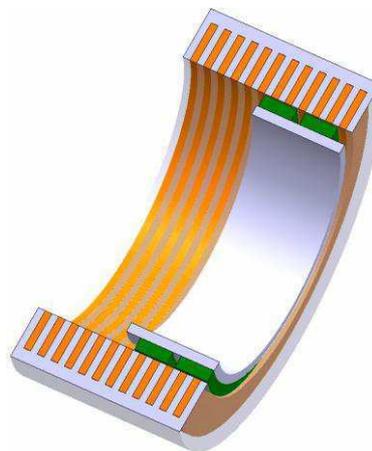


Figura 5. Corte na estrutura da topologia 1 que permite observar os enrolamentos no estator e a disposição dos ímãs na parte móvel da máquina [7].

O gerador da Topologia 1 foi projetado para gerar níveis de potência na ordem de 25 kW em frequência constante de 50 Hz. A força axial gerada no eixo no processo de combustão é de aproximadamente 6000N. O projeto inicial considera que a alta força axial exige que o modelo possua um peso em torno de 80 kg, o que limita sua utilização na nossa aplicação e dificulta testes de verificação de funcionalidade. A relação peso/potência gerada é 3,2 kg/kW, o que denota uma boa quantidade de energia gerada por massa do gerador. Além disso, a topologia proposta faz com que as bobinas sejam de difícil confecção, já que o caminho percorrido pelo enrolamento é longo, fato que

umenta o seu custo de fabricação [7]. Todas essas desvantagens fizeram com que esse modelo fosse descartado.

3.4.2 TOPOLOGIA 2.

O segundo modelo, assim como o primeiro, trata-se de um *gerador linear* que também funciona em um sistema de pistão duplo, com movimento gerado a partir de seguidos processos de combustão. A principal diferença entre os modelos reside no fato de que a parte móvel para este caso é maior que o estator. Ou seja, há momentos, em posições relativas distintas, que o ímã não está em contato magnético com a peça metálica do estator. Tal disposição estatórica foi escolhida com base no sistema em que essa estrutura vai atuar, e pode ser vista na Figura 6.

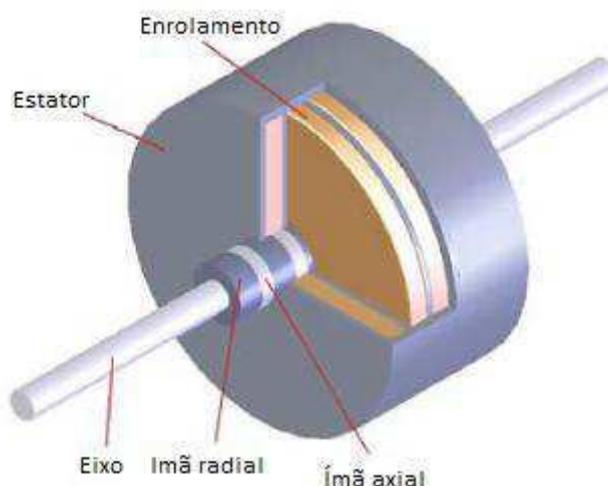


Figura 6. Vista da máquina da topologia 2 que permite observar os enrolamentos no estator e a disposição dos ímãs na parte móvel [8].

Esse gerador é projetado para gerar no processo de arranque de veículos híbridos. Dois grupos de seis bobinas estão localizados no compartimento do estator, a fim de montar um sistema trifásico. O sistema de geração completo possui uma câmara de pistão duplo, que pode ser alimentada por substâncias derivadas do petróleo ou gás natural. O movimento de vai e vem será gerado a partir de sucessivas combustões. Nesta máquina, sete ímãs permanentes radiais e seis axiais estão dispostos alternadamente, de modo a formar um arranjo magnético que será completamente montado sobre um eixo de alumínio [8].

O projeto dessa máquina prevê geração de correntes de pico na ordem de 7 A, com uma potência de 7 kW em uma frequência de operação muito alta (3000 ciclos por segundo). A topologia em questão apresenta tamanho próximo a 17 cm [8]. No estator, há a necessidade de uma armadura para blindagem magnética, que objetiva a diminuição do fluxo de fuga. O projeto é de uma máquina trifásica, e a modificação para o arranjo monofásico implica em grandes alterações do projeto inicial. A modelagem matemática para este caso é quase inexistente, o que dificulta no processo de simulação computacional, e no dimensionamento de parâmetros. Tendo em vista tais desvantagens, esse modelo foi descartado.

3.4.3 TOPOLOGIA 3

O terceiro modelo trata-se de um gerador linear tubular com ímãs no estator. A principal diferença deste para os outros encontrados na literatura, é a disposição dos ímãs na estrutura. Em geradores convencionais, os ímãs ficam presos na parte móvel, e a variação de fluxo ocorre predominantemente no estator da máquina. Para o caso em questão, ocorre exatamente o contrário: os ímãs ficam presos no estator do gerador, e a parte móvel é simplesmente uma peça metálica dentada de maneira tal a criar um caminho para o fluxo magnético. O projeto inicial prevê um gerador trifásico, com ímãs dispostos no estator e separados em fases. Cada par de ímãs são polarizados de maneira contrária, e constituem fases do gerador. A Figura 7 ilustra a topologia desta máquina, em corte transversal.

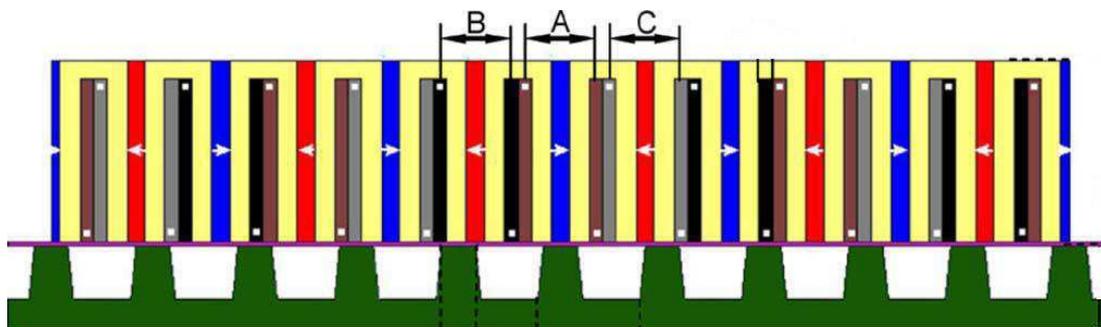


Figura 7. Corte transversal da máquina correspondente a topologia 3 permitindo ver o arranjo estator/rotor do Gerador e a Indicação das fases B, A e C [9].

Tanto os ímãs permanentes como os enrolamentos estão dispostos no estator. Desta forma, o fluxo transversal da máquina enlaça os enrolamentos, e varia de acordo com a posição relativa entre as bobinas e a parte móvel. A Figura 8 mostra o caminho de fluxo que liga um par de bobinas no estator, com respeito a duas posições diferentes.

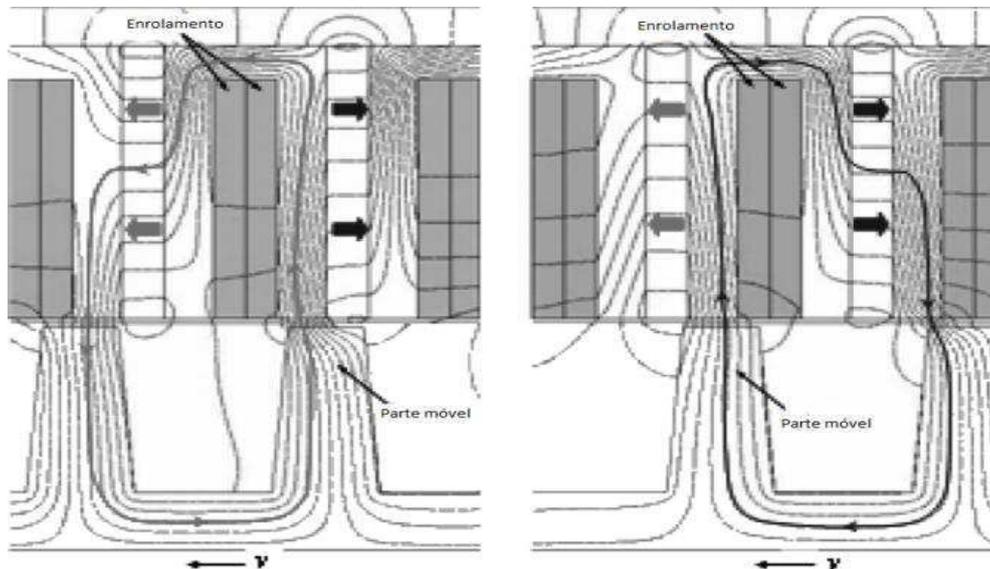


Figura 8. Corte transversal na topologia 3 que permite observar a distribuição de fluxo em duas diferentes posições da parte móvel [9].

Para o projeto da máquina em questão, os níveis de tensões geradas tem no máximo 4 V de pico, em uma velocidade da parte móvel de 1 m/s. Possui aproximadamente 21 cm de comprimento. A disposição particular dos ímãs e das bobinas nessa topologia proporciona um alto fluxo de fuga no entreferro, que tem tamanho considerável [9]. Tal fato implica em maior relutância, e, conseqüentemente, maior dissipação de energia no gerador, o que reduz a eficiência da máquina. A geometria desta máquina não favorece a construção dos polos. É preciso ferramentas específicas para o corte do metal na confecção dos dentes no estator e na parte móvel, o que encarece o projeto. A relação custo/benefício é alta, já que o custo da montagem é alto e a potência gerada é baixa, quando comparado a outros modelos. As desvantagens acima expostas fizeram com que esse modelo fosse descartado.

3.4.4 TOPOLOGIA 4

O quarto modelo trata-se de um gerador linear de curso curto. Tem como principal característica o comprimento do curso dos ímãs permanentes curto, estrutura tubular e a orientação transversal. O projeto deste gerador não tem designação específica, podendo ser acoplado a qualquer sistema de geração que promova um movimento linear. Nesta topologia não há atrito entre a parte móvel e o estator, o que dispensa o uso de lubrificação. O ímã está sempre em contato com o circuito magnético, em um deslocamento relativamente curto, o que permite a operação em frequência mecânica industrial. O ímã está sempre em contato magnético com o estator, fato que reduz a quantidade de fluxo disperso, e aumenta a eficiência da máquina.

A parte móvel é constituída por ímãs de magnetização radial, presos em um eixo de material ferromagnético. A estrutura permite modificações na parte móvel, existindo variantes do modelo com a parte móvel constituída apenas pelos ímãs. O estator da máquina é constituído por uma peça de material ferromagnético, vazada, inicialmente, em quatro posições, possibilitando os enrolamentos das bobinas. As bobinas são inseridas depois que a estrutura estatórica é construída, fato que dificulta a construção e possíveis alterações na geometria. Esta configuração pode ser alterada. Pode-se aumentar o número de posições vazadas, e, conseqüentemente, de bobinas. Estas operações permitem, de acordo com a aplicação, promover uma maior ou menor potência gerada [10]. As bobinas serão ligadas em série, e o número de espiras vai depender da potência que se quer gerar. O gerador é ilustrado na Figura 9.

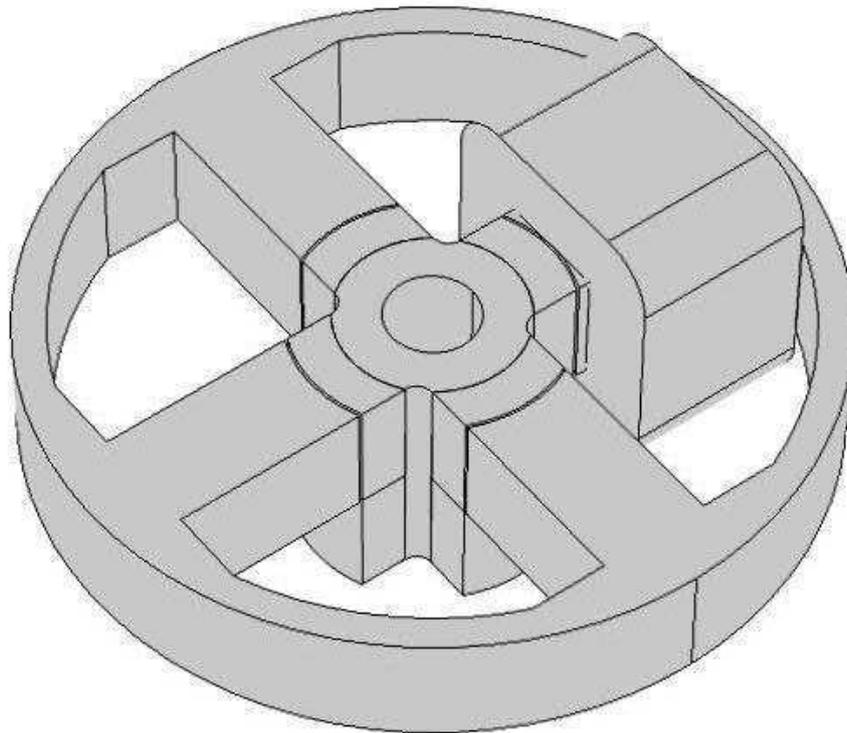


Figura 9. Vista da topologia 4 que permite observar a disposição dos ímãs na parte móvel, bem como a estrutura do estator.

A simetria da estrutura contribui para a implementação computacional, já que permite a criação de condições de fronteiras de simetria para isolamento e blindagem magnética que reduzem o esforço numérico. O entreferro é projetado para ser relativamente estrito, cerca de 1 mm, o que contribui para a diminuição da relutância no circuito magnético equivalente, e o conseqüente aumento da eficiência.

O projeto inicial prevê a construção de um gerador monofásico. O modelo trifásico pode ser obtido a partir do aumento do número de estruturas estatóricas. Gera algo em torno de 3,5 kW de potência em uma frequência de 50 Hz, a depender do número de bobinas e voltas de enrolamento. O peso desse gerador é de no máximo 13 kg, o que permite obter a relação peso/potência gerada como sendo aproximadamente 3,7 kg/kW, que é um bom valor [10]. O projeto inicial dimensionou o comprimento/espessura da estrutura com cerca de 9 mm, alterações nesse parâmetro são de fácil execução. O estator consiste de uma peça metálica vazada em posições dispostas ao longo da estrutura. A máquina conta com tamanho e peso excelentes, com possibilidade de réplica de peças, que leva ao aumento da capacidade de geração. Há

vários trabalhos publicados sobre essa estrutura, o que facilita no momento de dimensionar certas alterações que possam trazer melhorias à máquina.

Dentre as estruturas mencionadas, esta foi a que mais se destacou. Foi a estrutura escolhida na fase de pré-projeto do gerador linear.

3.5 INVERSORES *GRID-TIE*

A SUNA ENGENHARIA ambiciona a implantação de sistemas de geração distribuída, que injetam diretamente energia na rede. Devido às variações de tensão e corrente geradas, a interface direta do sistema de geração com a rede pública dá origem a problemas tais como as flutuações de tensão e cintilação. É, então, necessária a preocupação com a sincronização e a estabilidade da rede. Para que isto seja possível, utiliza-se um sistema de eletrônica de potência que permita o acoplamento elétrico entre o sistema de geração e o de distribuição. Uma das atividades do projeto consiste no dimensionamento de um retificador, que será acoplado ao inversor *Grid-Tie*. As etapas de geração e distribuição são apresentadas no esquema da Figura 10.



Figura 10. Etapas no processo de geração distribuída.

Na fase anterior a chegada de energia a rede, é necessário o uso de um inversor. Os inversores transformam corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), além de levar as baixas tensões do sistema de geração até os 110 V, 220 V ou outra tensão utilizada por um aparelho elétrico. Além disso, alguns inversores também podem carregar baterias desde que associados a um gerador ou à rede AC.

Existem dois tipos de inversores para energia alternativa:

- Inversores autônomos de uso específico, sem injeção na rede (*off-grid*):
Com eles é possível obter uma tensão alternada a partir de energia

acumulada em baterias. São usados em sistemas autônomos como barcos e sistemas de alimentação de emergência.

- Inversores de injeção na rede (*grid-tie*): Criam uma tensão alternada a partir do sistema de geração, sem recurso de uma bateria. São usados para injetar eletricidade na rede elétrica. Ou seja, permitem vender energia elétrica.

A SUNA ENGENHRARIA escolheu trabalhar com um inversor de tipo *Grid-Tie*. É o tipo de inversor mais usado nos países aonde produtores de energia alternativa vendem à concessionária local o excedente da produção, e compram de volta quando o consumo aumenta (Figura 11). Consiste em um dispositivo elétrico que permite os usuários de energia alternativa interligar seus sistemas de geração diretamente com a rede. Sendo assim, o excedente de energia produzido pelos sistemas alternativos, alimenta outros consumidores da rede.

O inversor funciona convertendo a tensão e a corrente elétrica, que recebe do sistema de geração, em corrente alternada. A principal vantagem dos inversores *Grid-Tie* é que ele é capaz de se interligar diretamente com a rede da concessionária. Possui a capacidade de produzir ondas senoidais puras, sincronizadas com a da rede de distribuição. Além disso, esses inversores também sincronizam a sua frequência de saída com a rede que se deseja conectar (60 Hz no Brasil). A saída do inversor *grid tie* pode ser conectada diretamente em uma tomada, facilitando seu uso e instalação. Os inversores *grid-tie* também são capazes de se desconectar da rede da concessionária quando esta última não está fornecendo energia, por um mecanismo chamado “ilhamento”. Isto evita eletrocutar pessoas durante procedimentos de manutenção.

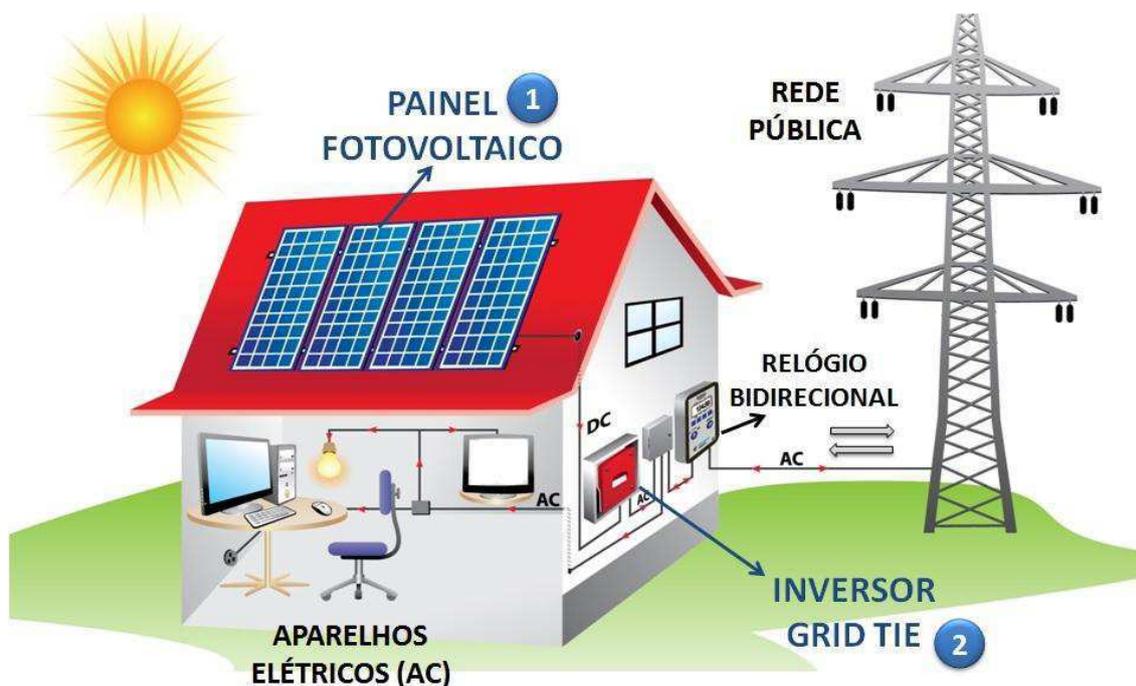


Figura 11. Sistema de Geração Distribuída utilizando *Grid-Tie*.

Como o projeto de sistema de geração em questão trata-se de um sistema de que tem comportamento de tensão e frequência gerada semelhante ao dos aerogeradores, o inversor grid-tie usado para geração eólica foi escolhido. Uma das atividades do estágio foi definir a potência do inversor a ser usado no sistema de geração, e assim poder escolher algum modelo disponível no mercado que se adéqua a necessidade da empresa. Além disso, especificar as condições ideais para que eles fossem instalados.

O inversor Grid-Tie deve possuir as seguintes características técnicas:

- Controle automático de Tensão e Frequência: O inversor deve monitorar os valores de tensão e frequência da rede elétrica. A partir desse monitoramento, deve haver o ajuste da energia gerada para os moldes da rede;
- Proteção de sobretensão e subtensão: O inversor deve identificar os níveis de tensão da rede. Caso estes não sejam compatíveis com os limites do dispositivo, deve haver o desligamento do mesmo;
- Proteção de sobrefrequência e subfrequência: O inversor deve identificar os níveis de frequência da rede. Caso estes não sejam compatíveis com os limites do dispositivo, deve haver o desligamento do mesmo;

- Onda senoidal pura: A tensão e corrente na saída do inversor deve possuir baixa distorção harmônica.
- Alto fator de potência: A tensão e a corrente na saída do inversor deve estar em fase com a tensão da rede elétrica;
- Controlador de carga: Protege eletricamente o inversor em condições de manutenção do sistema de geração;
- Proteção de ilhamento: Quando houver falha na rede elétrica, o inversor deve se desligar automaticamente.
- Proteção de sobrecorrente: O inversor é desligado automaticamente em caso de curto-circuito da rede elétrica;
- Proteção de sobretensão: Caso a temperatura máxima de operação seja ultrapassada, o inversor deve se desligar automaticamente;

A partir dos níveis de potência que se pretende gerar, e as condições de uso as quais o inversor será submetido, definiu-se algumas especificações, mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações do inversor Grid-Tie.

Potência nominal AC	1 Kw
Tensão de entrada DC	De 4 a 10 V
Tensão de Saída AC	190 a 260 V
Forma de onda na saída	Senoidal Pura
Frequência	De 59 a 61 Hz
Consumo em Standby	1,5W
Distorção harmônica total	Menor que 3% THD AC
Fator de potência	Maior que 0,98
Temperatura de operação	De 10°C a 60°C
Peso	Máximo de 6 kg

Outra etapa importante foi definir as condições de localização e cuidados para a instalação do inversor. São elas:

- Deve ser instalado em local seco, ventilado e seguro;
- Recomendada a instalação em caixas especiais ou dentro de quadros de equipamentos elétricos;
- Fixar os cabos de conexão com a máxima pressão possível;
- Uso de tomadas para conexão do inversor que atenda as especificações do fabricante;

Para a aplicação da empresa, a potência máxima pretendida é de 1kW. Isso implica na utilização da seção máxima dos fios para conexão de 2,5 mm². O disjuntor deve ser dimensionado para um nível máximo de corrente de 20 A.

3.6 RETIFICADOR

Para que o sistema de geração seja ligado ao inversor *Grid-Tie*, este precisa passar por uma etapa de retificação dos sinais de tensão e corrente gerador. A entrada do inversor precisa ser contínua. Definiu-se a utilização de um retificador de ponte completa com potência de 10 kW. Os valores de potência gerada não chegam a isso, mas nos dá uma boa margem de segurança. A indutância do gerador não pode ser muito alta, isto altera os níveis de tensão na entrada do retificador. O esquema do sistema de eletrônica de potência pode ser visto na Figura 12.

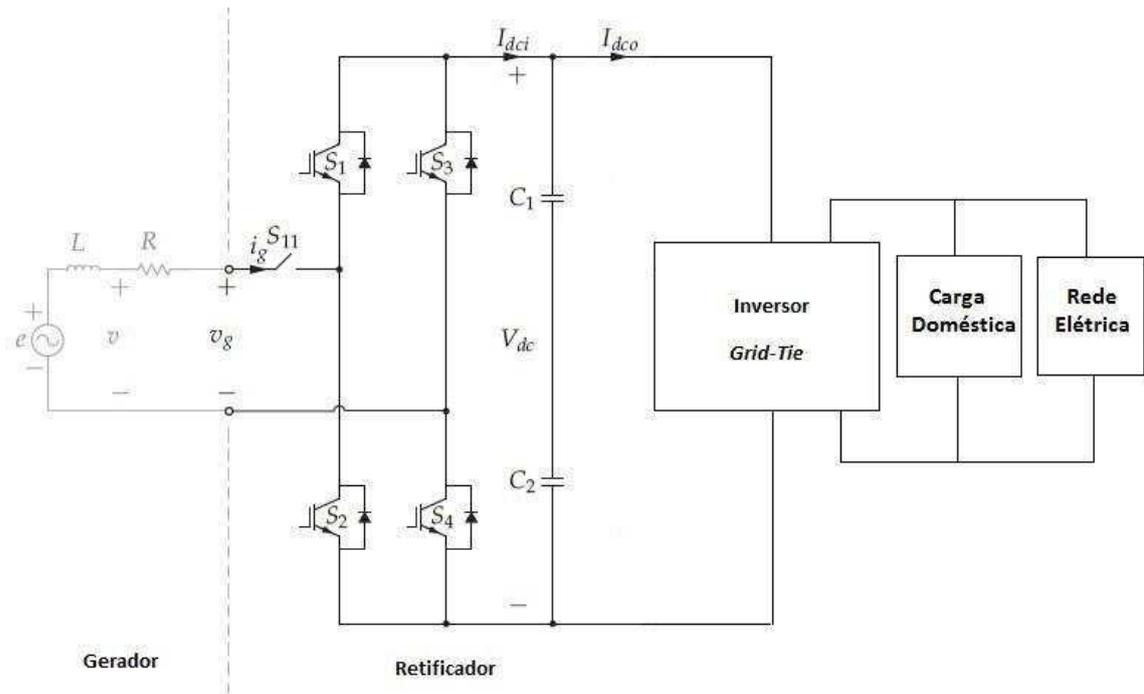


Figura 12. Arranjo Gerador/Retificador/Inversor.

4 CONCLUSÃO

O estágio integrado curricular garantiu a oportunidade de estagiar em uma empresa com foco na inovação tecnologia, comprometida com as questões ambientais. Os conhecimentos que haviam sido adquiridos em disciplinas como eletromagnetismo, máquinas elétricas e eletrônica de potência, puderam ser aplicados na prática, e foram consolidados. Novos conhecimentos, como o funcionamento de sistemas de geração distribuída e inversores *Grid-Tie*, foram adquiridos. Além disso, foi muito importante pelo aprendizado prático, traduzido nos diversos problemas de engenharia que tiveram de ser resolvidos. Foi possível estar presente em situações onde a atuação do engenheiro é decisiva.

Sobre o projeto do gerador linear, é importante evidenciar que se encontra ainda em processo inicial, com várias etapas a serem cumpridas. No desenvolvimento do pré-projeto, foi possível conhecer os meios de se projetar uma máquina elétrica e ter noção dos problemas envolvidos em trabalhos desse tipo: os parâmetros que são considerados, os cuidados que se devem tomar. Revelou-se como algo complexo, com uma enorme diferença entre as considerações teóricas e as práticas.

O estágio curricular cumpriu seu objetivo, pois proporcionou o enriquecimento profissional. Além de tudo, permitiu a convivência com profissionais de engenharia atuantes em outros seguimentos. Foi possível conviver com pessoal de engenharia química e mecânica, fato que ampliou os conhecimentos também nessas áreas.

BIBLIOGRAGIA

- [1] FITZGERALD, A. E.; JUNIOR, C. K.; UMANS, S. D. *Máquinas elétricas*. 6ª edição. Editora Bookman. 607 p.
- [2] BOLDEA, I.; NASAR, S. A. – *Linear Eletric Actuators and Generators*. Cambridge University Press, New York, 1997.
- [3] FERREIRA, A. P. S. – *Projecto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica*. Tese (Doutorado), Setembro 2011.
- [4] CONCKER, G., E. – *Projeto de motor de ímã permanente utilizando ferrite na configuração de ímãs enterrados*. Dissertação (Mestrado), Julho de 2008.
- [5] SCHUTTER, J. - *Optimisation of a transverse flux linear PM generator using 3D Finite Element Analysis*. Dissertação (Mestrado), Dezembro 2011.
- [6] BEIRÃO, G. F. - *Protótipo de um Gerador Linear para Aproveitamento de Energia das Ondas num Sistema AWS*. Dissertação (Mestrado), Maio 2010.
- [7] RINDERKNECHT, F.; HERZOG, H. *Calculation of a linear generator for a hybrid vehicle concept*. In: Internacional Conference on Eletrical Machines, 2010, Roma.
- [8] WANG, J. et al. *Design cosiderations for tubular flux-switching permanent magnet machines*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, Nº 11, Novembro de 2008.
- [9] PING, H. W.; AROF, H. *Design of a permanent magnet linear generator*. University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [10] JOUBERT, L. H. at el. *Design optimisation of a tranverse flux, short stroke, linear generator*. University of Stellenbosch, Stellenbosch, África do Sul, 2011.