

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
SEÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA / SE3**

**GUILHERME OLIVEIRA OSHIRO
RENAN ARRAES TELES HENRIQUE**

**MICROGERAÇÃO EÓLICA – ESTUDO DOS ASPECTOS
TÉCNICOS E REGULATÓRIOS PARA IMPLANTAÇÃO NO
IME**

Rio de Janeiro

2014

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
GUILHERME OLIVEIRA OSHIRO
RENAN ARRAES TELES HENRIQUE**

**MICROGERAÇÃO EÓLICA – ESTUDO DOS ASPECTOS
TÉCNICOS E REGULATÓRIOS PARA IMPLANTAÇÃO NO IME**

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial da Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Cláudio Canto dos Santos, M.Sc.

Rio de Janeiro

2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha
Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica e completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.

xxx.xx Oshiro, G. O. Henrique, R. A. T.
xxxxx

Microgeração Eólica - Aspectos Técnicos e Regulatórios para Implantação no IME / Guilherme Oliveira Oshiro, Renan Arras Teles Henrique – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014, 28p.

Projeto de Final de Curso (graduação) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2014.

1. Microgeração de Energia
2. Energia Eólica
3. Legislação da ANEEL I. Oshiro, Guilherme Oliveira. II. Henrique, Renan Arraes Teles

CDD xxx.xx

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

**GUILHERME OLIVEIRA OSHIRO
RENAN ARRAES TELES HENRIQUE**

**MICROGERAÇÃO EÓLICA – ESTUDO DOS ASPECTOS
TÉCNICOS E REGULATÓRIOS PARA IMPLANTAÇÃO NO IME**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Instituto Militar de Engenharia, como requisito para colação de grau no Curso de Engenharia Elétrica.

Orientador:

Aprovada em ____ de _____ de 2014 pela seguinte Banca Examinadora:

Cláudio Canto dos Santos, M.Sc., do IME – Presidente

Eumir Vergara Salgado, M.Sc., do IME

Sandro Santos de Lima, M.Sc., do IME

Rio de Janeiro

2014

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente às nossas famílias por serem nossa base e que nos apoiaram em todos os momentos nos quais precisamos.

Aos amigos, que sempre nos deram força ao longo desses 5 anos de IME e que tornaram a caminhada até aqui muito mais fácil.

Em especial, ao nosso orientador, Professor Canto, que nos conduziu ao êxito nesse trabalho. Que durante todo esse tempo de contato, sempre nos auxiliou da melhor maneira possível e que foi compreensivo em diversos momentos em que precisamos. Professor esse que é exemplo para nós de grande profissional por sua competência, sabedoria e empenho.

Contribuíram também todos os profissionais e professores do Departamento de Engenharia de Elétrica (SE/3). Em especial aos membros da banca, os Professores Sandro e Eumir, que deram suas opiniões e sugestões para que esse trabalho fosse concluído com excelência.

Muito

obrigado

a

todos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivo	7
1.2 Justificativa	8
1.3 Metodologia	8
1.4 Estrutura da Monografia	9
2 SUBESTAÇÃO ELÉTRICA.....	10
2.1 Função da Subestação.....	10
2.2 Tipo de Subestação.....	10
2.2 Principais Equipamentos de uma Subestação e suas Características	10
2.3.1 Transformadores de Força	11
2.3.2 Transformadores de Potencial.....	13
2.2.3 Transformadores de Corrente	13
2.2.4 Chaves Seccionadoras.....	14
2.2.5 Disjuntores.....	14
2.2.6 Pára-Raios.....	15
2.2.7 Resistências de Aterramento.....	16
2.2.8 Inversores de Potência	16
2.2.9 Relés de Proteção	16
3 GERAÇÃO EÓLICA.....	19
3.1 Aerogeradores.....	19
3.2 Potencial de Geração	31
3,3 Quantidade de Aerogeradores	23
4 ASPECTOS REGULATÓRIOS	27
4.1 Resolução ANEEL 482.....	30
4.2 PRODIST – Acesso ao Sistema de Distribuição	30
5 ANÁLISE DA CONEXÃO.....	30
5.1 Esquema de Conexão	30
5.2 Condutores	31
5.3 O Inversor e o Controle de Injeção de Potência	31
5.4 Distorção Harmônica	32
5.5 Ilhamento.....	33
5.6 Uso de Dois Medidores Unidirecionais.....	33
5,7 Estudo de Casos Já Implantados	1633
6 ADAPTAÇÕES NO IME.....	35
6.1 Proteção	35
6.2 Medição	35
6.3 Espaço Físico	35
7 CONCLUSÃO	38
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1 Exemplo de Subestação ao Tempo.....	11
FIG. 2.2 Transformador de Força.....	12
FIG. 2.3 Laço de Histerese.....	12
FIG. 2.4 Foto de uma Chave Seccionadora.....	14
FIG. 2.5 Foto de um Disjuntor.....	15
FIG. 2.6 Pára-Raios em uma Subestação.....	16
FIG. 2.7 Inversor de Potência ligado a Painéis Solares.....	17
FIG. 2.8 Relé SEL-700G.....	18
FIG. 3.1 Aerogerador de 2.4 kW no topo de um Edifício.....	19
FIG. 3.2 Potencial Eólico Médio do Inverno.....	21
FIG. 3.3 Potencial Eólico Médio do Verão.....	21
FIG. 3.4 Potencial Eólico Médio do Outono.....	22
FIG. 3.5 Potencial Eólico Médio da Primavera.....	22
FIG. 3.6 Aerogerador Air 40	23
FIG. 3.7 Aerogerador Skystream Land.....	24
FIG. 3.8 Aerogerador XZERES 442SR 10 kW.....	25
FIG. 5.1 Esquema de ligação do acessante à rede BT da Light.....	29
FIG. 5.2 Esquema da conexão do parque eólico com o QGBT do 6º piso.....	30
FIG. 5.3 Diagrama esquemático de um sistema VSC conectado à rede elétrica...31	
FIG. 6.1 Terraço do IME 1	34
FIG. 6.2 Terraço do IME 2.....	34
FIG. 6.3 Terraço do IME 3.....	35
FIG. 6.4 Terraço do IME 4.....	35

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
IME	Instituto Militar de Engenharia
MT	Média Tensão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SE	Subestação
UC	Unidade de Consumo

RESUMO

A conscientização ambiental da população tem despertado interesses em fontes de energia limpa, de baixa emissão de carbono, tais como energia solar e eólica. Esse interesse tem feito as tecnologias de geração de energia limpas avançarem rapidamente nos últimos anos e tem baixado seus custos ao ponto de que hoje é possível instalar uma microgeração de energia elétrica em residências ou comércios.

Neste trabalho, é feito um estudo sobre a viabilidade de instalação de um pequeno parque eólico no telhado do Instituto Militar de Engenharia. É feito também um estudo sobre o potencial de geração nessa localidade e das adaptações necessárias às subestações do Instituto, assim como os efeitos dessa geração sobre o sistema atual.

Todo esse estudo é feito tomando como base as normas vigentes de instalações elétricas de baixa e média tensão, assim como as normas da concessionária de energia elétrica para integração de um sistema de microgeração ao seu próprio sistema, no que tange segurança, eficiência e medição de consumo.

Palavras-chave: microgeração de energia, energia eólica, legislação da ANEEL.

ABSTRACT

The environmental awareness of the population has aroused interest in sources of clean energy (low carbon emissions) such as solar and wind power. This interest has made the technology to generate clean energy advance rapidly in recent years and has lowered its costs to the point that it is now possible to install power microgeneration systems in homes or businesses.

In this work presents a study on the feasibility of installing a small wind farm on the roof of IME. It also presents a study on the potential power generation in this location and the necessary adaptations to the substations of the Institute, as well as the effects of this on the current generation system.

This project has its basis on the current standards of low and medium voltage installations, as well as the norms for integrating a system of microgeneration to the power grid, regarding safety, efficiency and consumption measurement.

Keywords: microgeneration, wind power, ANEEL legislation.

1 INTRODUÇÃO

A microgeração vem sendo cada vez mais utilizada por indivíduos, em instalações residenciais, em pequenas comunidades e em instalações comerciais. Ela consiste na geração de energia elétrica por meios próprios, em vez do uso tradicional da energia proveniente da malha nacional de energia elétrica, que gera a energia elétrica em grandes centros tais como usinas hidrelétricas, térmicas e nucleares. A microgeração por sua vez gera energia a partir de turbinas eólicas ou painéis solares.

Apesar da microgeração ser relativamente de simples implantação e de crescente uso na sociedade, esse uso, na maioria das vezes, é motivado por motivos de consciência ecológica, já que essas energias são consideradas limpas e de baixa emissão de carbono. Além disso, é possível reduzir custos a longo prazo de consumo de energia. Isso é possível através da integração desse sistema de geração próprio a rede da concessionária. Assim, é medido quanta energia é gerada e esse valor é descontado da conta final cobrada. Essa integração deve atender a uma série de normas estabelecidas pela ANEEL e pela própria concessionários, as quais serão exploradas em maior profundidade ao longo deste projeto.

Devido a essa tendência, despertou-se o interesse da instalação de um pequeno parque eólico no IME, que vai atuar suplementarmente à rede de energia convencional que o Instituto atualmente utiliza. Neste trabalho, será feito um estudo com base nas normas vigentes, dos possíveis efeitos dessa conexão e das adaptações necessárias para que isso seja feito.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade de integração de uma microgeração eólica à subestação principal do IME. O projeto ainda envolve estudar as adaptações necessárias ao atual sistema do IME para que seja feita essa conexão de acordo com as normas vigentes da concessionária (*Light S.A.*) e da ANEEL.

1.2 Justificativa

Este trabalho foi motivado pela necessidade de modernizar o sistema elétrico do IME. Concomitantemente a essa modernização, vem a ideia de geração de energia limpa, de baixa emissão de carbono, por causa do atual quadro de conscientização ambiental em que estamos inseridos. Além disso, a instalação de um parque eólico é, a princípio, viável devido ao barateamento desses equipamentos nos últimos anos e ao interesse do corpo docente de possuir equipamentos desse tipo no Instituto para fins didáticos.

Portanto, a justificativa do presente trabalho é a de traçar as diretrizes para a instalação e integração de uma microgeração ao sistema elétrico do IME.

1.3 Metodologia

Esta pesquisa utilizará conhecimentos adquiridos de subestações elétricas, de geração e distribuição de energia e da legislação vigente que regula as normas de instalações de baixa e média tensão, além da conexão da microgeração à rede da concessionária no âmbito do Brasil. Depois de avaliado o potencial de geração eólica, será feita uma análise dos efeitos da ligação desse sistema de geração à rede do IME e, em seguida, um estudo sobre as adaptações necessárias às subestações para que se atendam todas as normas de segurança e eficiência.

1.4 Estrutura da Monografia

A monografia será dividida nos seguintes capítulos: 1-Introdução, 2-Subestação Elétrica, 3-Geração Eólica, 4-Aspectos Regulatórios, 5-Análise da Conexão, 6-Adaptações na Subestação, 7-Conclusão e 8-Referências Bibliográficas.

Os capítulos referentes à subestação elétrica, à geração eólica e à legislação no Brasil têm como função descrever o ambiente no qual será inserida a solução proposta, tanto teoricamente como legalmente.

No capítulo Subestação Elétrica, será apresentado o conceito de subestação elétrica, descrevendo o porquê de seu uso, os elementos que a compõe e os procedimentos de manutenção desta instalação.

No capítulo Geração Eólica, serão expostos os princípios básicos de geração de energia elétrica a partir do vento, além de ser explorado o potencial de geração de energia no IME.

O capítulo de Aspectos Regulatórios tem como finalidade descrever as principais normas que envolvem o presente trabalho e embasar a nossa posterior análise e adaptações propostas.

No capítulo Análise da Conexão, serão estudados certos fatores críticos ao projeto tais como condutores, THD, injeção de potência e controle de tensão.

No capítulo Adaptações no IME, serão mostrados os pontos em que, para atendimento às normas vigentes, será necessária a modificação da instalação elétrica do IME. Estão inseridos nessas mudanças novos equipamentos e modificações na estrutura física do Instituto.

Por fim, será mostrada a conclusão. Nela será feita a síntese de todo o trabalho, mencionando as dificuldades de implementação do sistema e a segurança por ele fornecida.

2 SUBESTAÇÃO ELÉTRICA

Uma subestação elétrica é constituída por uma série de equipamentos de manobra e equipamentos de transformação, podendo ainda conter um banco de compensação de reativos.

2.1 Função da Subestação

A subestação elétrica tem como principal finalidade o controle do fluxo de energia do sistema elétrico de potência, atuando também para a ramificação das linhas, visando a distribuição da energia elétrica. As subestações atuam também como pontos de proteção do circuito, evitando que faltas ocorridas a jusante atuem nas proteções dos geradores a montante.

2.2 Tipos de Subestação

As subestações podem ser classificadas, quanto ao seu emprego, em:

- Subestações transformadoras, ou;
- Subestações seccionadoras, de manobra ou de chaveamento.

As transformadoras têm a função de modificar a tensão, atuando de forma a diminuir as perdas na transmissão. Subestações próximas aos centros geradores são, em geral, elevadoras de tensão, ao passo que as que ficam próximas aos centros consumidores são, em geral, abaixadoras de tensão.

As seccionadoras, de manobra ou de chaveamento são aquelas que não atuam na modificação do nível de tensão, servindo como *checkpoints* de proteção e manobras, permitindo a energização de trechos de menor comprimento.

As subestações também podem ser classificadas, quanto ao seu tipo de instalação, em:

- Subestação externa ou ao tempo, ou;
- Subestação interna ou abrigada.

As subestações de instalação externa são aquelas em que os equipamentos ficam sujeitos às intempéries, necessitando de manutenção mais frequente.

Por outro lado, as subestações abrigadas são as que têm seus equipamentos instalados ao abrigo do tempo, havendo uma maior proteção dos mesmos.



FIG 2.1 – Exemplo de Subestação ao Tempo. (DUAILIBE, 1999)

2.3 Principais Equipamentos de uma Subestação e suas Características

A seguir será feita a apresentação dos principais equipamentos que compõem uma subestação comum típica.

2.3.1 Transformadores de Força

Transformadores de força são os grandes agentes que permitiram a distribuição de energia elétrica de um modo eficiente. Por meio da elevação de tensão que eles podem proporcionar, ficou viável a transmissão de energia elétrica a longas distâncias, sem haver tantas perdas nas linhas.

Os transformadores de força típicos são constituídos, basicamente, por um núcleo ferromagnético e dois enrolamentos, chamados de primário e secundário, conforme apresentado na FIG 2.2.

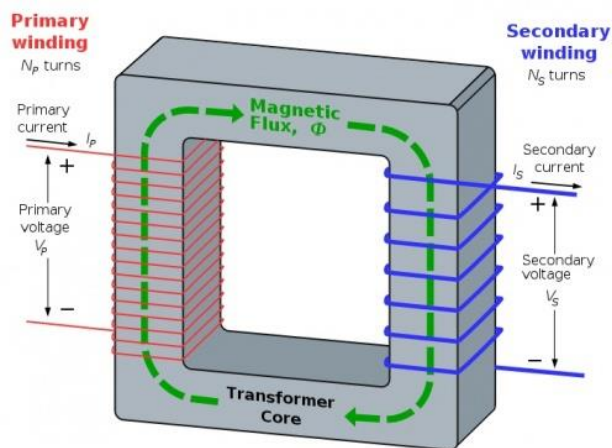


FIG 2.2 – Transformador de Força. (FREEDMAN, 2009)

A corrente primária I_p , quando se tratando de uma corrente alternada, faz variar o fluxo magnético dentro do núcleo ferromagnético. Essa variação de fluxo causa uma tensão induzida nos terminais do secundário do transformador, gerando a corrente I_s . As principais perdas do transformador estão relacionadas ao seu aquecimento (Efeito Joule) e à necessidade de uma pequena corrente de magnetização, a fim de alcançar o ponto de saturação da curva de histerese.

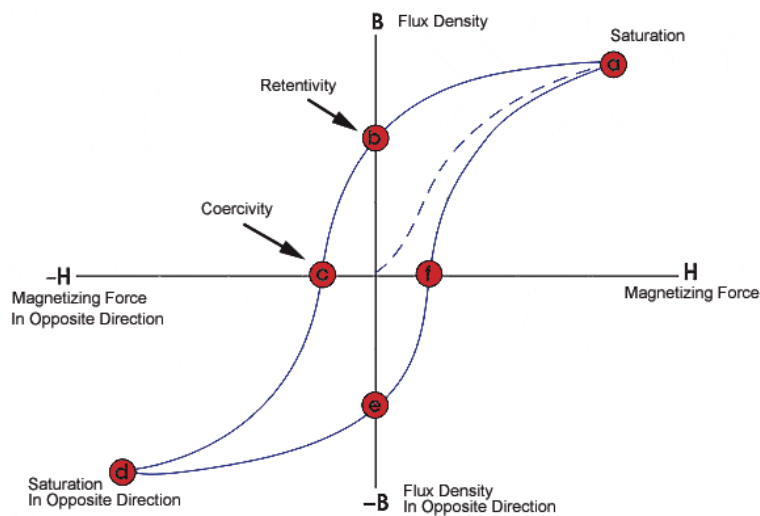


FIG 2.3 – Laço de Histerese. (FREEDMAN, 2009)

2.3.2 Transformadores de Potencial

Os transformadores de potencial são dispositivos cuja finalidade é reduzir o nível de tensão para quantidades compatíveis com a alimentação de medidores e relés. Seu princípio de atuação é semelhante ao dos transformadores de força, variando-se apenas a relação de espiras e a potência relacionada.

Para um transformador de potencial típico, o enrolamento primário contém um número N_p de espiras muito maior do que o número N_s de espiras no secundário. Isto faz com que a tensão no secundário seja muito menor, em geral sendo adotados os valores de 115V ou de 66,4V.

Isto permite que a medição e a atuação de relés seja obtida sem necessidade de grande aumento de isolamento dos seus componentes.

2.3.3 Transformadores de Corrente

De forma análoga ao transformador de potencial, o transformador de corrente também tem seu princípio de funcionamento análogo ao do transformador de força. A diferença reside no fato de haver um número diferente de enrolamentos e da potência transferida ser muito menor.

Para um transformador de corrente típico, o número N_p de espiras no enrolamento primário é muito menor que o número N_s de espiras do enrolamento secundário. Isso garante que a corrente alta que flui no primário é reduzida pela ação do transformador, repassando ao secundário uma corrente de menor magnitude.

Os transformadores de corrente são utilizados, principalmente, para alimentar equipamentos de medida e relés na subestação.

2.3.4 Chaves Seccionadoras

As chaves seccionadoras são dispositivos que têm por finalidade isolar equipamentos, trechos de circuitos e/ou barramentos.

Os tipos construtivos das chaves permitem a verificação visual, por parte do operador, de seu estado efetivo. Isto é, o operador sabe a situação do circuito pela simples visualização física da chave.

Seu acionamento pode ser feito manualmente ou por meio de motores. Para a presente pesquisa, consideraremos o acionamento motorizado.



FIG 2.4 – Foto de uma Chave Seccionadora. (SCHAK, 2013)

2.3.5 Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos de proteção do circuito, destinados a interromper e energizar circuitos, sob condições normais e anormais.

Podem ter sua atuação realizada por condições térmicas ou eletromagnéticas. A atuação térmica se dá pela dilatação de uma chapa bimetálica no interior do disjuntor, composta por dois materiais diferentes e que, com o aquecimento, enverga e abre o circuito.

Já a atuação eletromagnética se dá pela atuação de uma bobina que, na presença de uma corrente alta como a de curto-circuito, aciona uma mola e abre o circuito.

Deve-se atentar, principalmente, para os disjuntores instalados em subestações externas, pois estes ficam expostos às intempéries por um longo tempo. Contudo, devem manter seu mecanismo de atuação em condições de ser acionado a qualquer momento de forma segura.

Os tipos mais comuns encontrados no mercado são:

- Disjuntores a grande volume de óleo (GVO);
- Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO);
- Disjuntores de hexafluoreto de enxofre (SiF_6);
- Disjuntores a ar comprimido, e;
- Disjuntores a vácuo.



FIG 2.5 – Foto de um Disjuntor. (WEG S.A., 2013)

2.3.6 Pára-Raios

O pára-raios é o dispositivo destinado a limitar os valores de surtos de tensão gerados, principalmente, por descargas atmosféricas.

Este dispositivo deve atuar na presença de um valor de tensão elevado, maior ou igual ao valor conhecido como tensão disruptiva à frequência nominal, descarregando a corrente diretamente para a terra.

Os tipos mais utilizados para as subestações são o pára-raios de óxido de zinco e o pára-raios com gap e resistor não-linear.



FIG 2.6 – Pára-raios em uma Subestação. (LABORSOLUTIONS, 2013)

2.3.7 Resistências de Aterramento

O aterramento é uma das características mais importantes da subestação, pois dele provém a segurança dos diversos equipamentos elétricos que nela estão inseridos e que por ela são alimentados.

As exigências do nível de aterramento, ou seja, sua resistência de terra, variam de acordo com a sensibilidade de equipamentos com a qual se está trabalhando. Em hospitais e salas com computadores de última geração, é comum a exigência de uma resistência de 5 ohms ou menos, enquanto em locais de uso comum pode ser utilizada uma resistência de 10 ohms.

Este aterramento pode ser feito de diversas maneiras, dentre elas por meio de haste única, malha de hastes, hastes em linha, etc. Os fatores que influem de forma significativa na escolha da forma de aterramento são, principalmente, o solo da região em questão, o espaço disponível para realização do aterramento, a sensibilidade dos equipamentos e o orçamento disponível.

2.3.8 Inversores de Potência

Um inversor de potência é um dispositivo eletrônico capaz de transformar corrente DC em AC. Todos os parâmetros tais como capacidade, frequência de saída e voltagem de saída dependem do *design* específico do inversor.

As aplicações deste dispositivo são várias, tais como:

- Conexão de baterias a dispositivos elétricos como televisões, eletrodomésticos, lâmpadas, etc;
- Utilização em sistema de geração de potência em que se gera uma tensão DC e necessita-se realizar a conversão para AC para consumo ou distribuição;
- Em outros tipos de sistemas onde precisa-se realizar uma conversão DC/AC, normalmente em sistemas de grande porte.

Este dispositivo é particularmente importante neste trabalho devido ao fato de a geração tensão gerada pelo parque eólico ser do tipo DC. Assim, o uso de um inversor, embora não seja estritamente necessário, é conveniente e é a maneira mais comum de se fazer a integração da microgeração a uma rede de baixa tensão.



FIG 2.7 – Inversor de potência ligado a painéis solares (Mullberg Speyer, 2008)

2.3.9 Relés de Proteção

Os relés de proteção são de fundamental importância para a subestação elétrica, pois da coordenação do ajuste deles com os relés da concessionária

provém a segurança da instalação no que tange à controle de correntes com comportamento anômalo.

Neste quesito, convém destacar principalmente os relés com função 50 e 51, que são de atuação instantânea e temporizada, respectivamente. A figura a seguir mostra o exemplo de um relé com funções 50/51:



FIG 2.8 – Relé SEL-700G (SELINC, 2014)

Os relés têm de ser capazes de suportar as maiores correntes possíveis (em geral são curto-circuitos trifásicos) e devem estar coordenados seletivamente com as proteções a montante e a jusante.

Para ajustar o relé, são necessárias as informações de corrente de curto-circuito trifásico, curto-circuito bifásico, curto-circuito fase-terra e curvas de atuação dos disjuntores, chaves ou elos que se encontrem a montante e a jusante, a fim de permitir a coordenação da proteção.

3 GERAÇÃO EÓLICA

3.1 Aero geradores

Um aerogerador é um equipamento capaz de converter a energia eólica em energia elétrica. Isso é feito por meio de um gerador elétrico conectado a um cata-vento. Podendo chegar a eficiências na ordem de 50%, os aerogeradores de alta tensão são capazes de produzir até 70 MW de potência e devem ser instaladas em regiões de ventos constantes em magnitude e direção ao longo do ano.

Diferindo basicamente só em tamanho e peso, existem os aerogeradores de baixa tensão. Esses geradores pesam cerca de 100 kg e são, normalmente, instalado no topo de edifícios ou próximos a algum estabelecimento comercial. Com cerca de 20m de altura e pás com cerca de 2m, esses equipamentos tem uma vida útil de até 30 anos. São fabricados em múltiplos *designs* – 2 pás, 3 pás, multi-pás e formatos distintos – sendo o modelo de 3 pás o mais usual, devido a sua estabilidade estrutural. Além disso, eles são capazes de gerar de poucas unidades de quilowatts até algumas dezenas de quilowatts de potência na versão comercial.



FIG 3.1 – Aero gerador de 2.4 kW no topo de um edifício (Energiapura, 2013)

3.2 Potencial de Geração

O potencial de geração de energia elétrica é um parâmetro muito importante ao se estudar sobre a viabilidade de um projeto deste tipo. Esse parâmetro é influenciado por uma série de fatores, tais como: velocidade média do vento, sazonalidade da magnitude do vento e de sua direção. Além disso, é importante que a área de instalação do equipamento seja uma área que não encontre bloqueio direto do vento ou haja possibilidade de bloqueio no futuro.

Considerando o caso de aplicação deste projeto, o IME, sabemos que há baixa probabilidade de que se erga novos edifícios nas áreas próximas. Considerando a região como um todo, de acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, a região apresenta prévia viabilidade técnica por se tratar de uma região próxima a costa, situada na cidade do Rio de Janeiro.

A região em questão possui velocidade média dos ventos de cerca de 8.5 m/s, considerando uma altitude de 50m, e direção dos ventos favorável apontando, na média anual, para a direção noroeste. Dessa forma, resta saber apenas se a rugosidade do terreno em volta ao IME não representa, de fato, impedimentos significativos para a trajetória do vento, podendo comprometer a eficácia da turbina.

De acordo com a *webpage* do fabricante de turbinas eólicas comerciais *Satrix S.A.*, suas turbinas apresentam potência gerada máxima para velocidades maiores que 10m/s. O gráfico disponibilizado pelo fabricante registra ainda, com vento de 8.5 m/s, cerca de 50% dessa potência máxima gerada. É possível ainda que se capte uma maior velocidade média de ventos, devido à altura do edifício do IME somada a altura da turbina ser maior que 50m (altura registrada como base no Atlas do Potencial de Energia Eólica Brasileiro).

Com o objetivo de se estimar o potencial de aproveitamento eólico no IME, analisou-se a distribuição espacial média (W/m^2 de rotor) desse potencial nas diferentes estações do ano, de acordo com os seguintes gráficos:

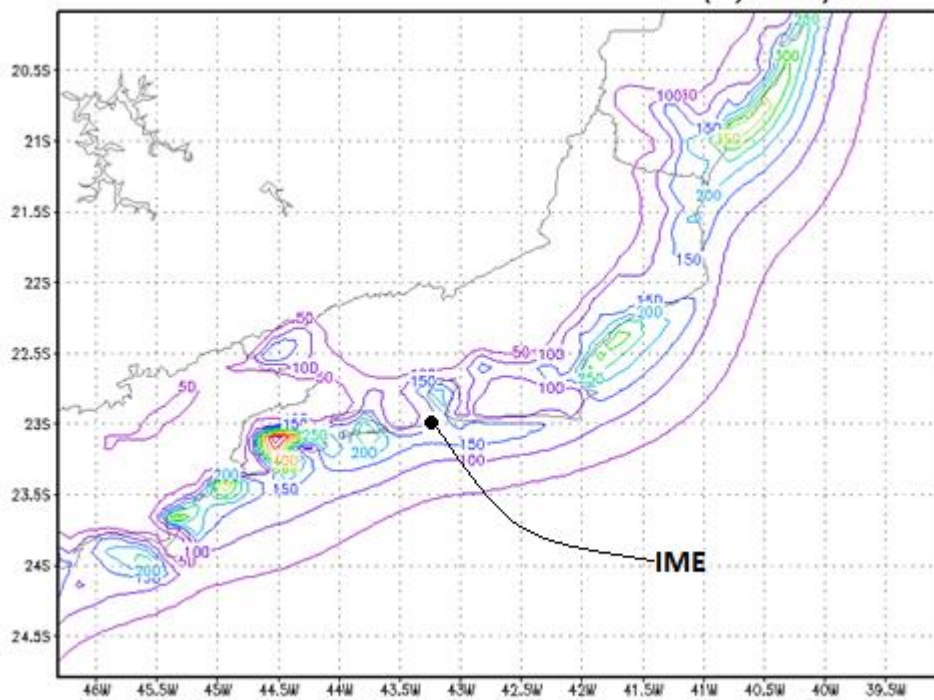


FIG 3.2 – Potencial Eólico Médio do Inverno

Da figura acima, se chega a um potencial eólico médio de 150 W/m².

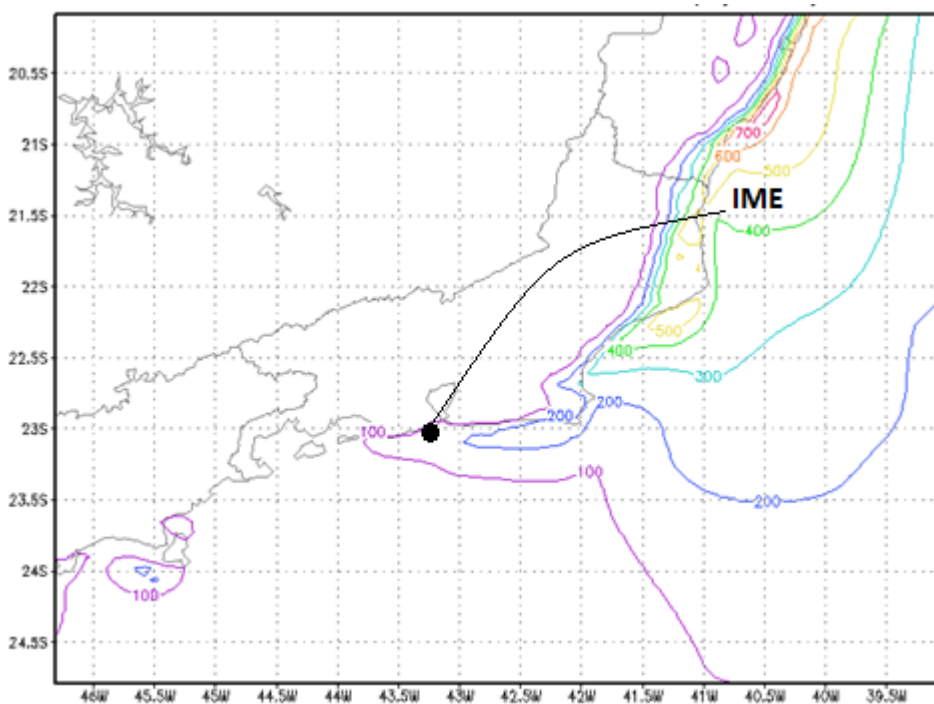


FIG 3.3 – Potencial Eólico Médio do Verão

Para o caso de verão, obtém-se potencial eólico médio de 100 W/m².

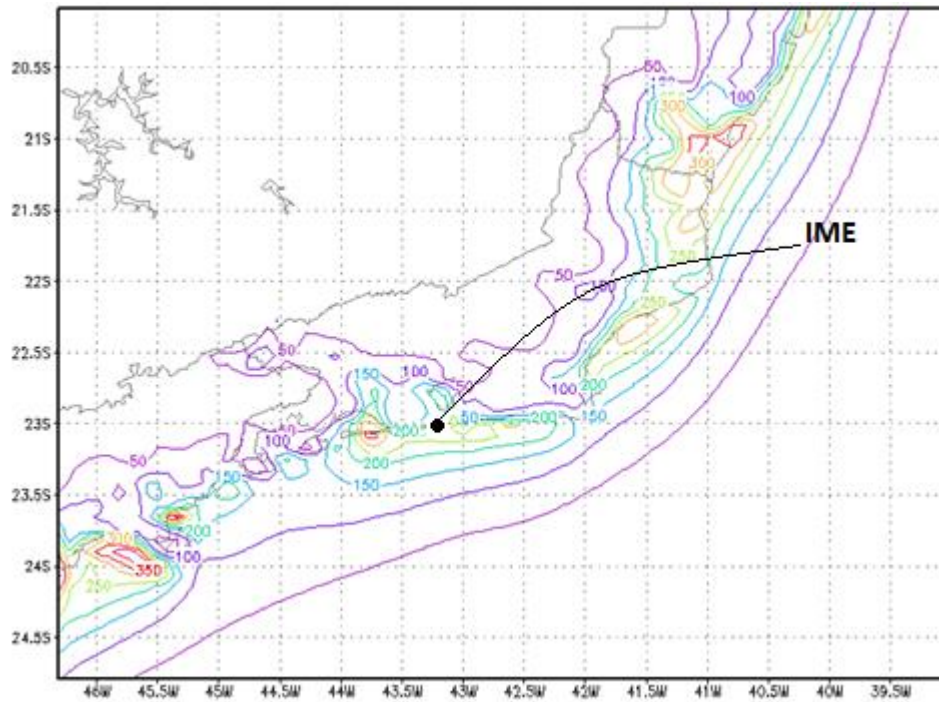


FIG 3.4 – Potencial Eólico Médio do Outono

Com base no exposto, chega-se a um potencial eólico médio de 200 W/m².

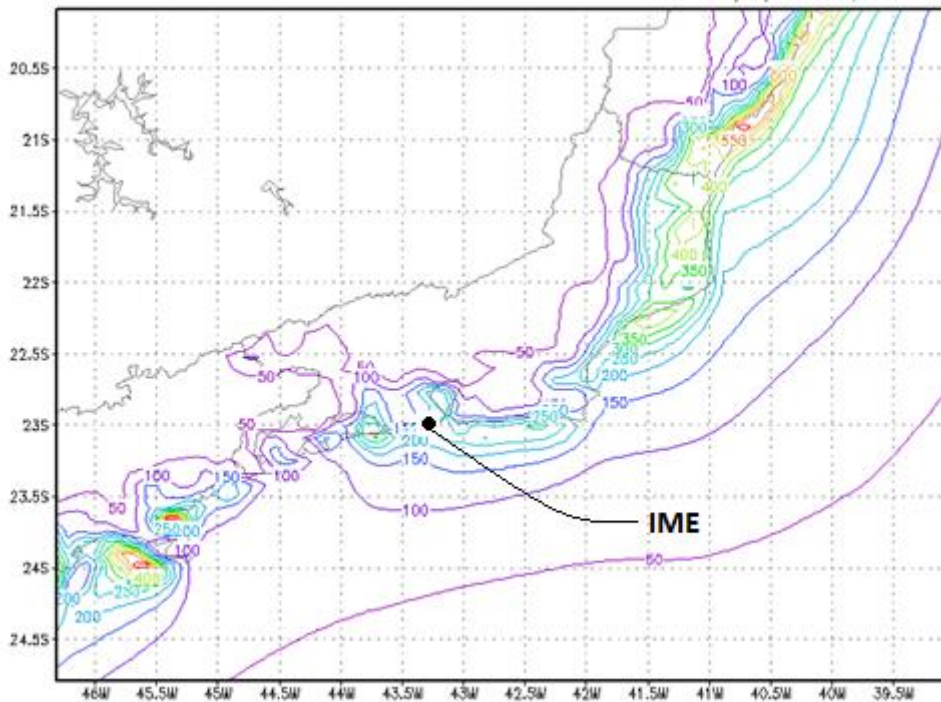


FIG 3.5 – Potencial Eólico Médio da Primavera

Para este último caso, obtemos um potencial eólico médio de 200 W/m².

Chega-se então a uma média de 162.5 W/m² ao longo do ano (18 UTC). De acordo com MOLLY, 1990, sob condições reais, 59,3% do potencial pode ser extraído por uma turbina eólica. Sob condições reais, não se alcança mais de 50% de aproveitamento útil em razão de diversas perdas, como por rugosidades do terreno, perdas na aerodinâmica do gerador, efeitos de sombra, etc.

Assim, o aproveitamento útil no IME pode ser estimado em, no máximo, cerca de 80 W/m².

3.3 Quantidade de Aerogeradores

Com o potencial útil de geração de 80 W/m², foram escolhidas cinco turbinas de um dos tipos a seguir para fins de estudo.

1) Aerogerador Air 40



FIG 3.6 – Aerogerador Air 40

Este aerogerador tem, de acordo com o fabricante, as seguintes características:

- Diâmetro do rotor: 1,17m;

- Peso: 5,9 kg;
- Potência nominal: 160W a 12,5 m/s (300W de pico);
- Voltagem nominal: 12V e 24V (selecionado de fábrica);
- Dimensões do rotor: 686x318x229mm (7.7kg);
- Preço: R\$ 3.543,00.

2) Aerogerador Skystream Land



FIG 3.7 – Aerogerador Skystream Land

Para este aerogerador, as características fornecidas pelo fabricante são:

- Diâmetro do rotor: 3,72m;
- Peso: 77 kg;
- Potência nominal: 2.4 kW;
- Vento para início de geração: 3,5 m/s;
- Velocidade nominal: 50-325 rpm;

- Alimentação: Inversor 120-240 V, 50-60 Hz;
- Preço: R\$ 44.900,00.

3) Aerogerador XZERES 442SR 10 kW



FIG 3.8 – Aerogerador XZERES 442SR 10 kW

Este aerogerador, de acordo com sua fabricante, tem as seguintes especificações técnicas:

- Diâmetro do rotor: 7,2m;
- Dimensão do suporte no chão: 200x250mm
- Altura da torre: 30m (ajustável);
- Potência nominal: 9,17 kW a 11m/s;
- Saída:
 - Monofásico
 - 208, 240, 277 VAC 60 Hz
 - 220=240 VAC 50-60Hz

 - Trifásico
 - 208Y120, 240 Δ

- 480Y277 VAC, 60 Hz
- 400Y240 VAC, 50 Hz
- Preço: R\$ 418.000,00

Assim, dadas as condições físicas do IME, ficaria inviável a implantação de qualquer um dos sistemas descritos acima para se gerar 20 kW, tendo o último dificuldades logísticas e estruturais para o posicionamento no terraço do instituto. Desse modo, serão utilizados cinco aerogeradores *Skystream Land*.

4 ASPECTOS REGULATÓRIOS

Nesta seção, serão abordadas as principais legislações que afetam este projeto nos diversos aspectos, tais como acesso, segurança, medição e eficiência.

4.1 Resolução ANEEL 482

A Resolução 482 da ANEEL de 17 de abril de 2012 tem como objetivo principal estabelecer as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, conforme o art. 1º.

Esta resolução define como microgeração toda central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes como base energia solar, eólica, hidráulica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme art. 2º.

4.2 PRODIST – Acesso ao Sistema de Distribuição

O PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Ele contém 9 módulos no total, sendo eles: Introdução, Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição, Acesso ao Sistema de Distribuição, Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição, Sistemas de Medição, Informações Requeridas e Obrigações, Cálculo de Perdas de Distribuição, Qualidade da Energia Elétrica e Ressarcimento de Danos Elétricos.

Para os fins deste trabalho, serão abordados os módulos 3 e 5, respectivamente, Acesso ao Sistema de Distribuição e Sistemas de Medição.

A seção 3.7 do PRODIST, tem por objetivo: “Descrever os procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de Distribuição”.

Na seção 4, Requisitos de Projetos, encontra-se uma tabela dos requisitos mínimos do projeto, de acordo com a potência instalada (no caso deste trabalho, essa potência é inferior a 100 kW).

EQUIPAMENTO	Potência Instalada de até 100 kW
Elemento de desconexão	Sim
Elemento de interrupção	Sim
Transformador de Acoplamento	Não
Proteção de sub e sobretensão	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não
Proteção contra desbalanço de tensão	Não
Sobrecorrente direcional	Não
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não
Relé de sincronismo	Sim
Anti-ilhamento	Sim
Estudo de curto-circuito	Não
Medição	Sistema de medição bidirecional
Ensaio	Sim

E inclui as seguintes notas:

- (1) Chave seccionadora visível e acessível que a acessada usa para garantir a desconexão da central geradora durante manutenção em seu sistema, exceto para microgeradores que se conectam à rede através de inversores;
- (2) Elemento de interrupção automático acionado por proteção para microgeradores distribuídos e por comando e/ou proteção para minigeradores distribuídos;
- (3) Não é necessário relé de proteção específico, mas um sistema eletro-eletrônico que detecte tais anomalias e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção;
- (4) Se a norma da distribuidora indicar a necessidade de realização estudo de curto-circuito, cabe à acessada a responsabilidade pela sua execução;
- (5) O acessante deve apresentar certificados (nacionais ou internacionais) ou declaração do fabricante que os equipamentos foram ensaiados conforme normas técnicas brasileiras ou, na ausência, normas internacionais;
- (6) O sistema de medição bidirecional deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede.

Além disso, convem destacar os seguintes pontos:

4.4 Nos sistemas que se conectam à rede através de inversores, as proteções relacionadas na Tabela 2 (mostrada acima) podem estar inseridas nos referidos equipamentos, sendo a redundância de proteções desnecessária para microgeradores distribuídos.

7.1.1 Para instalações em baixa tensão, a medição bidirecional pode ser realizada por meio de dois medidores unidirecionais: um para aferir a energia elétrica ativa consumida e outro para a gerada.

5 ANÁLISE DE CONEXÃO

5.1 Esquema de Conexão

Na FIG 5.1, é mostrado o esquema de conexão da microgeração na rede de baixa tensão através de inversor. A integração da microgeração consiste basicamente em conectar o dispositivo de geração a um inversor de tensão, seguido por um disjuntor e um dispositivo de seccionamento visível, logo antes da carga. Os elementos deste esquema serão discutidos em mais detalhes na seções seguintes.

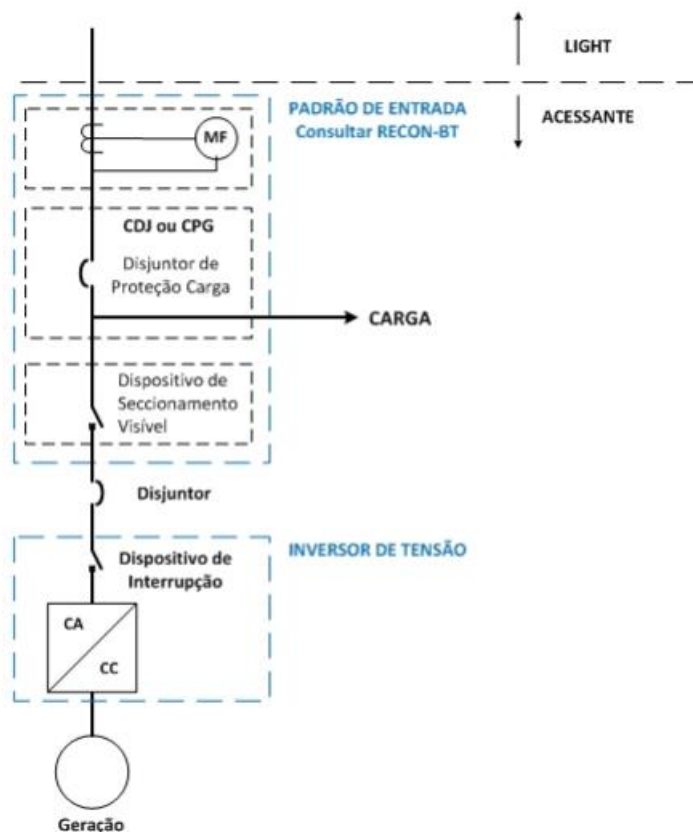


FIG 5.1 – Esquema de ligação do acessante à rede BT da *Light*

Como a geração será feita no terraço do IME, a conexão com a medição na subestação primária fica comprometida, uma vez que a geração se dá em baixa tensão e a distância a ser percorrida é grande, causando uma grande perda de energia no trajeto.

Como a Light exige a presença do medidor bidirecional, este deverá ser instalado obrigatoriamente. Entretanto, pelo fato da potência gerada (mesmo em seu máximo) não ser suficiente para atender a própria carga do IME, pode ser conectada a geração direto no QGBT do 6º piso, de forma a minimizar as perdas, conforme a figura a seguir:

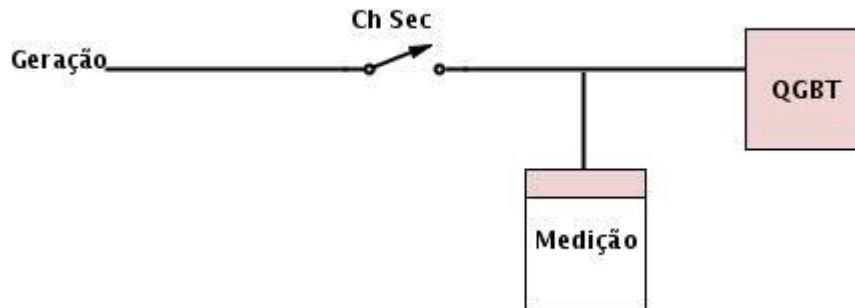


FIG 5.2 – Esquema da conexão do parque eólico com o QGBT do 6º piso

5.2 Condutores

De acordo com a normal nacional, para uma potência de geração inferior a 26,1 kW, é necessário uma bitola mínima dos ramais de entrada e ligação de 10 mm², tanto no caso do condutor ser XLPE ou PVC.

Assim, não é necessário redimensionar os condutores já existentes na instalação do IME.

5.3 O Inversor e O Controle de Injeção de Potência

Os controladores embarcados nestes sistemas são utilizados para controlar o modo de funcionamento destes conversores, nas faixas indutivas e capacitivas, conforme a necessidade do sistema.

O conversor VSC é conectado com a rede elétrica local no ponto comum de acoplamento (PCA), onde é realizada a troca de potência ativa e reativa do sistema VSC com a rede elétrica local. Assim, os conversores estáticos podem ser empregados com o objetivo de controlar o fluxo de potência ativa e reativa entre o sistema VSC e a rede elétrica a qual está conectada, de acordo com a figura abaixo.

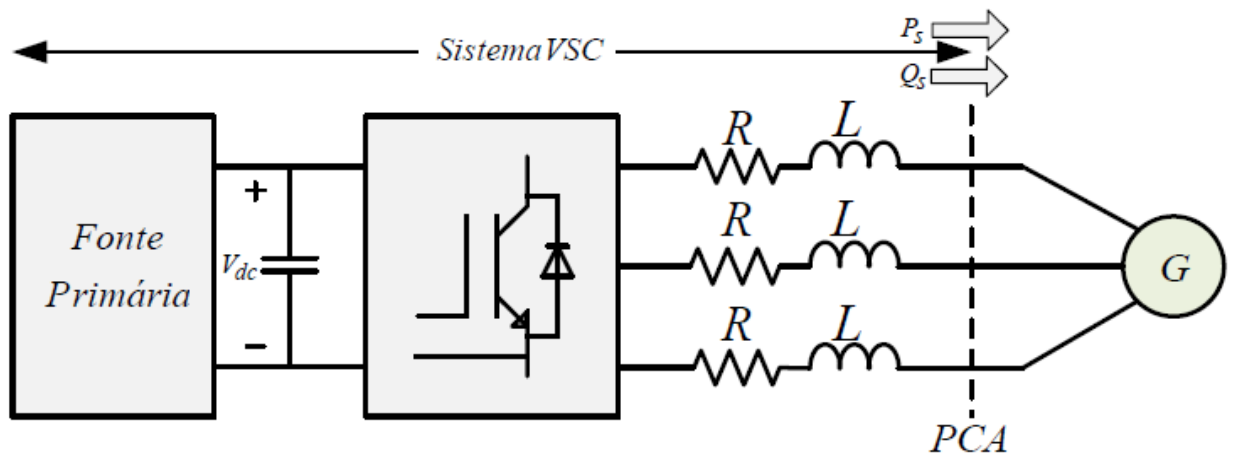


FIG 5.3 – Diagrama esquemático de um sistema VSC conectado à rede elétrica.

O controle da potência ativa e reativa no sistema VSC é realizado através do controle de corrente do lado CA. Nesta abordagem de controle, a fase e o ângulo da tensão de saída do conversor são controlados em relação a tensão de referência da rede.

Este modo de controle decorrente apresenta a vantagem de proteção do VSC contra sobre-corrente, robustez contra variação nos parâmetros do sistema, além de apresentar desempenho dinâmico superior ao controle por modo de tensão (Yazdani & Iravani, 2010).

5.4 Distorção Harmônica

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0 %
11° a 15°	< 2,0 %
17° a 21°	< 1,5 %
23° a 33°	< 0,6 %
Harmônicas pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0 %
10° a 32°	< 0,5 %

TAB 5.1 – Limites de Distorção Harmônica

De acordo com a tabela acima, a injeção de harmônicos na rede deve ser limitada, pois o chaveamento do inversor grid-tie não pode incorrer em acionamentos indesejados ou falhas no sistema do IME ou, em última análise, no do IME.

5.5 Ilhamento

Em caso de falhas na rede do IME alimentada pela concessionária, é indispensável que ocorra o desligamento da alimentação do sistema de microgeração eólica para não ocorrer a continuidade de fornecimento pelo sistema eólico em partes da rede do IME. Isso ocorre para garantir a segurança dos usuários e operadores do sistema. O inversor grid-tie atua como uma proteção contra o ilhamento e é indispensável para a adequação à norma do projeto em estudo.

5.6 Uso de dois medidores unidirecionais

A utilização de dois medidores unidirecionais não é possível, pois a norma não o permite para consumidores em média tensão.

De acordo com o item 7.1.1, Seção 3.7, Módulo 3 do PRODIST, "... para instalações em baixa tensão, a medição bidirecional pode ser realizada por meio de dois medidores unidirecionais: um para aferir a energia elétrica ativa consumida e outro para a gerada."

Assim, o medidor unidirecional do IME deve ser substituído por um bidirecional para a implantação do projeto em estudo.

5.7 Estudo de casos já implantados

A diretoria da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou em 17/04/2012 regras destinadas a reduzir barreiras para instalação de geração distribuída de pequeno porte.

Em virtude da natureza incipiente de projetos de microgeração eólica, é limitada a divulgação de projetos semelhantes ao aqui descrito. Publicações do gênero são

restritas e, aparentemente, os poucos projetos que já foram realizados não tiveram um caráter acadêmico, tendo pouca disseminação nas referências estudadas.

6 ADAPTAÇÕES NO IME

6.1 Proteção

Conforme abordado na seção 5.7, a microgeração deve estar devidamente protegida para evitar o caso de ilhamento. Do exposto, se faz necessária a aquisição de um inversor grid-tie para proteger o parque eólico do IME.

Convém notar que a potência de curto-circuito dos QGBT que ficam perto da microgeração será alterada. Neste caso, é interessante que sejam calculados os novos valores de corrente de curto-circuito, de modo a verificar se há a necessidade de troca dos disjuntores na instalação.

6.2 Medição

Como a norma da Light prevê, o medidor da subestação primária do IME deverá ser trocado por um medidor bidirecional. Por mais que a geração do parque seja insuficiente para exportar energia, esse é um procedimento obrigatório e deverá ser atendido.

A troca de medidor é feita pela própria Light, sendo os custos arcados pelo consumidor (no caso, o IME).

6.3 Espaço Físico

O espaço do terraço do IME foi analisado e, considerando que o encaixe no solo exija uma área de 5m² (2x2,5m), se faz viável a instalação das turbinas na área mostrada a seguir:



FIG 6.1 – Terraço do IME 1



FIG 6.2 – Terraço do IME 2



FIG 6.3 – Terraço do IME 3



FIG 6.4 – Terraço do IME 4

7 CONCLUSÃO

Concluindo o presente trabalho, vale ressaltar a importância deste tipo de estudo para viabilizar um projeto elétrico deste porte. É muito importante atentar-se para as normas em vigor tanto para garantir o êxito do projeto em termos de qualidade e segurança, tanto para resguardar os seus responsáveis legalmente.

Fez-se inicialmente um estudo da rede elétrica interna do IME, tendo em vista suas particularidades, em seguida estimou-se um potencial de geração do atual projeto, tendo como base a infraestrutura física do IME. Após isso, foi feita uma análise abrangente dos efeitos e cuidados nesta implantação, tendo sempre como base a legislação vigente. Tal legislação consistiu basicamente nas normas da ANEEL e ABNT referentes a instalações de baixa tensão e a integração de microgeração neste tipo de ambiente para embasar todo o estudo feito neste trabalho.

Concluiu-se então, no capítulo 6, as adaptações necessárias às instalações do IME para que seja concretizada a implantação da microgeração. Essas adaptações foram, essencialmente: instalação de medidor bidirecional, instalação da proteção grid-tie para prevenir o ilhamento da geração e a instalação física dos aerogeradores.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 5410. **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. 2004.

ABNT. NBR 14039. **Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0kV a 36,2kV**. 2003.

ANEEL, PRODIST. **Acesso ao Sistema de Distribuição**. 2012.

ANEEL, PRODIST. **Sistemas de Medição**. 2012.

COTRIM, Ademaro Alberto Machado Bittencourt. **Instalações Elétricas**, 5ª ed. Prentice-Hall, 2008. ISBN: 9788576052081.

COSTA, Cleyson Amorim. **Controle do Fluxo de Potência Ativa e Reativa de um Inversor de 5kva Conectado a Rede Elétrica Local**, 2012.

DUAILIBE, Paulo. **Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteções**. Consultoria para Uso Eficiente de Energia, 1999.

FREEDMAN, R. e YOUNG, H. **Física, 1ª ed, Vol III**. Pearson/Wesley, 2009.

LABORSOLUTIONS. Disponível em: <<http://laborsolutions.com/>>. Acesso em: 03 jun. 2013.

LAB-VOLT Systems. Disponível em: <<http://www.labvolt.com/>>. Acesso em: 02 jun. 2013.

LIGHT S.A., **Procedimentos para a Conexão de Microgeração e Minigeração ao Sistema de Distribuição da Light SESA BT e MT**. 2012.

LIGHT S.A., RECON-BT. **Regulamentação para Fornecimento de Energia Elétrica a Consumidores em Baixa Tensão**. 2013.

MAMEDE, João. **Instalações Elétricas Industriais**, 8ª ed. LTC, 2010. ISBN: 8521615205.

MAMEDE, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**, 3ª ed. LTC, 2005. ISBN: 8521614365.

NR-10. **Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. 2004.