

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

FERNANDA TIEMY YOSHIDA

**PROPOSTA DO EMPREGO DE UM CABO CONDUTOR FASE NU COM FIBRAS
ÓPTICAS NA REDE COLETORA AÉREA DE ENERGIA ELÉTRICA DE PARQUES
EÓLICOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2016

FERNANDA TIEMY YOSHIDA

**PROPOSTA DO EMPREGO DE UM CABO CONDUTOR FASE NU COM FIBRAS
ÓPTICAS NA REDE COLETORA AÉREA DE ENERGIA ELÉTRICA DE PARQUES
EÓLICOS**

Monografia apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo

Co-orientador: Eng. Luiz Fernando Ortega

CURITIBA
2016

TERMO DE APROVAÇÃO

FERNANDA TIEMY YOSHIDA

PROPOSTA DO EMPREGO DE UM CABO CONDUTOR FASE NU COM FIBRAS ÓPTICAS NA REDE COLETORA AÉREA DE ENERGIA ELÉTRICA DE PARQUES EÓLICOS

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 07 de novembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A aluna foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gerson Máximo Tiepolo
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
UTFPR

Prof. Esp. Luiz Fernando Ortega
Co-orientador – UTFPR

Prof. Dr. Jorge Assade Leludak
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus orientadores, os quais fazem parte da minha vida acadêmica desde a graduação e que me aconselharam, por várias vezes, não só na esfera profissional, tornando-se pessoas que admiro muito.

Gostaria de agradecer também àqueles que indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho –à minha família e amigos, pelo apoio, paciência e compreensão.

Também gostaria de expressar minha gratidão ao suporte recebido pelos fornecedores, os quais me ajudaram na obtenção dos dados utilizados nesse trabalho.

Por fim, já agradeço à banca avaliadora, pela atenção e contribuição.

RESUMO

YOSHIDA, Fernanda T. **Proposta do emprego de um cabo condutor fase nu com fibras ópticas na rede coletora aérea de energia elétrica de parques eólicos.** 2016. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Energias Renováveis) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.

Esse trabalho apresenta a proposição da utilização de cabos condutores com fibras ópticas (OPPC) na rede coletora aérea de energia elétrica em parques eólicos, a fim de ser uma alternativa aos métodos convencionais atualmente utilizados, quais sejam cabos condutores para a transmissão da energia e cabos ópticos dielétricos para a transmissão de dados. Este trabalho apresenta breve histórico da energia eólica no Brasil até os dias atuais, em que a competitividade do mercado traz a abertura para estudos de novas tecnologias, e mais baratas. Também exhibe informações sobre a rede coletora aérea convencional, rede coletora subterrânea e rede coletora com cabos condutor com fibras ópticas, dando foco principalmente nos cabos condutores e materiais neles empregados, sendo discutido o método de instalação de cada uma dessas três topologias. Baseada nessas informações e em uma rede hipotética de 12,9 quilômetros, é feita uma comparação do custo dos materiais e da instalação dessas redes. Por meio das informações obtidas foi feita a análise dos resultados do trabalho, os quais mostram que o cabo OPPC é uma alternativa viável de ser implementada nas redes de média tensão. Ademais, é um assunto que pode ser ainda mais explorado com base nesse estudo inicial.

Palavras-chave: Rede coletora aérea de energia elétrica. Cabos condutores com fibras ópticas. Cabos híbridos. OPPC.

ABSTRACT

YOSHIDA, Fernanda T. **Proposal for using a phase conductor with optical fibers in the electrical distribution line on wind power plants.** 2016. 63f. Final Course Assignment (Specialization Course in Renewable Energies) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.

This paper presents the proposal for using an optical phase conductor (OPPC) in the electrical distribution line on wind power plants, in order to be an alternative for the conventional grids currently used, which are conductor cables (without optical fibers) for energy transmission and dielectric optical cable for data transmission. Also presents a brief historical of wind energy in Brazil until the current situation, in which the market competitiveness enables the study of new technologies (and cheaper ones). Besides, brings information regarding the conventional electrical distribution line (aerial and underground) and electrical distribution line with a phase conductor with optical fibers, with an emphasis in the conductor cables and the raw materials that are made of. It has briefly discussed the installation method for which one of these three topologies. Founded on this information and considering a hypothetical grid with 12.9 km, it is compared the material and installation cost for the three grids. From these data, the conclusion of the paper proposal is made, showing the OPPC as a viable alternative to be implemented on electrical distribution lines. Furthermore, this is a subject, which can be more explored based on this initial study.

Keywords: Electrical distribution lines. Optical phase conductor. Hybrids cables. OPPC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das fontes na expansão da capacidade instalada em 2015	22
Figura 2 - Participação prevista por fonte na capacidade instalada em 2024	22
Figura 3 – Modelo de sistema elétrico de um parque eólico	24
Figura 4 - Formação típica de Cabos de Alumínio EC1350	27
Figura 5 - Formação típica de Cabos de Alumínio com Alma de Aço	27
Figura 6 - Formação típica de Condutores de Alumínio Liga	27
Figura 7 – Roldanas	29
Figura 8 - Talha manual (catraca)	29
Figura 9 – Esticador	30
Figura 10 – Tipos construtivos de cabos subterrâneos	31
Figura 11 - Guincho para puxamento	33
Figura 12 - OPPC com núcleo óptico encordado	36
Figura 13 - OPPC com núcleo óptico central	37
Figura 14 - Transporte de bobinas	37
Figura 15 - Sentido de desenrolamento da bobina	38
Figura 16 - Ângulo de lançamento do cabo OPPC	39
Figura 17 - Dispositivo para lançamento em estruturas em ângulo superior a 60°	39
Figura 18 - Saída do cabo do tambor do freio	39
Figura 19 - Esquemático da estrutura com derivação óptica	41
Figura 20 - Estrutura B1	43
Figura 21 - Estrutura B4	44
Figura 22 - Estrutura B3	44
Figura 23 – Conjunto de suporte completo para dielétrico	47
Figura 24 - Conjunto de ancoragem cabo dielétrico	47
Figura 25 - Caixa de emendas para cabo óptico	47
Figura 26 - Croqui da rede de média tensão do parque eólico	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oferta e demanda da energia eólica	23
Tabela 2 - Oferta e demanda da energia hidráulica	23
Tabela 3 - Características do Alumínio 1350.....	26
Tabela 4 – Características mecânicas da Liga de Alumínio 6201	26
Tabela 5 - Características elétricas da Liga de alumínio 6201	26
Tabela 6 - Características elétricas do Aço Galvanizado EHS Classe B	26
Tabela 7 - Características do cobre e do alumínio	31
Tabela 8 – Principais características dos materiais para isolação	32
Tabela 9 – Características do aço revestido de alumínio	35
Tabela 10 - Características mecânicas dos fios de aço revestido de alumínio	35
Tabela 11 - Características dos cabos OPPC	36
Tabela 12 - Características dos cabos a serem comparados.....	42
Tabela 13 - Custo dos cabos da rede aérea convencional	46
Tabela 14 - Custo dos cabos da rede subterrânea	46
Tabela 15 - Custo dos cabos da rede aérea com fibra óptica	46
Tabela 16 - Custos dos materiais para infraestrutura e instalação.....	49
Tabela 17 – Custos de instalação	50
Tabela 18 – Custos de cada rede por km	50
Tabela 19 - Características construtivas de cabos CA.....	60
Tabela 20 - Características construtivas de cabos CAA	61
Tabela 21 – Características construtivas de cabos CAL	62

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACS	<i>Aluminium Clad Steel</i>
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ADSS	<i>All Dielectric Self-Supporting</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CA	Cabos de Alumínio
CAA	Cabos de Alumínio com Alma de Aço
CAL	Condutores de Alumínio Liga
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CGE	Câmara de Gestão da Crise Energética
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPR	Etileno propileno
FO	Fibras ópticas
HEPR	Etileno propileno de alta módulo
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
LER	Leilão de Energia Reserva
LFA	Leilão de Fontes Alternativas
MAE	Mercado Atacadista de Energia
NBR	Norma Brasileira
OPPC	<i>Optical Phase Conductor</i>
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PE	Polietileno
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia

PIS	Programa Integração Social
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
Elétrica	
PVC	Cloreto de polivinila
RMT	Rede de Média Tensão de Energia
TR XLPE	Polietileno reticulado retardante à arborescência
XLPE	Polietileno reticulado
VC	Valores de Compra

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 JUSTIFICATIVA	16
1.5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 BREVE HISTÓRICO DAS FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL	18
2.1.2 Energia Eólica	18
2.2MODELOS DE CONEXÃO AÉREA E SUBTERRÂNEA DE EQUIPAMENTOS	23
2.2.1 Redes coletoras de média tensão aéreas	24
2.2.2 Redes coletoras de média tensão subterrâneas	30
2.2.3 Redes coletoras de média tensão aéreas – cabo condutor fase com fibras ópticas	34
3COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE REDES COLETORAS	42
3.1 Levantamento de custos para implantação	45
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	53
ANEXO A	60
CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CABOS CA (2013)	60
ANEXO B	61
CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CABOS CAA	61

ANEXO C	62
CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CABOS CAL	62
ANEXO D	63
CROQUI DA REDE DE MÉDIA TENSÃO DO PARQUE EÓLICO	63

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo constam o tema, o problema e as premissas, os objetivos, as justificativas, o procedimento metodológico, a estrutura do trabalho proposto.

1.1 TEMA

Historicamente, o modelo de compra de energia elétrica passou por mudanças significativas: inicialmente, empresas estatais eram responsáveis tanto pela geração quanto pela transmissão e distribuição da energia elétrica, porém, com a desverticalização das empresas do setor elétrico, privatização de distribuidoras e falta de estudos de planejamento desse setor na década de 1990, houve elevação nas tarifas elétricas além de diferenças entre oferta e demanda, e consequente racionamento de energia em 2001 e 2002 (COSTA; PIEROBON, 2008).

Nesse contexto, em 2004 houve a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) em substituição ao antigo Mercado Atacadista de Energia (MAE), bem como um novo modelo de regulação para o setor elétrico – modicidade tarifária e eletricidade como um serviço de utilidade pública –, no qual a venda de energia elétrica no mercado cativo é feita por meio de leilões (COSTA; PIEROBON, 2008). Ademais, nesse novo modelo existem dois ambientes de contratação: o Ambiente de Contratação Regulado (ACR), no qual são feitos contratos bilaterais regulados, e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), no qual existe a liberdade para negociação da compra de energia (CCEE, 2016).

Assim, nesse cenário de contratação de energia em ambiente regulado, em 2009 ocorreu o primeiro leilão exclusivo para contratação de energia gerada a partir de fonte eólica (2º Leilão de Energia de Reserva), seguido pelo 3º Leilão de Energia Reserva (agosto de 2010) e o 2º Leilão de Fontes Alternativas (agosto de 2010) (SALINO, 2011).

Essa notoriedade de geração de energia a partir de fontes renováveis, especificamente do vento e do sol, permanece em voga se analisados os dados divulgados no Balanço Energético Nacional 2016 – BEN 2016, no qual a energia elétrica obtida a partir da energia eólica aumentou 77,1% no ano de 2015 em relação ao ano de 2014 (EPE, 2016a). O 2º Leilão de Energia de Reserva 2015, por exemplo, realizado em 13/11/2015, contratou um total de 20 projetos de geração de energia eólica e 33 de geração solar fotovoltaica, representando investimentos totais de cerca de R\$ 6,8 bilhões no país nos próximos três anos (EPE, 2016b). Esse montante representa 548,2 megawatts em projetos de geração de energia por meio de fonte eólica, com um deságio de 4,5% em relação ao preço inicial de R\$ 213,00/MWh para R\$ 203,46/MWh (EPE, 2016b).

Corroborando com dados apresentados no BEN 2015, no Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2024, foi apresentada a expectativa de aumento em média de 3,9% por ano do consumo de energia elétrica, com o incremento da participação da energia eólica na matriz energética brasileira com previsão para 8% até 2024, sendo que atualmente esta participação é de 2% (EPE, 2015a).

Com essa notabilidade para a geração de energia a partir dos ventos, aumentam-se as pesquisas e desenvolvimentos de projetos mais otimizados, incluindo a Rede de Média Tensão de energia (RMT) e de telecomunicações em parques eólicos (OLIVEIRA, 2016).

Os principais modelos de redes de média tensão de energia são: aérea convencional, aérea compacta protegida e subterrânea, sendo que a rede de telecomunicações geralmente acompanha o *layout* da rede de energia, ou seja, caso a RMT seja aérea, é utilizado um cabo óptico aéreo para a transmissão de dados do parque eólico (COELHO, 2012).

Dessa forma, com o intuito de buscar novos modelos com melhor custo de RMT e transmissão de dados em um parque eólico, o objeto de estudo é o de propor a aplicação de uma rede coletora de média tensão aérea convencional com um cabo condutor fase com fibras óptica em um parque eólico comparando custos e método de instalação com as redes tradicionais (aérea e subterrânea).

Porém, devido ao fato de a solução de cabo condutor com fibras ópticas ainda estar em desenvolvimento, esse estudo não irá englobar a viabilidade técnica

e os custos levantados serão baseados nos protótipos já disponíveis e precificação fornecida pelo fabricante envolvido no projeto dessa solução.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

De acordo com o Plano Nacional de Expansão de Energia 2024 (EPE, 2015a), no período compreendido entre 2019 a 2024, o Brasil deverá retomar o crescimento econômico a uma taxa média de 4,3% a.a. (ao ano), de modo que desafios que já estão atualmente sendo enfrentados pelo setor de energia elétrica, continuem em evidência, tais como:

- taxa crescente da demanda de energia elétrica;
- aumento crescente de sistemas de geração de energia elétrica por combustíveis fósseis, demasiadamente poluentes e caros;
- níveis hidrológicos preocupantes dos reservatórios de usinas hidráulicas.

Acrescido a esse fato, está o aumento da agressividade dos preços médios praticados nos leilões. Enquanto em 2009 foi de R\$ 148,39/MWh, no Leilão de Energia de Fontes Alternativas (LFA 2015) realizado pela Aneel, o preço médio ficou em R\$ 199,97/MWh (EPE, 2015b). Inicialmente pode parecer um aumento no preço, porém há de se considerar fatores como variação cambial e inflação desse período de 2009 a 2015, aumentando desta forma a competitividade do mercado e fomentando estudos e desenvolvimento de projetos mais otimizados para a geração de energia a partir de fontes renováveis(SALINO, 2011).

Logo, considerando que as instalações elétricas podem chegar a representar 9% dos custos de um parque eólico(SALINO, 2011), as redes de média tensão daquele geram interesse em ser estudados e melhorados. Os principais tipos de rede são, segundo Sardeto (1999):

- rede de média tensão aérea convencional: tipo de rede elétrica mais comum, composta por cabos condutores nus (sem isolamento), sujeita a intempéries, como por exemplo, descarga atmosférica, esforços mecânicos e queda de árvores;

- rede de média tensão subterrânea: formada por cabos subterrâneos, isolados, que estão mais sujeitos a erros de implantação, principalmente relacionados aos conectores.

Além disso, a confiabilidade e disponibilidade do sistema de transmissão tem que ser tal que garanta o fluxo de informações com a CCEE e EPE para que não haja a dedução de 1% da receita mensal, aumentando as chances da rede de média tensão com cabo condutor fase com fibras ópticas ser uma alternativa para este mercado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2016).

1.3 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e objetivos específicos desse estudo.

1.3.1 Objetivo Geral

Propor o emprego de um cabo condutor fase com fibras ópticas na rede de distribuição de energia elétrica em um parque eólico de geração de energia elétrica.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram previstos os seguintes objetivos específicos:

- a) efetuar uma pesquisa bibliográfica sobre as fontes de energias renováveis no Brasil, com foco na energia proveniente do vento;
- b) efetuar uma pesquisa bibliográfica exploratória sobre os tipos de cabos para conexão aérea e subterrânea dos aerogeradores com a subestação, considerando a metodologia de implantação;

- c) levantar os custos de implantação das topologias exploradas na pesquisa bibliográfica e também da rede de média tensão aérea com cabo condutor com fibras ópticas;
- d) elaborar conclusão das comparações de custos das três topologias e, em consequência dessa inferência, avaliar a viabilidade para estudos técnicos mais profundos.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme supracitado, devido a introdução do Decreto nº 5.163/04 – regularização da comercialização da energia elétrica e processos de outorga da geração elétrica – e a Lei nº 10.848/04 – comercialização de energia elétrica – houve o aumento da competitividade no setor elétrico, reduzindo gradativamente a margem de lucro das empresas, de maneira que empreendimentos que conseguirem diminuir eficientemente os seus custos, que no caso de usinas os mais representativos são os relacionados a construção, operação e manutenção, poderão apresentar preços mais atrativos ao mercado (BRACIANI, 2011).

Logo, o emprego de um cabo condutor fase com fibras ópticas, de forma que não seja mais necessária a compra e instalação da rede óptica separada da rede elétrica dentro de um parque eólico, pode vir a ser um atrativo tanto na questão econômica quanto na questão de manutenção.

1.5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A pesquisa é, segundo definido por Gray *apud* Sekaran (2012, p. 10), “um esforço sistemático e organizado para investigar um problema específico que precisa de solução”.

Com base ainda na definição de Gray (2012, p.10), a natureza deste trabalho será aplicada, uma vez que possui o propósito prático com resultados

mensuráveis, além de possuir o propósito de otimizar algo já existente e praticado (GIL, 2002 p. 17).

O propósito dessa pesquisa é exploratório, já que possui como objetivo principal “o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições”, conforme definido por Gil (2002, p. 41). Ademais, como o objetivo é propor o emprego de uma nova tecnologia na rede de média tensão em parques eólicos (cabo condutor fase com fibras ópticas), esse trabalho será realizado por meio de buscas na literatura e da experiência de especialistas da área (GRAY, 2012 p. 36).

Por fim, como essa pesquisa será feita a partir de material já elaborado (livros, artigos científicos e relatórios), conforme explicado por Gil (2002, p. 44) possui o caráter bibliográfico a fim de viabilizar a comparação das redes de média tensão e de transmissão de dados já existentes (aérea e subterrânea) em relação a rede aérea com um cabo condutor com fibras ópticas (híbrido).

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho terá quatro capítulos, sendo eles:

O Capítulo 1 o qual apresenta, a introdução composta pela apresentação da proposta, delimitação do tema, os objetivos, a justificativa e os procedimentos metodológicos definidos na proposta para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 é destinado à introdução teórica, referente às fontes de energias renováveis no Brasil, com foco na energia eólica. Também será abordado os modelos conexão aérea e subterrânea dos aerogeradores com a subestação, considerando metodologia de implantação. Além disso, irá explorar os mesmos aspectos para uma rede aérea com cabo condutor fase (nu) com fibras ópticas.

O Capítulo 3 é feita uma comparação entre as vantagens e desvantagens do emprego desse cabo híbrido em relação aos modelos tradicionais.

No Capítulo 4 é reservado às considerações finais da pesquisa desenvolvida e proposição de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é realizada a revisão bibliográfica sobre os assuntos que esta pesquisa aborda, os quais são:

- a) breve histórico das fontes renováveis no Brasil, com foco energia eólica;
- b) pesquisa sobre os tipos de cabos para conexão aérea e subterrânea dos aerogeradores com a subestação, considerando metodologia de implantação. Além disso, irá explorar os mesmos aspectos para uma rede aérea com cabo condutor fase (nu) com fibras ópticas.
- c) pesquisa sobre a utilização de cabos condutores fase (nu) com fibras ópticas, considerando o método de instalação.

2.1 BREVE HISTÓRICO DAS FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL

A matriz energética brasileira foi fundamentalmente baseada nas hidrelétricas e, em menor escala, pelos combustíveis fósseis e nucleares, principalmente devido à demanda existente na década 70 associada à crise do petróleo, juntamente a falta de preocupação ambiental e social (SORIA; FILLIPINI, 2010).

As crises do petróleo de 1973 e 1979, porém, trouxeram à tona a volatilidade desse mercado e o fato de ser uma fonte finita, além de questionamentos quanto ao impacto ambiental (SORIA; FILLIPINI, 2010).

Com isso, houve a fomentação de estudos e desenvolvimento do mercado para fontes de energias renováveis, como a eólica, a qual será abordada com mais detalhes nas seções a seguir.

2.1.2 Energia Eólica

A geração de energia a partir dos ventos é recente no Brasil, devido ao padrão estabelecido no mercado, a toda a cadeia envolvida, às vantagens econômicas e ao grande potencial das hidrelétricas (LOPES, 2015).

Os primeiros estudos sobre a viabilidade técnica e econômica da geração eólica foram registrados na década de 80 pela Eletrobrás. Nessa época, pequenos parques eólicos foram instalados, como o parque de 100kW em Russas, Ceará, sendo que em 1986 foi desativado (FERREIRA, 2008).

A parceria entre a CHESF, CELPE e a Folkcenter tornaram possível a instalação do primeiro aerogerador (inicialmente de 75kW e depois substituído por um de 225kW) no Brasil em 1992 no arquipélago de Fernando de Noronha, a fim de promover o desenvolvimento da região (FERREIRA, 2008).

Nos anos 90 também começaram os estudos e congressos relacionados a essa fonte de energia, dentro dos quais se destaca o “I Encontro para Definição de Diretrizes para o Desenvolvimento de Energias Solar e Eólica no Brasil”. Desse encontro, no qual estavam 120 participantes de 79 entidades, surgiu a Declaração de Belo Horizonte, que previa a instalação de 1.000MW de geração eólica até 2005 (FERREIRA, 2008).

Em 1994 foi instalado o parque eólico interligado a rede (Morro do Camelinho) de 1.000kW. Já em 1996, foi instalada a usina eólica Macuripe. Também começaram a ser feitos os primeiros mapas de potencial eólico do país, fomentando a instalação de mais 7 parques eólicos nos anos posteriores, totalizando uma potência instalada de 26,7 MW (FERREIRA *apud* ANEEL, 1998).

Com relação aos programas e incentivos governamentais, podem ser destacados o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (FERREIRA, 2008).

O PROEÓLICA foi publicado por meio da resolução nº 24, de 5 de julho de 2001, no contexto da crise energética daquele ano, pela Câmara de Gestão da Crise Energética (CGE). Os principais objetivos eram, de acordo com Brasil(2001):

- I – viabilizar a implantação de 1.050 MW, até dezembro de 2003, de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica, integrada ao sistema elétrico interligado nacional;
- II – promover o aproveitamento da fonte eólica, como alternativa de desenvolvimento energético, econômico, social e ambiental;
- III – promover a complementaridade sazonal com os fluxos hidrológicos nos reservatórios do sistema interligado nacional.

Além disso, essa mesma resolução garantia que o grupo Eletrobrás se comprometeria a comprar, em um prazo mínimo de 15 anos, a energia produzida pelos empreendimentos na potência total de 1.050 MW. Ademais, trouxe a intervenção, por meio de regulamentação da ANEEL, nos valores de compra (VC), de forma que estes deveriam ser equivalentes ao valor de repasse para as tarifas. Dessa forma, os incentivos eram, segundo Brasil (2001):

- a) para os projetos implementados até 31 de dezembro de 2001 - 1,200 x VC;
- b) para os projetos implementados até 31 de março de 2002 - 1,175 x VC;
- c) para os projetos implementados até 30 de junho de 2002 - 1,150 x VC;
- d) para os projetos implementados até 30 de setembro de 2002 - 1,125 x VC;
- e) para os projetos implementados até 31 de dezembro de 2002 - 1,100 x VC.

Um importante fato é que o item “a” supracitado estava atrelado ao fato de que o projeto deveria ser implementado em 6 meses, de forma que se criou uma “corrida” para homologação de projetos na Aneel (FERREIRA, 2008).

Outro fator interessante do PROEÓLICA é que o único fabricante na época no Brasil era o alemão Wobben Wind Power, o que fez com que o governo tivesse que disponibilizar incentivos adicionais, como a isenção do Imposto sobre Produto Industrializado (IPI) em equipamentos eólicos durante o ano de 2002 para que o programa fosse viável aos investidores (FERREIRA, 2008).

Assim, o PROEÓLICA serviu como base desconhecimento para a criação do PROINFA, o qual teve o seu início em 26 de abril de 2002 após a publicação da Lei nº 10.438 (BRASIL, 2002).

O objetivo desse programa de incentivos era, segundo Brasil (2002):

aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, concebidos com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, no Sistema Elétrico Interligado Nacional.

Assim, seria garantida a diversificação da matriz energética brasileira, aumentando a segurança no abastecimento, além do impulso à economia regional (BRASIL, 2002).

O PROINFA foi dividido em duas etapas, sendo que na primeira estava prevista a contratação, pela Eletrobrás, de 3.300MW gerados a partir das fontes

supracitadas, com o funcionamento dos projetos até 2008. O valor da energia a ser paga seria proporcional a tecnologia empregada, porém limitado em até 90% da tarifa média nacional de fornecimento ao consumidor final nos últimos 12 meses para energia eólica, além de contratos com prazo de 20 anos. A segunda etapa, por sua vez, aconteceria após o atendimento da meta de 3.300MW, sendo que o objetivo era que as fontes de geração de energia abrangidas pelo programa fossem responsáveis por 10% do consumo de energia elétrica anual do país, em um prazo de até 20 anos (BRASIL, 2002).

Em relação aos incentivos financeiros, além das tarifas “*Feed-in*”, o governo disponibilizou subsídios de financiamento via Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (FERREIRA, 2008).

Devido à complexidade envolvida, esse programa passou por várias revisões, que englobavam, por exemplo, cálculo de tarifas, período de vigência comercial e níveis de eficiência. Apesar disso, até 31 de dezembro de 2011, o PROINFA gerou a implantação de 119 empreendimentos, sendo 41 eólicas, 59 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 19 térmicas a biomassa (ELETROBRAS, 2010).

A representatividade do PROINFA no desenvolvimento do mercado de energia eólica no Brasil também é vista por meio do aumento de fabricantes de aerogeradores, pás, torres, ou seja, da cadeia de fornecedores criada que fez com que a capacidade de produção, em 2012, fosse cerca de 4.600MW/ano (BASQUES, 2014).

Como reflexo desses incentivos e necessidade de mercado, em 2015 foi a fonte de energia mais representativa na expansão da capacidade instalada (39,5%), conforme a Figura 1, com estimativa de participação em quase 12% na capacidade instalada em 2024, conforme a Figura 2 (EPE, 2015a).

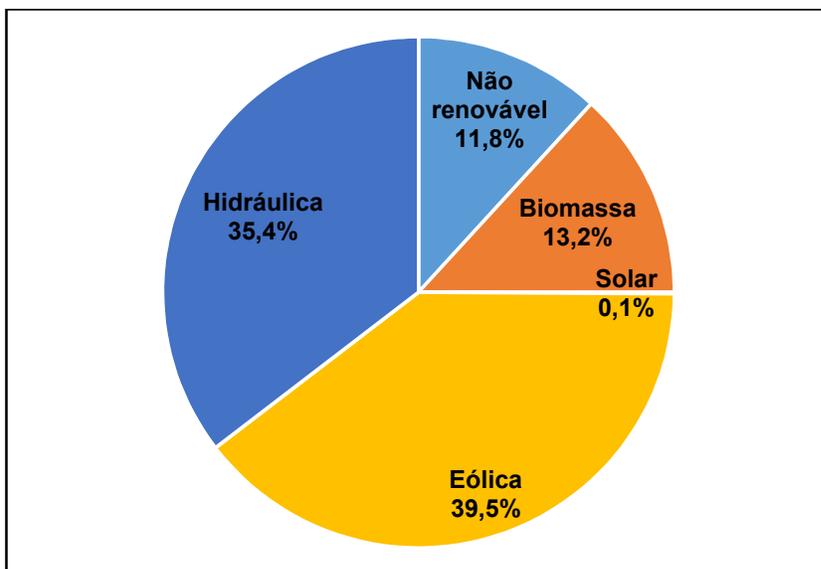


Figura 1 - Participação das fontes na expansão da capacidade instalada em 2015
 Fonte: Adaptado de EPE(2016a).

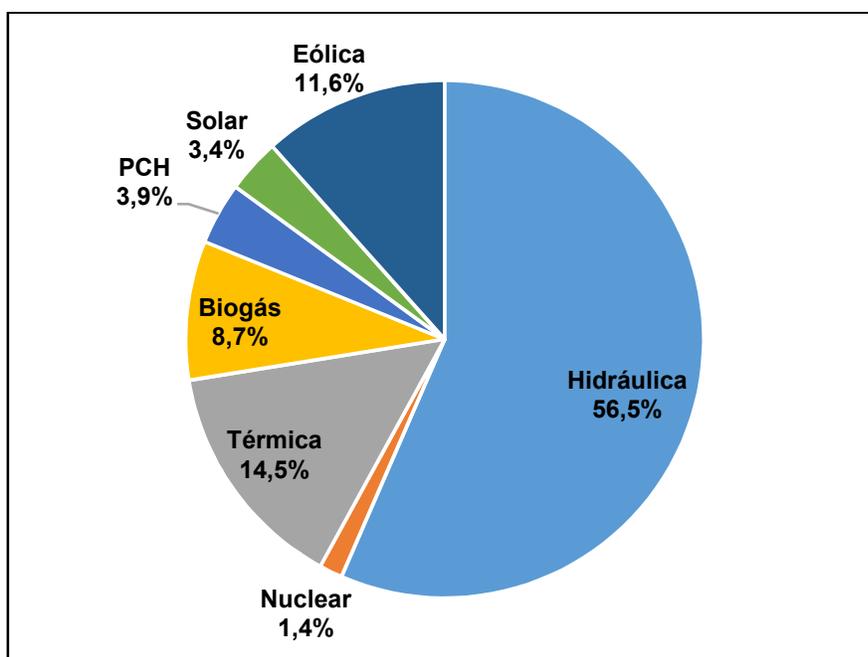


Figura 2 - Participação prevista por fonte na capacidade instalada em 2024
 Fonte: Adaptado de EPE (2015a).

Um dado tão importante é o crescimento da participação da energia eólica na capacidade instalada ao longo dos anos de 2009 a 2015, com o crescimento de 77% entre 2014 e 2015, conforme mostra a Tabela 1, e em contrapartida o decréscimo da participação da energia hidráulica de aproximadamente 4% no mesmo período, como mostra a Tabela 2.

Tabela 1 – Oferta e demanda da energia eólica

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Geração total (GWh)	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	12.210	21.626
Consumo total (GWh)	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	12.210	21.626

Fonte: Adaptado de EPE (2016a).

Tabela 2 - Oferta e demanda da energia hidráulica

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Produção (GWh)	390.988	403.290	428.333	415.342	390.992	373.992	359.743
Consumo total (GWh)	390.988	403.290	428.333	415.342	390.992	373.992	359.743

Fonte: Adaptado de EPE (2016a).

Assim, atualmente essa fonte tornou-se constante nos leilões de energia, como por exemplo o Leilão de Fontes Alternativas de 2015 (LFA 2015) e o 2º Leilão de Energia Reserva 2016 (2º LER), com preços médios cada vez mais agressivos (EPE, 2016c).

2.2 MODELOS DE CONEXÃO AÉREA E SUBTERRÂNEA DE EQUIPAMENTOS

Com esse aumento de representatividade e competitividade no mercado de parques eólicos, uma das partes constituintes deste é a rede de média tensão (coletora), a qual é responsável por transmitir a energia elétrica em 13,8kV ou 34,5kV, que é gerada nos aerogeradores em 690V e elevada em um transformador normalmente dentro do próprio equipamento, até a subestação coletora. De uma forma geral, o modelo do sistema elétrico de um parque eólico é definido conforme a Figura 3 (OLIVEIRA, 2016).

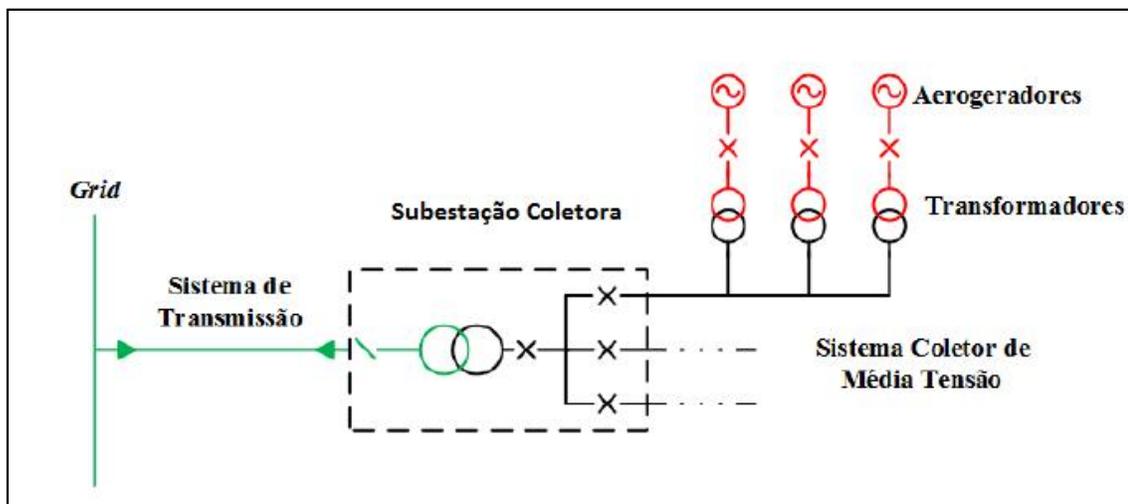


Figura 3– Modelo de sistema elétrico de um parque eólico
Fonte: Adaptado de Oliveira (2016).

O projeto da rede de média tensão, por sua vez, é realizado por meio da obtenção da planta da área, levando em consideração o arruamento, para que seja feito estudo básico desse local e posteriormente os planos e projetos, que envolvem tanto o dimensionamento elétrico, abrangendo a escolha do tipo de arranjo (radial simples, por exemplo) quanto os estudos mecânicos (ELETROBRAS, 2012).

No que diz respeito aos tipos de arranjos elétricos em parques eólicos, os dois mais comuns são o radial simples, no qual os equipamentos são interligados por meio de um único cabo alimentador, e o ramificado, no qual os equipamentos são conectados em “cascata” derivando de um alimentador principal (OLIVEIRA, 2016).

2.2.1 Redes coletoras de média tensão aéreas

As redes de média tensão aérea são compostas por condutores metálicos nus ou cobertos (no caso em que há necessidade de maior proteção da linha para prevenção de eventuais contatos que promovam o desligamento), sendo que o material dos cabos pode ser de alumínio, liga de alumínio ou alumínio com alma de aço (ZOPPETTI JÚDEZ, 1972).

A escolha do projeto do cabo está relacionada tanto aos requisitos elétricos (corrente, resistência elétrica, dimensionamento por queda de tensão), como também devido aos requisitos mecânicos (carga de ruptura, coeficiente de dilatação linear, módulo de elasticidade) (ZOPPETTI JÚDEZ, 1972).

Resumidamente, em relação aos requisitos elétricos dos materiais utilizados, o alumínio, em especial o alumínio 1350 que vem sendo empregado em linhas de distribuição e transmissão, cujas características podem ser vistas na Tabela 3, possui boa condutividade, porém em relação aos requisitos mecânicos é um material com resistência à tração relativamente baixa, o que significa que o cabo será mais tracionado quando for instalado para que a flecha seja atendida, e também que terá uma área maior para ter uma carga de ruptura maior. Além disso, o coeficiente de dilatação linear é baixo, o que afeta diretamente a flecha do cabo, uma vez que o *creep* do cabo será maior (ZOPPETTI JÚDEZ, 1972).

Por isso, foram desenvolvidas novas ligas do alumínio, que tivessem maior resistência à ruptura, como a liga de alumínio 6201, cujas características podem ser vistas nas Tabelas 4 e 5. Esse tipo de material possui características elétricas bastante semelhantes ao alumínio 1350, porém com uma resistência à ruptura maior, de maneira que os fios de aço, que podem ser utilizados em cabos de alumínio para aumentar a carga de ruptura, não sejam necessários (NEXANS, 2013).

Outra alternativa para que o cabo tenha uma boa carga de ruptura e também boas características mecânicas, é a adição de fios de aço na alma e fios de alumínio na coroa externa – projeto de cabo utilizado em caso de topologias com longos vãos. Um ponto a ser observado nesse caso são as corrosões – cabos de liga de alumínio 6201 apresentam bons resultados frente a esse fator químico (NEXANS, 2013).

Os detalhes das características do aço podem ser vistos na Tabela 6.

Dessa forma, os cabos mais utilizados são os Cabos de Alumínio EC1350 (CA), cujos desenhos de formações típicas estão mostrados na Figura 4, e Cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA) cujos desenhos de formações típicas estão mostrados na Figura 5, e ainda os Condutores de Alumínio Liga (CAL), cujos desenhos de formações típicas estão mostrados na Figura 6 (ZOPPETTI JÚDEZ, 1972).

Tabela 3 - Características do Alumínio 1350

Liga	1350-O	1350-H12 e -H22	1350-H14 e -H24	1350-H16 e -H26
Diâmetro (mm)		9,52 ~ 12,70		
Resistência à tração (MPa)	59 ~ 97	83 ~ 117	103 ~ 138	117 ~ 152
Condutividade elétrica a 20°C (%IACS)	61,8	61,5	61,4	61,3
Resistividade ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	0,027899	0,028035	0,02808	0,028126
Densidade a 20°C (kg/m^3)		2705		
Calor específico ($\text{J}/\text{g}^\circ\text{C}$)		0,895		
Módulo de elasticidade (GPa)		68,95		
Coefficiente de dilatação linear ($^\circ\text{C}^{-1}$)		0,000023		

Fonte: Adaptado de ASTM B233 (2012).

Tabela 4– Características mecânicas da Liga de Alumínio 6201

Diâmetro (mm)	1,50 a 3,25	3,25 a 4,75
Resistência à tração (MPa)	315	305
Densidade a 20°C (kg/m^3)	2690	
Calor específico ($\text{J}/\text{g}^\circ\text{C}$)	0,9205	
Módulo de elasticidade (GPa)	68,95	
Coefficiente de dilatação linear ($^\circ\text{C}^{-1}$)	0,000023	

Fonte: Adaptado de ASTM B398 (2015).

Tabela 5 - Características elétricas da Liga de alumínio 6201

Condutividade elétrica a 20°C (%IACS)	61,0	53,5	52,5
Resistividade ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	0,028265	0,032227	0,032841

Fonte: Adaptado de ASTM B398 (2015).

Tabela 6 - Características elétricas do Aço Galvanizado EHS Classe B

Diâmetro (mm)	1,24 - 2,28	2,28 - 3,05	3,05 - 3,56	3,56 - 5,50
Limite mínimo de resistência a tração (MPa)	1380	1340	1340	1280
Resistividade típica ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	0,019157			
Densidade a 20°C (kg/m^3)	7780			
Módulo de elasticidade (GPa)	181,42			
Coefficiente de dilatação linear ($^\circ\text{C}^{-1}$)	0,0000116			

Fonte: Adaptado de ASTM B498 (2008).

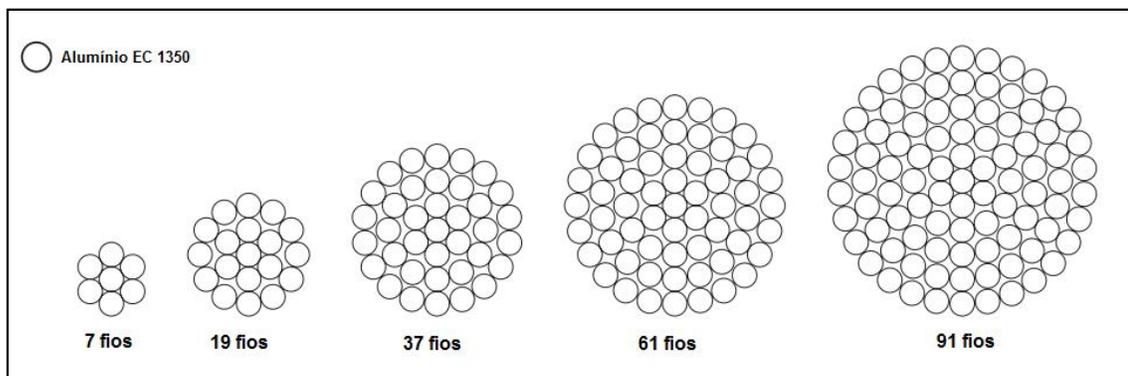


Figura 4 - Formação típica de Cabos de Alumínio EC1350
Fonte: Adaptado de Alubar (2015).

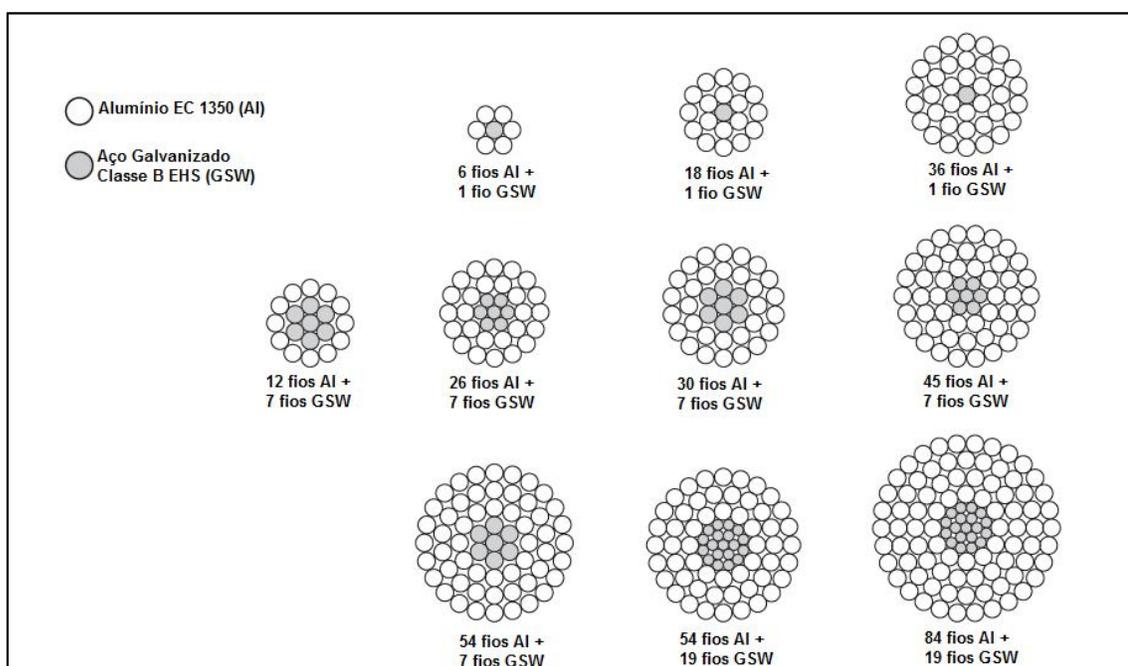


Figura 5 - Formação típica de Cabos de Alumínio com Alma de Aço
Fonte: Adaptado de Alubar (2015).

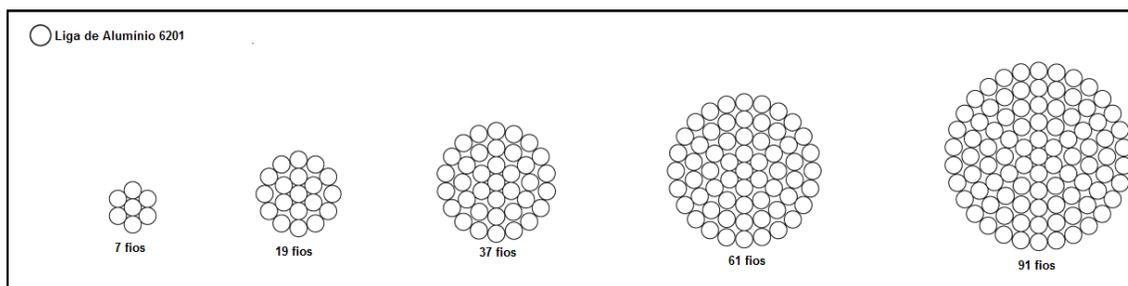


Figura 6 - Formação típica de Condutores de Alumínio Liga
Fonte: Adaptado de Alubar (2015).

Em relação aos principais tipos construtivos e respectivas características mecânicas e elétricas, como peso, diâmetro e resistência elétrica, dos cabos CA, CAA e CAL, estão contidas nos Anexos A (Tabela 19), B (Tabela 20) e C (Tabela 21).

A primeira etapa para a implantação dos cabos nesse tipo de rede é a instalação dos piquetes no terreno, a fim de sinalizar onde serão instaladas as estruturas, as quais são geralmente postes de madeira, concreto ou metal. A construção das fundações é a próxima etapa com a posterior instalação dos postes (ZOPPETTI JÚDEZ, 1972).

Após a instalação dos postes e para que os cabos possam ser lançados, as cadeias de isoladores já devem estar instaladas nas estruturas, de forma que seja possível a colocação de roldanas (Figura 7), as quais facilitam o lançamento dos cabos. Os equipamentos que fazem parte do lançamento do cabo são o *pullere* o freio, sendo que o primeiro tem a função de puxar o cabo e o segundo o de controlar a tensão em que o cabo está sendo puxado, de forma que fique dentro do limite estabelecido pelo fabricante. Outra opção é o puxamento por “arrasto”, o qual é feito de forma manual (ZOPPETTI JÚDEZ, 1972).

A primeira fase do lançamento do cabo consiste em lançar um cabo piloto que será então emendado ao cabo condutor para que seja puxado. Por fim, após o lançamento total do cabo, passa-se para a etapa de regulação e fixação dos cabos, fazendo-se uso de equipamentos como atalha manual, também conhecida como catraca (para tracionar o cabo), que pode ser vista na Figura 8 e esticador (prender o cabo para que seja tracionado), que está na Figura 9.



Figura 7 – Roldanas
Fonte: Adaptado de Tesmec (2016a).



Figura 8 - Talha manual (catraca)
Fonte: Adaptado de Calmon (2016).



Figura 9 – Esticador
Fonte: Adaptado de Tesmec (2016b).

2.2.2 Redes coletoras de média tensão subterrâneas

As redes de média tensão subterrâneas, ao contrário das redes coletoras de média tensão aéreas, utilizam cabos elétricos isolados, os quais já tiveram como material isolante papel impregnado com óleo, gás e polímeros sintéticos, sendo estes os mais utilizados atualmente (ROCHA, 2007).

Os cabos empregados nessa tipologia de rede possuem uma alma (material condutor), blindagem do condutor, blindagem da isolação, isolação e cobertura externa (NEXANS, 2016).

A alma, por sua vez, pode ser de alumínio ou cobre, cujas principais características encontram-se na Tabela 7. O primeiro apresenta características como boa condutividade elétrica, boas características mecânicas, baixa densidade, baixo custo e problemas de corrosão quando instalado em ambientes úmidos, que acarretam na utilização de elementos de bloqueio e blindagem. O segundo, por sua vez, é caracterizado pela elevada condutividade e alto custo (ROCHA, 2007).

Sobre o formato da alma, pode ser maciço, circular de formação simples ou combinado, circular compactado ou setorial. A construção em si do cabo pode ser definida por unipolar ou multipolar, conforme Figura 10 (ABNT, 2013).

Tabela 7 - Características do cobre e do alumínio

	Cobre	Alumínio
Resistividade típica ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	17,2	28,4
Densidade a 20°C (kg/m^3)	8940	2700
Módulo de elasticidade (GPa)	110	68,95
Coefficiente de dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,0000165	0,000024

Fonte: Adaptado de Pimentel (2010).



Figura 10 – Tipos construtivos de cabos subterrâneos
Fonte: Adaptado de Nexans (2016).

Segundo a NBR 6251, para cabos com tensões de isolamento acima de 3,6/6 kV, o condutor deve ser blindado com um composto semiconductor extrudado ou uma fita têxtil semicondutora, sendo que o material empregado tem que apresentar compatibilidade com o condutor e a isolação. Esta, por sua vez, pode ser um termoplástico (polietileno (PE) e cloreto de polivinila (PVC)) para os casos de tensões de isolamento menores ou iguais a 3,6/6 kV ou termofixo (etilenopropileno (EPR), etilenopropileno de alto módulo (HEPR), polietileno reticulado (XLPE) e polietileno reticulado retardante à arborescência (TR XPLE)) para tensões de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV (ABNT, 2013).

Dentre as funções da blindagem do condutor estão o preenchimento dos interstícios entre os fios do condutor, uniformização das linhas do campo elétrico e eliminação dos gradientes de tensão em certos pontos da isolação (ROCHA, 2007).

Ainda para os casos de tensões de isolamento superior a 3,6/6 kV, o cabo deve apresentar uma blindagem de isolação, composta por uma parte semicondutora não-metálica e compatível ao material da isolação, uma vez que é aplicada diretamente sobre esta, associada a uma parte metálica, a qual pode ser de fita ou fios de cobre para o transporte da corrente induzida ou de curto-circuito (ABNT, 2013).

Além uniformizar as linhas do campo elétrico e eliminar os gradientes de tensão, a blindagem da isolação tem por objetivo confinar o campo eletrostático dentro do cabo isolado e eliminar vazios ionizáveis entre a isolação e a blindagem metálica, no caso da blindagem semicondutora (ROCHA, 2007).

A respeito da isolação, esta deve apresentar a alta resistividade necessária para isolar o condutor do meio externo, sendo atualmente os dielétricos extrudados (materiais termoplásticos ou termofixos) os mais utilizados atualmente. A Tabela 8 mostra as principais características desses materiais (ABNT, 2013).

Para os cabos unipolares bloqueados longitudinalmente, segundo a NBR 6251, as lacunas entre a blindagem semicondutora da isolação e a cobertura devem ser preenchidos com um composto compatível com os componentes do cabo e não higroscópico (ABNT, 2013).

Tabela 8 – Principais características dos materiais para isolação

Características	Termoplásticos		Termofixos	
	PVC	XLPE	EPR	
Rigidez dielétrica	Baixa	Alta	Alta	
Flexibilidade	Boa	Regular	Regular	
Temperatura máxima (°C)	Regime contínuo	70	90	90
	Emergência	100	130	130
	Curto-circuito	160	250	250
Resistência a abrasão	Boa	Excelente	Excelente	
Resistência a ionização	Excelente	Baixa	Excelente	
Resistência a golpes	Excelente	Baixa	Elevada	

Fonte: Adaptado de Rocha (2007).

Também conforme a NBR 6251, para a reunião dos cabos multipolares, certos requisitos devem ser levados em consideração tais como a tensão de

isolamento do cabo, existência ou não de blindagem semicondutora e metálica. Além disso, o preenchimento dos espaços vazios entre os cabos é feito geralmente com materiais como juta, algodão ou fibra de vidro (ROCHA, 2007).

Finalizando a parte construtiva do cabo, a cobertura externa pode ser tanto de material termoplástico quanto termofixo, sendo o mais usual o PVC (ROCHA, 2007).

O dimensionamento dos cabos, por sua vez, é feito considerando a capacidade de condução de corrente (considerando os métodos de referência), a proteção contra choques elétricos, efeitos térmicos e sobre correntes, a queda de tensão, além das temperaturas limites para os terminais de equipamentos (ABNT, 2005).

Em relação à instalação diretamente enterrada desses cabos, primeiramente são abertas e preparadas as valas, com o tamanho especificado no projeto e a, pelo menos, 0,90 m da superfície, podendo os cabos ser implantados tanto em trifólio quanto em plano horizontal. Também é feita proteção das pontas dos cabos, utilização de roletes e instalação dos espaçadores, sendo o lançamento do cabo feito por meio de guinchos para puxamento (COPEL, 2015).



Figura 11 - Guincho para puxamento
Fonte: Adaptado de Tesmec (2016c).

2.2.3 Redes coletoras de média tensão aéreas – cabo condutor fase com fibras ópticas

Como uma opção aos cabos e situações convencionais, o cabo condutor fase (nu) com fibras ópticas serve como uma alternativa e otimização para as redes coletoras de média tensão aérea, já que suprime a necessidade de instalação de um cabo óptico adicional para a transmissão dos dados (AFL, 2011).

Historicamente, o desenvolvimento desses cabos nasceu da necessidade de um cabo confiável para a implementação do conceito de *Smart Grid* nas redes de distribuição, otimizando não só a eficiência energética como também o monitoramento e operação em tempo real da rede (CHO, 2014).

Já era de conhecimento técnico a existência dos cabos dielétricos autossustentados (*ADSS – All Dielectric Self-Supporting*) e os cabos óptico para-raios (*OPGW – Optical Ground Wire*), porém ambos não possuem características construtivas que permitem a condução de corrente elétrica continuamente, devido ao fato de o primeiro ser composto por materiais isolantes e o segundo por materiais metálicos, porém com a função de transmissão de corrente em casos específicos (curto-circuito e descarga atmosférica) (BEVAN, 1995).

O projeto cabos ópticos condutores fase (*OPPC – Optical Phase Conductor*) é feito com base nas características construtivas dos cabos OPGW, ou seja, cabos metálicos com fibras ópticas, porém com as alterações necessárias para que as características elétricas e mecânicas dos cabos condutores fase convencionais sejam mantidos, utilizando materiais como alumínio 1350, liga de alumínio 6201, aço galvanizado e aço revestido de alumínio (*ACS – Aluminium Clad Steel*), cujas características estão nas Tabelas 3, 4, 6, 9 e 10 (NKT CABLES, 2010).

Com o intuito de apresentar características mecânicas semelhantes aos cabos condutores fase convencionais sem que haja perda na condutividade, os fios de ACS são utilizados na construção de cabos OPPC, já que esses fios possuem alta carga de ruptura, excelente condutividade, além de serem mais leves que os fios de aço e por serem resistentes à corrosão (AFL, 2016). Esse tipo de fio (ACS) é comumente diferenciado em função da condutividade *International Annealed Copper Standard* (IACS), a qual estabelece que o cobre puro recozido (comercial) a 20°C

possui uma resistividade de $1,7241 \times 10^{-8} \Omega/m$ ou $5,8001 \times 10^7 S/m$ representando 100% IACS e a razão dessa resistividade base ao dos demais materiais apresenta a porcentagem de IACS correspondente (ASTM, 2001).

Tabela 9 – Características do aço revestido de alumínio

	20,3% IACS	27% IACS	30% IACS	40% IACS
Resistividade típica ($\Omega \cdot mm^2/m$)	0,0848	0,06385	0,05747	0,0431
Densidade a 20°C (kg/m^3)	6590	5910	5610	4640
Coefficiente de dilatação linear ($^{\circ}C^{-1}$)	0,000126	0,0000134	0,0000138	0,0000155
Módulo de elasticidade (GPa)	162	140	132	109
Espessura mínima Al (% raio)	10	14	15	25
Área seção Al (% área)	25	37	43	62
Coefficiente de variação resistência ($^{\circ}C^{-1}$)	0,0036	0,0036	0,0038	0,004
Calor específico	0,503	0,532	0,549	0,614

Fonte: Adaptado ABNT (2011).

Tabela 10 - Características mecânicas dos fios de aço revestido de alumínio

Diâmetro nominal do fio mm (de - até)	Tensão de Ruptura (MPa)				
	20,3% IACS	27% IACS	30% IACS	40% IACS	
3,26	1340	1076	883	686	
3,27	3,48	1310	1062	869	676
3,49	3,67	1280	1034	841	676
3,68	3,93	1240	1000	814	662
3,94	4,11	1210	972	786	662
4,12	4,39	1170	945	786	634
4,4	4,62	1140	917	758	607
4,63	4,78	1100	889	731	579
4,79	5,19	1070	862	703	552
5,2	5,83	1040	830	690	490
5,84	6,54	970	770	640	470
6,55	7,35	900	720	600	450
7,36	8,25	810	650	540	432

Fonte: Adaptado ABNT (2011).

Logo, os projetos de cabos OPPC são consoantes aos cabos condutores fase convencionais, exceto pelo diâmetro, uma vez que um dos fios metálicos é substituído por um núcleo óptico, conforme os dois exemplos contidos na Tabela 11 (NKT CABLES, 2010).

Tabela 11 - Características dos cabos OPPC

Condutor equivalente	OPPC	Seção transversal (mm ²)	Diâmetro externo nominal (mm)	Quantidade máxima de fibras	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kN)	Resistência elétrica CC 20°C (ohm/km)	Capacidade de corrente/ Ampacidade (A)
Hawk	OPPC 243-AL1 / 34-A20SA	277,40	21,90	24	925,1	81,3	0,113	655
Parrot	OPPC 723-AL3 / 128-A20SA	851,20	38,20	72	2939,4	350	0,043	1255

Fonte: Adaptado NKT Cables (2010).

Assim, além dos fios metálicos encordoado, o OPPC possui no mínimo um núcleo óptico de plástico ou aço inoxidável, o qual tem a função de proteger as fibras ópticas que estão ali contidas. Esse núcleo pode estar encordoado junto aos fios (Figura 12) ou no centro do cabo (Figura 13), sendo que o primeiro modelo oferece a possibilidade de maior quantidade de fibras (NKT CABLES, 2010).

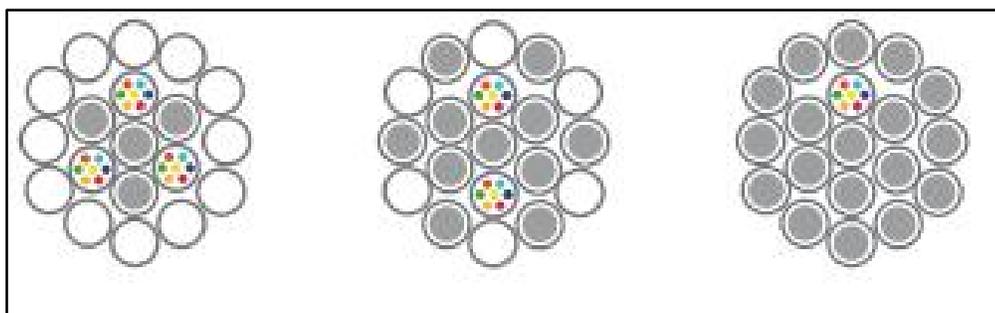


Figura 12 - OPPC com núcleo óptico encordoado
Fonte: Adaptado de NKT Cables (2010).

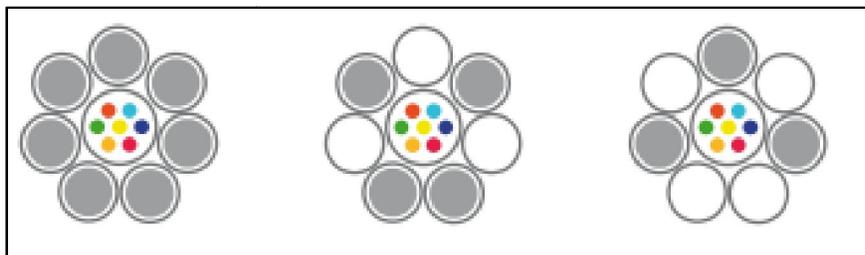


Figura 13 - OPPC com núcleo óptico central
Fonte: Adaptado de NKT Cables (2010).

Devido ao fato desse cabo conter fibras ópticas, o seu manuseio é diferente dos cabos convencionais. Por exemplo, para o carregamento/descarregamento das bobinas do caminhão devem ser utilizados veículos para o adequado levantamento, conforme indicado pela Figura 14, sem que as bobinas sejam jogadas ou empurradas. Além disso o sentido para desenrolar o cabo deve ser respeitado, conforme indicado pelo fabricante na bobina Figura 15.

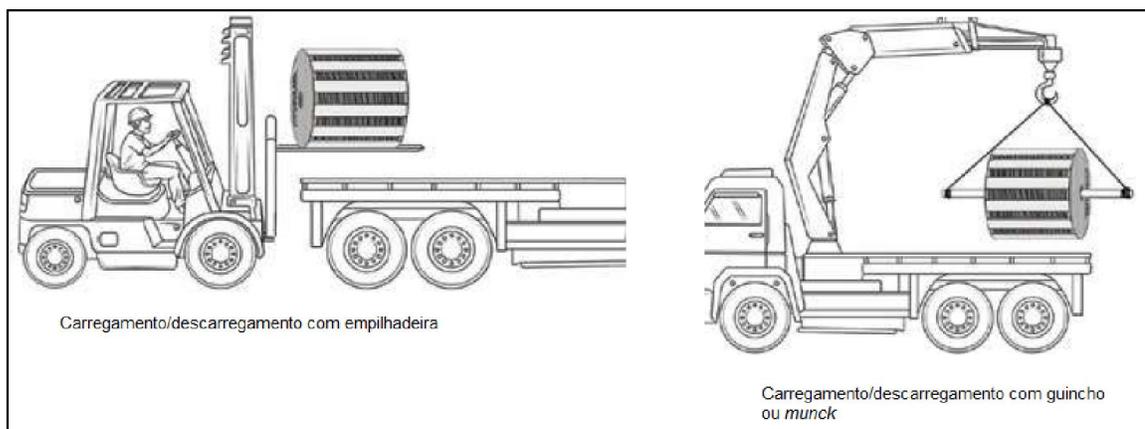


Figura 14 - Transporte de bobinas
Fonte: Adaptado de Furukawa (2016a).

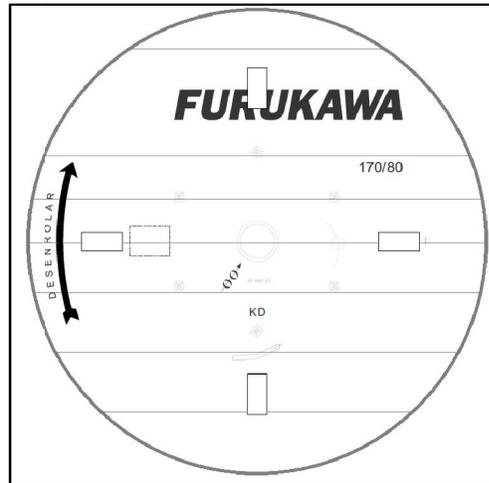


Figura 15 - Sentido de desenrolamento da bobina
Fonte: Furukawa (2016b).

Quanto aos equipamentos utilizados para o lançamento do OPPC, as roldanas deverão possuir um diâmetro mínimo, o qual varia conforme a tração que o cabo será puxado: se for menor ou igual a 50 N/mm^2 o diâmetro da roldana deverá ser de no mínimo 25 vezes o diâmetro do cabo e caso seja acima de 50 N/mm^2 , será de 30 vezes o diâmetro do cabo. Ademais, o ângulo entre o cabo e eixo horizontal deve ser menor que 18° , conforme Figura 16. Caso o lançamento seja em estruturas em ângulo acima de 60° um dispositivo como mostrado na Figura 17 pode ser utilizado ou o diâmetro da roldana ser superior a 60 vezes o diâmetro do cabo (LUMPI-BERNDORF, 2011).

Já o diâmetro do tambor do freio deve ser de, pelo menos 40 vezes o diâmetro do cabo e este deve sair daquele conforme a Figura 18. A tração de puxamento também não deve ser superior a 15% da carga de ruptura do cabo (LUMPI-BERNDORF, 2011).

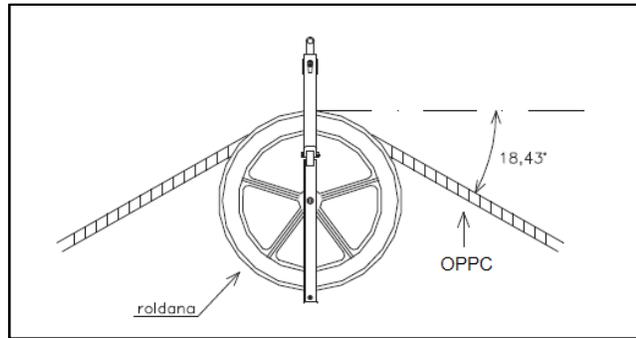


Figura 16 - Ângulo de lançamento do cabo OPPC
 Fonte: Adaptado de Lumpi-Berndorf (2011).



Figura 17 - Dispositivo para lançamento em estruturas em ângulo superior a 60°
 Fonte: Adaptado de Furukawa (2014).

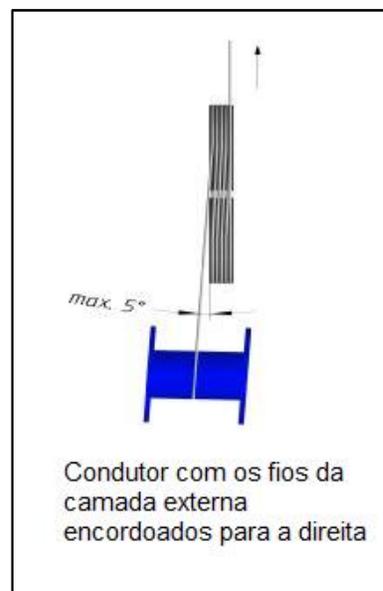


Figura 18 - Saída do cabo do tambor do freio
 Fonte: Adaptado de Lumpi-Berndorf, 2011.

Em relação à instalação, a metodologia segue o mesmo princípio que os cabos condutores convencionais, podendo ser feita tanto manualmente quanto utilizando equipamentos (*pullere* freio) com as adaptações supracitadas (LUMPI-BERNDORF, 2011).

Por fim, nos locais com derivação das fibras ou mesmo emenda do cabo, um conjunto de ancoragem foi especialmente desenvolvido, de modo que as fibras possam ser manuseadas no potencial zero, além de permitir que a continuidade elétrica seja mantida. Esse conjunto é composto por um isolador de ancoragem (tipo bastão), o qual é fixado à estrutura; uma manilha sapatilha, na qual será instalada a alça pré-formada que segura o OPPC; um isolador e conector com vedação para as fibras ópticas, o qual garante que as fibras estão no potencial zero e que não haverá penetração de umidade e sujeira; um *jumper*, o qual assegura a continuidade elétrica, o isolador pilar e laço de topo para o *jumper*, os quais também são utilizados nos casos em que não há derivação/emenda; o conector cunha adaptado para fazer a conexão mecânica e elétrica entre o *jumper*, além do próprio cabo OPPC. O esquema desse conjunto pode ser visto na Figura19 (BEVAN, 1995).

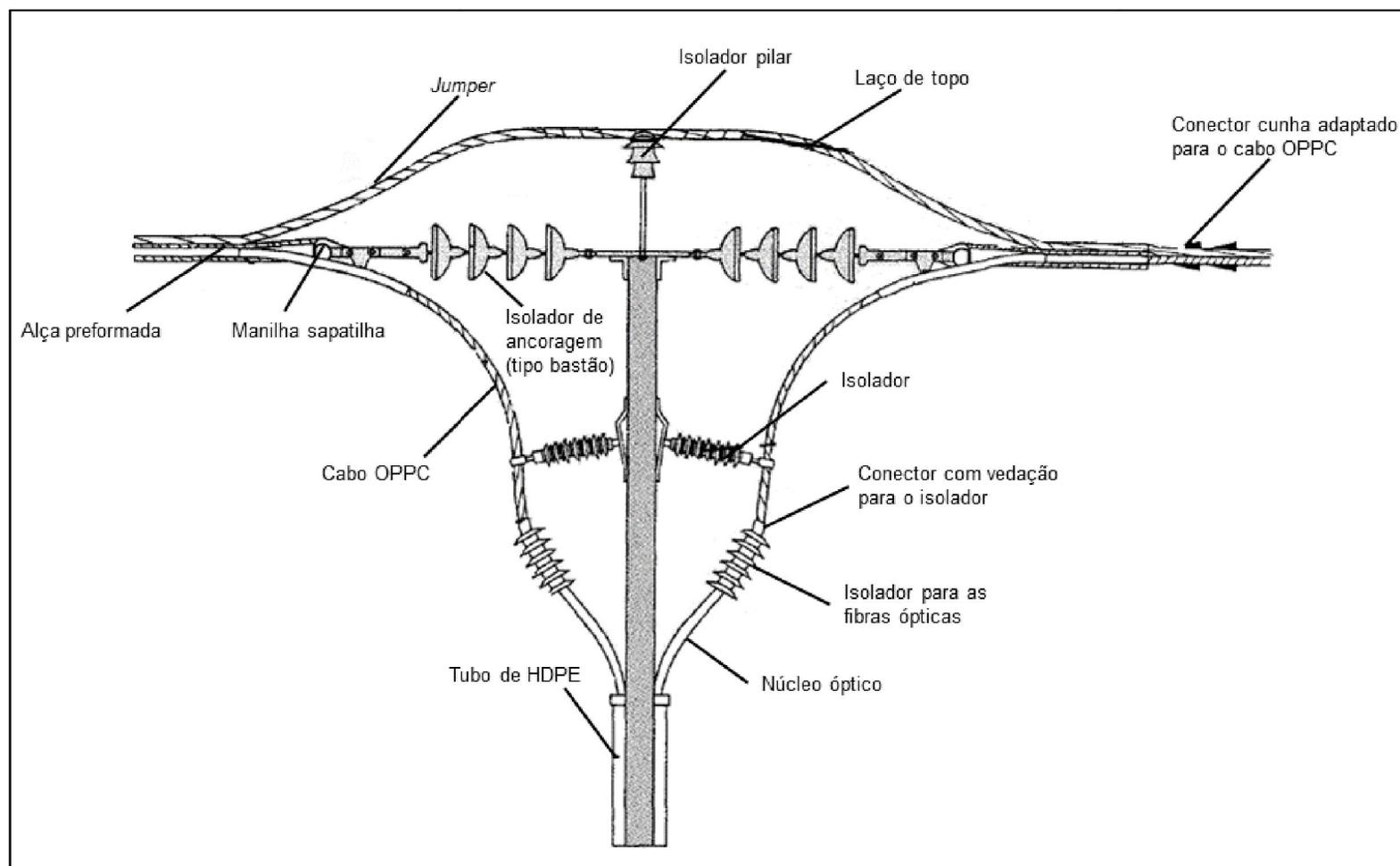


Figura 19 - Esquemático da estrutura com derivação óptica
Fonte: Adaptado de Bevan (1995).

3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE REDES COLETORAS

Neste capítulo são abordados os custos para a implantação da rede coletora de média tensão aérea, subterrânea e aérea com fibras ópticas, considerando materiais e instalação.

Para isso, foi usado como base uma rede coletora de média tensão hipotética de aproximadamente 12,9 km e 28MVA. Para o caso da rede aérea convencional, essa rede é composta por aproximadamente 2,4 km do cabo CAA 1/0 AWG (*Raven*) e 10,5 km do cabo CAA 336,4 MCM (*Linnet*). Para rede subterrânea, os cabos de 70mm² (1,16 km), 150 mm² (1,42 km) e 400 mm² (10,32 km). Para o caso da rede aérea com fibras ópticas, foram utilizados cabos equivalentes. As características desses cabos estão na Tabela12 e um croqui da rede é mostrado no Anexo D (Figura 26).

Como o cabo OPPC possui fibras ópticas para a transmissão dos dados do parque/aerogeradores, foi considerada a aquisição e instalação para a rede aérea convencional um cabo ADSS com 24 fibras ópticas (FO) e para o caso da rede subterrânea um cabo óptico diretamente enterrado também com 24FO.

Tabela 12 - Características dos cabos a serem comparados

(continua)

Condutor	OPPC	Quantidade e de fibras	Quantidade e (m)	Peso nominal (kg/km)	Diâmetro (mm)	Resistência elétrica - CC 20°C (ohm/km)	Carga de ruptura (kgf)
1/0 AWG (<i>Raven</i>)		-	2.400	216	10,11	0,534	1.923
336,4 MCM (<i>Linnet</i>)		-	10.500	689	18,29	0,170	6.206
Equivalente ao 1/0 AWG	CABO OPDC-F SC CMN.062.107	24	2.400	221	10,74	0,534	2.006
Equivalente ao 336,4 MCM	CABO OPDC-F SC XLS.198.189	24	10.500	713	18,90	0,154	7.449
70 mm ²		-	1.160	1.195	30,00	0,443	
150 mm ²		-	1.420	1.800	34,00	0,206	
400 mm ²		-	10.320	2.702	43,50	0,078	

Tabela 12 - Características dos cabos a serem comparados

(conclusão)

Condutor	OPPC	Quantidade de fibras	Quantidade (m)	Peso nominal (kg/km)	Diâmetro (mm)	Resistência elétrica - CC 20°C (ohm/km)	Carga de ruptura (kgf)
Cabo óptico autossustentado		24	12.900	118	12,20	-	Carga máxima de Operação: 2x peso do cabo/km
Cabo óptico diretamente enterrado		24	12.900	218	13,60	-	Carga Máxima de Instalação: 2x peso do cabo/km

Fontes: Adaptado de Nexans (2013), Nexans (2016), Furukawa (2016e), Furukawa (2016f).

Outra consideração feita nesse estudo foi o vão médio de 105 m entre estruturas, resultando em 123 postes. Além disso, foram consideradas três estruturas básicas, que são B1 (Figura 20), B4 (Figura 21) e B3 (Figura 22).

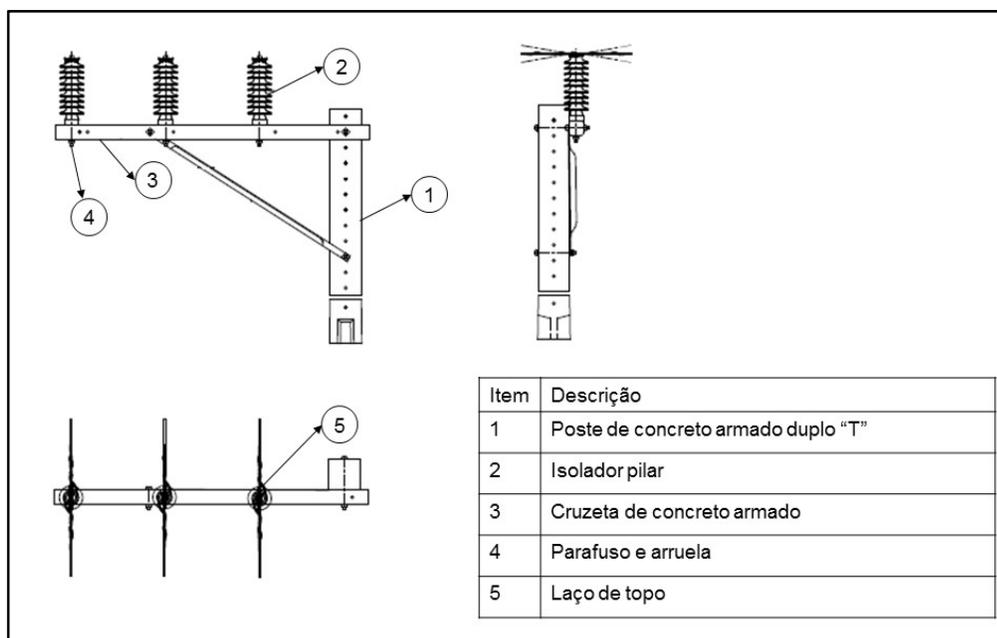


Figura 20 - Estrutura B1

Fonte: Adaptado de Copel (2011).

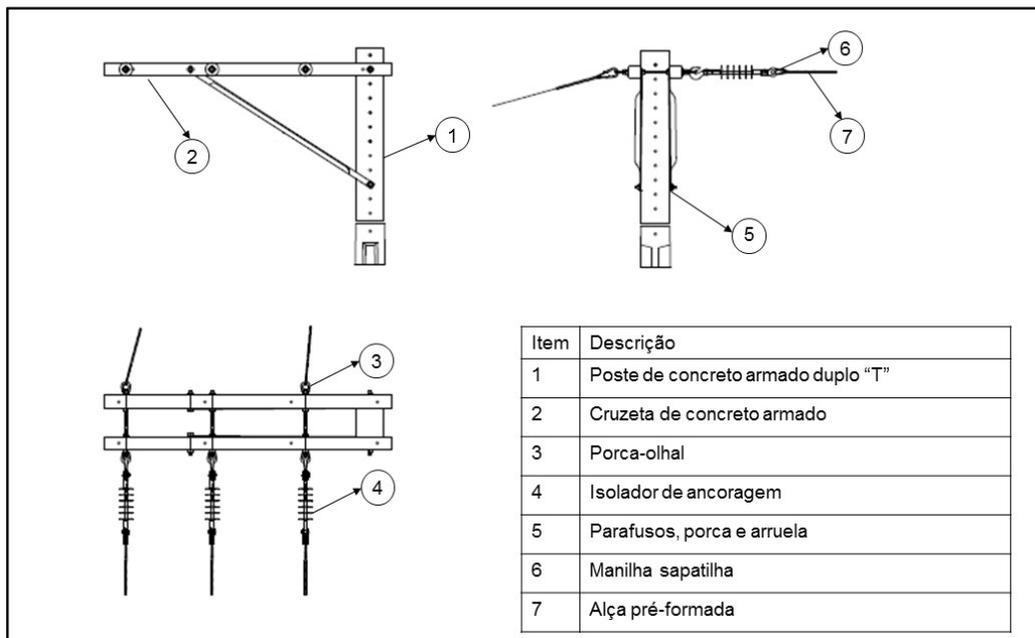


Figura 21 - Estrutura B4
 Fonte: Adaptado de Copel (2016a).

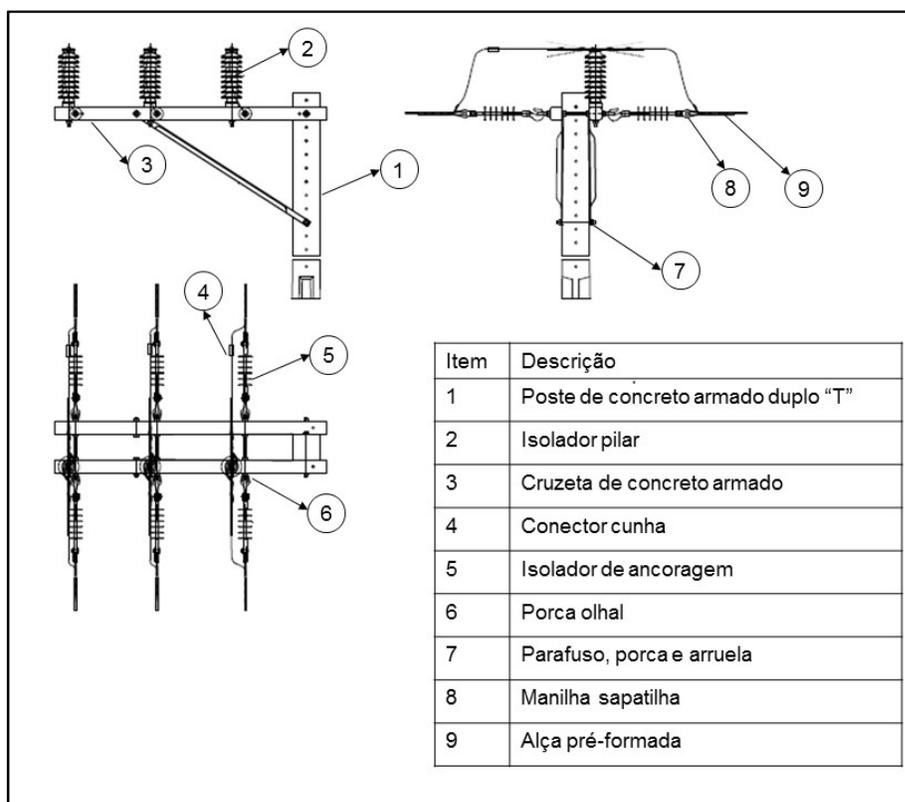


Figura 22 - Estrutura B3
 Fonte: Adaptado de Copel (2016b).

3.1 Levantamento de custos para implantação

Primeiramente, a Tabela 13 mostra os custos dos cabos condutores e ópticos da rede aérea convencional e a Tabela 14 para os cabos condutores e ópticos da rede subterrânea. Já na Tabela 15 constam os custos dos cabos condutores OPPC equivalentes aos convencionais propostos. Os valores de custo que estão nas tabelas estão sem Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Programa Integração Social (PIS) e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS).

Para efeitos dessa análise, no quantitativo de cabos não está considerado o comprimento extra devido à catenária do cabo (no caso dos cabos aéreos e ópticos). Além disso foi utilizado somente a cotação de um fornecedor (Fornecedor 1) para o levantamento dos custos.

No custo dos materiais, as estruturas englobaram os postes; os acessórios incluíram isoladores, alça pré-formada, conectores, laços de topo, manilhas, parafusos, kit de emenda, dentre outros; nas ferragens constaram parafusos, porcas e arruelas; à escavação foram adicionados os custos de materiais como areia e concreto; o estai incluiu a cordoalha, alça pré-formada, sapatilhas, arruelas e parafusos. O conjunto de suporte completo dielétrico considerado está mostrado na Figura 23, e o conjunto de ancoragem completo pode ser visto na Figura 24. O cabo de cobre foi considerado para o aterramento no caso da rede subterrânea, e a caixa de emendas levada em consideração nesse estudo está mostrada na Figura 25 – para efeitos de custo foi considerado já com suportes.

Ademais, para os custos dos materiais foi utilizada como base a cotação de dois fornecedores, como mostrado na Tabela 16.

Quanto à rede subterrânea, além das cotações, foi utilizado como premissa o trabalho desenvolvido por Nakaguishi e Hermes (2011), no qual a estimativa de custo elétrico foi de aproximadamente R\$ 4.200.000,00 e custo de infraestrutura de R\$ 2.100.000,00 para uma rede radial de 48 MVA. Além disso, foi considerado que esse tipo de rede pode ser até 10 vezes mais caro que uma rede aérea (NAGAKAGUISHI; HERMES, 2011).

Tabela 13 - Custo dos cabos da rede aérea convencional

Condutor	Quantidade de fibras	Quantidade (m)	Peso nominal (kg/km)	Custo (R\$ kg)	Custo (R\$ metro)	Custo total (R\$)
1/0 AWG (Raven)		2.400	216,3	21,00		32.704,56
336,4 MCM (Linnet)		10.500	689,2	12,45		270.200,17
Cabo óptico autossustentado	24	12.900	113		5,25	67.725,00
					TOTAL	370.629,73

Fonte: Fornecedor 1 (2016)

Tabela 14 - Custo dos cabos da rede subterrânea

Condutor	Quantidade de fibras	Quantidade (m)	Peso nominal (kg/km)	Custo (R\$ metro)	Custo total (R\$)	
70 mm ²		2.400	1195	21,66	155.952,00	
150 mm ²		1.420	1.800	24,00	102.240,00	
400 mm ²		10.320	2.702	38,50	1.191.960,00	
Cabo óptico diretamente enterrado	24	12.900	113	8,60	110.940,00	
					TOTAL	1.561.092,00

Fonte: Fornecedor 1 (2016).

Tabela 15 - Custo dos cabos da rede aérea com fibra óptica

Condutor	OPPC	Quantidade de fibras	Quantidade (m)	Peso nominal (kg/km)	Custo (R\$ kg)	Custo (R\$ metro)	Custo total (R\$)	
1/0 AWG (Raven)		-	2.400	216,3	21,00		21.803,04	
336,4 MCM (Linnet)		-	10.500	689,2	12,45		180.133,45	
Equivalente ao 1/0 AWG	CABO OPDC-F SC CMN.062.107	24	2.400	221,0		9,80	23.520,00	
Equivalente ao 336,4 MCM	CABO OPDC-F SC XLS.198.189	24	10.500	713,0		18,93	198.765,00	
							TOTAL	424.221,49

Fonte: Fornecedor 1 (2016).

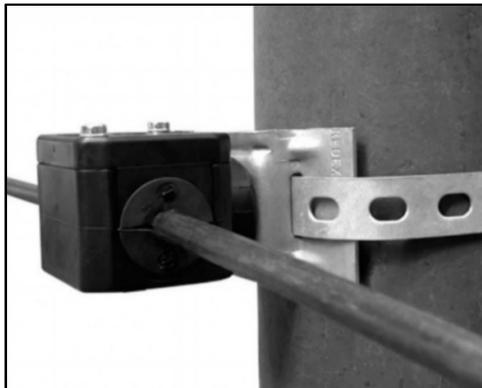


Figura 23–Conjunto de suporte completo para dielétrico
 Fonte: Adaptado de PLP (2016).



Figura 24 - Conjunto de ancoragem cabo dielétrico
 Fonte: Adaptado de PLP(2016).



Figura 25 - Caixa de emendas para cabo óptico
 Fonte: Adaptado de Furukawa (2016c).

Para a instalação das redes aéreas, foi considerado o método de “arrasto”, ou seja, manual, sem a necessidade de locação de equipamentos (freio e *puller*). Para a rede subterrânea, também não foi considerada a locação desses equipamentos.

Em relação ao custo, além do lançamento dos cabos condutores, nas redes convencionais (aérea e subterrânea), foi levantado o valor adicional da instalação

dos cabos ópticos, conforme demonstrado na Tabela 17 – os valores de instalação também foram baseados em estimativas informadas por dois fornecedores.

Como no caso da rede OPPC o método de instalação é o mesmo utilizado pela rede convencional, o custo para o lançamento do cabo condutor fase com fibras ópticas foi considerado o mesmo do cabo tradicional.

Por fim, o custo, por km, considerando materiais e instalação mostrado na Tabela 18, permite concluir que, a troca de cabo condutor convencional por um com fibras ópticas não onerará o orçamento de uma rede de média tensão, representando, no total, um aumento de cerca de 4% em relação à rede aérea convencional considerando o Fornecedor 2 e, aproximadamente, 2% para o caso do Fornecedor 1.

Tabela 16 - Custos dos materiais para infraestrutura e instalação

Descrição	Custo Total (R\$)					
	Rede Convencional		Rede com OPPC		Rede subterrânea	
	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 1	Fornecedor 2
Estruturas de concreto	452.320,00	477.662,24	452.320,00	477.662,24	-	-
Banco de dutos	-	-	-	-	500.000,00	527.000,00
Acessórios	358.880,00	353.685,00	413.440,00	407.285,00	1.800.000,00	1.857.600,00
Acessórios para o OPPC	-	-	-	-	-	-
Ferragens	12.109,00	12.145,33	12.109,00	12.145,33	-	-
Escavação	-	-	-	-	650.000,00	679.250,00
Estai	12.109,00	14.202,50	13.357,50	14.202,50	-	-
Conjunto suporte completo dielétrico	4.251,00	4.251,00	-	-	-	-
Conjunto ancoragem completo dielétrico	1.008,00	1.008,00	-	-	-	-
Cabo de cobre #70 mm ²	-	-	-	-	700.000,00	715.400,00
Caixa de emendas com suporte	4.900,00	4.900,00	4.900,00	4.900,00	4.900,00	4.900,00
TOTAL	845.577,00	867.854,07	896.126,50	916.195,07	3.654.900,00	3.784.150,00

Fonte: Fornecedor 1; Fornecedor 2 (2016).

Tabela 17 – Custos de instalação

Descrição	Custo de instalação (R\$)					
	Rede Convencional		Rede com OPPC		Rede subterrânea	
	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 1	Fornecedor 2	Fornecedor 1	Fornecedor 2
Instalação dos cabos condutores	275.000,00	348.000,00	275.000,00	348.000,00	2.200.000,00	2.714.400,00
Instalação dos cabos ópticos	126.000,00	168.000,00	-	-	106.400,00	112.000,00
TOTAL	401.000,00	516.000,00	275.000,00	348.000,00	2.306.400,00	2.826.400,00

Fonte: Fornecedor 1; Fornecedor 2 (2016).

Tabela 18 – Custos de cada rede por km

Topologia de rede	Custo total por km (R\$)	
	Fornecedor 1	Fornecedor 2
Rede aérea convencional	125.364,86	136.006,50
Rede aérea com OPPC	123.670,39	130.885,00
Rede subterrânea	583.131,16	633.460,62

Fonte: Fornecedor 1; Fornecedor 2 (2016).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como essa proposta teve o foco na energia eólica, inicialmente foi feita uma breve introdução sobre o histórico dessa fonte de energia no Brasil, que mostra a maior representatividade desta fonte na matriz elétrica brasileira, fazendo com que o mercado atrelado às eólicas se torne mais competitivo.

Dentro desse contexto, o principal ponto abordado por esse estudo foi a rede coletora de média tensão aérea, propondo a utilização de um cabo condutor com fibras ópticas (OPPC), sendo essa proposta está baseada principalmente no artigo publicado no IEEE de Bevan (1995).

Como citado no início do Capítulo 3, os levantamentos feitos nesse estudo foram baseados em uma rede coletora de média tensão hipotética de 12,9 km, portanto seria de grande valia se um caso real pudesse ser abordado.

Um dos aspectos tratados nesta pesquisa é que o projeto dos cabos OPPC é similar ao de um cabo condutor convencional, justamente para não onerar a estrutura e, tampouco, as características elétricas. Nesse estudo, essas características puderam ser observadas, conforme mostrado na Tabela 12, destacando-se o fato de que o peso e o diâmetro dos cabos OPPC ficaram cerca de 4% superior ao cabo convencional, além da resistência elétrica em CC a 20°C ter ficado inalterada ou até menor (no caso do equivalente ao 336,4 MCM, ficou 10% menor).

Com base nos dados do cabo e no tamanho da rede, os custos dos materiais e de instalação puderam ser levantados, a partir de valores fornecidos por duas empreiteiras (Fornecedor 1 e Fornecedor 2).

Assim, um dos pontos que pôde ser inferido no Capítulo 3 foi a comparação de custos somente dos cabos. Comparando as redes aéreas, o custo com cabos OPPC é 13% superior ao custo com cabos convencionais. Considerando somente os materiais relativos à rede (estruturas, acessórios, ferragens, materiais para o cabo dielétrico e caixas de emenda), o acréscimo é de aproximadamente 6% (para ambos fornecedores).

Quanto à instalação, o que se percebeu foi que, devido ao fato do cabo OPPC já possuir fibras ópticas, o que resulta em não ter gastos adicionais com a instalação do cabo óptico, e o método para o lançamento do OPPC ser igual ao do cabo condutor convencional, o valor para implantação da rede aérea convencional ficou cerca de 32% superior ao da rede com OPPC (também para ambos fornecedores).

Quando todos esses custos foram somados e demonstrados em um valor por quilômetro de rede, observou-se que a rede com OPPC ficou cerca de 4% mais cara que a rede aérea convencional considerando o Fornecedor 2 e, aproximadamente, 2% para o caso do Fornecedor 1. Já comparada à rede subterrânea, a rede com OPPC é praticamente 5 vezes mais barata (não levando em conta critérios como o terreno onde a rede será instalada, que podem fazer com que a rede subterrânea seja inviável).

Dessa forma, infere-se que o valor adicional que o cabo OPPC possui em relação ao cabo condutor convencional mais o cabo dielétrico se torna pouco expressivo quando analisado os custos totais que uma rede de média tensão possui. Além disso, nesse trabalho não foram abordadas as questões relacionadas às despesas de investimento (CAPEX – *capital expenditure*) versus o capital para manter ou melhorar os bens físicos (OPEX – *operational expenditure*), que podem também demonstrar a viabilidade econômica dessa tecnologia – essa análise é passível de trabalhos futuros.

Assim, a partir desse estudo inicial sobre a rede coletora de média tensão com cabos OPPC, conclui-se que é uma alternativa totalmente viável e válida de estudos mais detalhados, entre eles: viabilidade técnica do cabo OPPC, impacto nas estruturas já utilizadas no mercado (estudo mecânico) e manutenção do cabo OPPC.

REFERÊNCIAS

AFL. **Catálogo técnico: Optical Phase Conductor**. Estados Unidos da América. 2011. Disponível em: <[https://www.aflglobal.com/productlist/Product-Lines/Fiber-Optic-Cable/Optical-Phase-Conductor-\(OPPC\)/doc/Optical-Phase-Conductor.aspx](https://www.aflglobal.com/productlist/Product-Lines/Fiber-Optic-Cable/Optical-Phase-Conductor-(OPPC)/doc/Optical-Phase-Conductor.aspx)>. Acesso em 5 out. 2016.

AFL. **Aluminium clad steel**. Estados Unidos da América. 2016. Disponível em: <<https://www.aflglobal.com/Products/Aluminum-Clad-Steel.aspx>>. Acesso em 6 out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **O Estado das energias renováveis no Brasil**. Brasília, 1998. Série Estudos e informação hidrológicas e Energéticas.

ALUBAR. **Catálogo técnico: condutores elétricos de alumínio**. Barbacena, SP. 2015. Disponível em: <http://www.alubar.net.br/downloads/produtos/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B233**: Standard Specification for Aluminum 1350 Drawing Stock for Electrical Purposes. West Conshohocken, Estados Unidos da América, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B398**: Standard Specification for Aluminum-Alloy 6201-T81 and 6201-T83 Wire for Electrical Purposes. West Conshohocken, Estados Unidos da América, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B498**: Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Use in Overhead Electrical Conductors. West Conshohocken, Estados Unidos da América, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Specialty Handbook: Copper and Copper alloys**. West Conshohocken, Estados Unidos da América, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Ausência de envio de dados eólicos resultará em dedução de 1% da receita mensal**. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/2181-aus%C3%Aancia-de-envio-de-dados-e%C3%B3licos-resultar%C3%A1-em-dedu%C3%A7%C3%A3o-de-1-da-receita-mensal.html>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6251**: Fios de aço revestido de alumínio, nus, para fins elétricos — Especificação. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10711**: Cabos de potência com isolamento extrudado para tensões de 1 kV a 35 kV — Requisitos construtivos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2005.

BEVAN, John. Design, development and installation of an optical phase conductor on 33kV wood pole line. **Power Engineering Journal**. Grã-Bretanha, v. 9, p. 277-281, 1995.

BRACIANI, Urian. **Estrutura de custos para implantação das usinas de geração de energia elétrica no Brasil**. 2011. 82f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Centro Sócio Econômico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

BRASIL. Resolução nº 24, de 5 de julho de 2001. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, 2001.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 26 abr. 2002.

CALMON. **Talha catraca 3000kg ELE c/ 3.000 mts**. Disponível em: <<http://www.calmon.com.br/detalhes.asp?item=486&cat=Elevacao&nome=TALHA%22CATRACA%203000Kg%20%20ELE%20C/3.00MTS>>. Acesso em: 10 out. 2016.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Comercialização**. 2016. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/comercializacao?_adf.ctrl-state=4n4dkkea6_4&_afrLoop=855850528323075> Acesso em: 30 jun. 2016.

CHO, Jintae *et al*. Development and improvement of an intelligent cable monitoring system for underground distribution network using distributed temperature sensing. **Energies**. Basel, Suíça, v. 7, p. 1076 – 1094, fev. 2014.

COELHO, Bruno M. M. **Classificação de tipologia de rede da EDP Distribuição**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Manual de instruções técnicas: atividades de construção e projeto de redes de distribuição subterrâneas**. 2015. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/5B55AA492B4F0F11032577F30300404D/\\$FILE/MIT%20163808_Atividades%20em%20Redes%20Subterraneas_MaM%C3%A7o_2015.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/5B55AA492B4F0F11032577F30300404D/$FILE/MIT%20163808_Atividades%20em%20Redes%20Subterraneas_MaM%C3%A7o_2015.pdf)>. Acesso em: 04 out. 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Montagem de redes de distribuição aérea: Estrutura B1**. 2011. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/47FBF568CA6CF9E3032578BC00510C2B/\\$FILE/RDA%20856120%20Primario%20B1%20junho2011.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/47FBF568CA6CF9E3032578BC00510C2B/$FILE/RDA%20856120%20Primario%20B1%20junho2011.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Montagem de redes de distribuição aérea: Estrutura B4**. 2016a. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/52E3CB792DE1218203257F3E0060B8C2/\\$FILE/RDA%20856126%20Primario%20B4%20janeiro2016.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/52E3CB792DE1218203257F3E0060B8C2/$FILE/RDA%20856126%20Primario%20B4%20janeiro2016.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Montagem de redes de distribuição aérea: Estrutura B3**. 2016b. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/BA540159DDF66DD003257F3E0060A2C5/\\$FILE/RDA%20856122%20Primario%20B3%20janeiro2016.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/BA540159DDF66DD003257F3E0060A2C5/$FILE/RDA%20856122%20Primario%20B3%20janeiro2016.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2016.

COSTA, Ricardo C.; PIEROBON, Ernesto C. Leilão de energia nova: análise da sistemática e dos resultados. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 39-58, mar. 2008.

ELETROBRAS. **Proinfa**. 2010. Disponível em <<http://www.eletrobras.com/elb/Proinfa/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

ELETROBRAS. **Manual de procedimentos de redes de distribuição**. 2012. Disponível em: <<http://www.eletrobrasalagoas.com/arquivos/normasepadroes/PROJETOS%20DE%20REDES%20DE%20DISTRIBUIC%C3%83O%20A%C3%89REAS%20URBANAS.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2016**. Rio de Janeiro, 2016a. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **2º Leilão de Energia de Reserva de 2015 - Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral.** Nota técnica. Rio de Janeiro, 2016b. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Reserva%20\(2015\)/NT_EPE-DEE-NT-023_2016-r0_completo.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Reserva%20(2015)/NT_EPE-DEE-NT-023_2016-r0_completo.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **EPE cadastra 1.260 projetos de energias eólica e solar para 2º LER .** Nota técnica. Rio de Janeiro, 2016c. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/2%C2%BA%20Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202016/EPEcadastra1260projetosdeenergiase%C3%B3licaesolarpara2%C2%BALER.aspx>>. Acesso em: 01 ago. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2024.** Brasília, 2015a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdp>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Leilão FA 2015 negocia energia de 11 usinas com deságio de 1,96%.** Rio de Janeiro, 2015b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Fontes%20Alternativas%202015/Leil%C3%A3oFA2015negociaenergiade11usinascomdes%C3%A1giode1,96.aspx>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

FERREIRA, Henrique T. **Energia eólica: barreiras a sua participação no setor elétrico brasileiro.** 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FURUKAWA. **Folheto de transporte de bobinas.** Disponível em: <<http://www.furukawa.com.br/br/>>. Acesso em: 11 out. 2016a.

FURUKAWA. **Especificação dos carretéis de madeira para OPGW.** Disponível em: <<http://www.furukawa.com.br/br/>>. Acesso em: 11 out. 2016b.

FURUKAWA. **Conjunto de emenda óptica FK-CEO-4M.** Disponível em: <<http://www.furukawa.com.br/ao/produtos/caixa-de-emenda/conjunto-de-emenda-optico-847.html>>. Acesso em: 15 out. 2016c.

FURUKAWA. **E-commerce.** Disponível em: <<http://www.efurukawa.com/>> Acesso em: 15 out. 2016d.

FURUKAWA. **Cabo Óptico Dielétrico Autossustentado - Núcleo Geleado (CFOA-AS-G)**. Disponível em: <<http://www.furukawa.com.br/pt/produtos/cabo-optico/cabo-optico-dieletrico-autossustentado-nucleo-geleado-cfoa-as-g-343.html>>. Acesso em: 15 out. 2016e.

FURUKAWA. **Cabo Óptico Dielétrico Para Dutos com Proteção Contra Roedores - PFV (CFOA-DDR)**. Disponível em: <[http://m.furukawa.com.br/pt/produtos/cabo-optico/cabo-optico-dieletrico-para-dutos-com-protecao-contr-roedores---pfv-\(cfoa-ddr\)-293.html](http://m.furukawa.com.br/pt/produtos/cabo-optico/cabo-optico-dieletrico-para-dutos-com-protecao-contr-roedores---pfv-(cfoa-ddr)-293.html)>. Acesso em: 15 out. 2016f.

FURUKAWA. **Manual de instalação de cabos OPGW**. 2014. Disponível em: <<ftp://ftp2.cemig.com.br/licitaserv/530-H08657-ANEXOS%20E1/CD%20MS-CS/Documenta%E7%E3o/Projetos%20Lote%2001%20-%20LD%20Almenara%20-%20Jequitinhonha/31171-PELS-5037.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2016.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo, São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GRAY, David E. **Pesquisa no mundo real**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed Editora SA, 2012.

LIMA, Moisés G. de. Apostila de construção de redes de distribuição. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. 2011. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/moisestgomeslima/construo-de-redes-de-distribuio>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

LIGHT & CON CONSTRUÇÕES ELÉTRICAS LTDA. Disponível em: <<http://light-con-construcoes-eletricas-ltda-me.betoget.com.br/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

LOPES, Lucas V. **Política energética e fontes alternativas no Brasil**. Vitória, v. 4, n. 2, p. 144-163, jul./dez. 2015.

LUMPI-BERNDORF. **Specification for installation of Optical Ground Wires (OPGW) and Optical Phase Conductors (OPPC)**. Áustria. 2011. Disponível em: <http://www.lumpi-berndorf.at/fileadmin/downloads/OPGW-OPPC_EN.pdf>. Acesso em: 09 out. 2016.

NAKAGUISHI, Marcos I.; HERMES, Paulo D. **Estudo comparativo técnico/financeiro para implantação de redes de distribuição subterrâneas**. 2011. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

NEXANS. **Catálogo técnico: alumínio condutores nus.**São Paulo. 2013. Disponível em: <http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/fileLibrary/Download_540134436/Brazil/files/catalogo%20nus_maio%202013.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.

NEXANS. **Catálogo técnico: cabos de alumínio isolados de média tensão.**São Paulo. 2016. Disponível em: <http://www.nexans.com.br/eservice/pdf-localgroup/Cabos_de_alum_nio_isolados_de_media_tens_o.pdf>. Acesso em: 01 out. 2016.

NKT CABLES. **Catálogo técnico: Optical Ground Wire (OPGW), Optical Phase Conductor (OPPC) and Accessories.** Alemanha. 2010. Disponível em: <<http://www.nktcables.com/~media/Files/NktCables/download%20files/com/OPGWOOPG.pdf>> Acesso em: 06 out. 2016.

OLIVEIRA, Karina L. M. de. **Otimização da rede coletora de média tensão de parques eólicos utilizando um algoritmo genético modificado.** 2016. 123 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

PIMENTEL, Bernardo M. **Introdução ao estudo de linhas de transmissão de energia elétrica a cabos isolados.** 2010. 49 f. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

PLP. **Catálogo de Produtos: Telecomunicações.** Disponível em: <<http://www.plp.com.br/site/catalogos>>. Acesso em: 15 out 2016.

ROCHA, Pedro E. D. **Modelagem de cabos subterrâneos e submarinos para estudos de transitórios.** 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado – Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SALINO, Pedro J. **Energia eólica no Brasil: uma comparação do PROINFA e dos novos leilões.** 2011. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, J. N. Apostila Condutores e cabos de energia. Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. 2005.

SEKARAN, Uma. **Research methods for business**. 3 ed. Nova Iorque: John Wiley, 2007.

SORIA, Ayres F. da S; FILLIPINI, Fabio A. **Eficiência Energética**. 2. ed. Curitiba: Editora Base Setorial, 2010.

TESMEC. **Single conductor Pulleys CAS**. Disponível em: <<http://www.tesmec.com/en/products/stringing-equipment/overhead-power-lines/pulleys/cas-single-conductor-pulleys.html>>. Acesso em: 02 out. 2016a.

TESMEC. **Self-Gripping Clamps MOT**. Disponível em: <<http://www.tesmec.com/en/products/stringing-equipment/overhead-power-lines/equipment/mot-self-gripping-clamps.html>>. Acesso em 02 out. 2016b.

TESMEC. **Puxadores**. Disponível em: < <http://www.tesmec.com/pt-br/produtos/equipamentos-de-lancamento/lancamento-subterraneo/puxadores.html>>. Acesso em: 03 out. 2016c.

ZOPPETTI JÚDEZ, Gaudencio. **Redes eléctricas de alta y baja tensión para conducir y distribuir la energía eléctrica**: su disposición, construcción y cálculo tramitación de proyectos. 5. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1972.

ANEXO A

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CABOS CA (2013)

Tabela 19 - Características construtivas de cabos CA

Condutor	Bitola AWG ou kcmil	Seção transversal (mm ²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal do condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)	
			N° de fios	Diâmetro				CC 20°C	CA - 60 Hz - 75°C
Tulip	336,0	170,58	19	3,381	16,91	470,3	2782	0,1685	0,2063
Canna	397,5	201,54	19	3,675	18,38	555,7	3230	0,1426	0,1752
Syringa	477,0	241,54	37	2,883	20,18	665,9	3945	0,1190	0,1460
Dahlia	556,5	281,85	19	4,346	21,73	777,1	4410	0,1020	0,1255
Orchid	636,0	322,24	37	3,330	23,31	888,4	5143	0,0892	0,11
Arbutus	795,0	403,01	37	3,724	26,08	1111,1	6320	0,0713	0,0882
Magnolia	954,0	483,50	37	4,079	28,55	1333,0	7403	0,0594	0,0746
Gladiolus	1510,5	765,78	61	3,998	35,98	2111,3	11596	0,0375	0,0483

Fonte: Adaptado de Nexans (2013).

ANEXO B

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CABOS CAA

Tabela 20 - Características construtivas de cabos CAA

Condutor	Bitola AWG/NCM	Seção transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro externo nominal do condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)	
		Al (mm ²)	Total (mm ²)	Alumínio		Aço					CC 20°C	CA - 60 Hz - 75°C
				Nº de fios	Diâmetro fios (mm)	Nº de fios	Diâmetro fios (mm)					
Raven	1/0	53,55	62,47	6	3,371	1	3,371	10,11	216,3	1923	0,5340	0,7090
Penguin	4/0	107,2	125,09	6	4,77	1	4,77	14,31	433,2	3656	0,2667	0,3797
Linnet	336,4	170,5	198,03	26	2,89	7	2,25	18,29	689,2	6206	0,1695	0,2032
Ibis	397,5	201,4	233,97	26	3,14	7	2,44	19,88	814,3	7162	0,1435	0,1721
Hawk	477,0	241,7	280,85	26	3,44	7	2,67	21,77	978,0	8599	0,1196	0,1435
Dove	556,5	282,0	327,93	26	3,72	7	2,89	23,55	1140,0	9962	0,1024	0,1230
Grosbeak	636,0	322,3	374,79	26	3,97	7	3,09	25,15	1303,0	11052	0,0896	0,1075
Drake	795,0	402,8	468,51	26	4,44	7	3,45	28,11	1629,0	13817	0,0717	0,0864
Rail	954,0	483,9	516,75	45	3,7	7	2,47	29,60	1602,7	11539	0,0597	0,0733
Parrot	1510,0	765,4	861,86	54	4,25	19	2,55	38,25	2890,0	22829	0,0379	0,0470

Fonte: Adaptado de Nexans (2013).

ANEXO C

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE CABOS CAL

Tabela 21 – Características construtivas de cabos CAL

Condutor	Bitola (NCM)	Seção transversal (mm ²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal do condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)	
			N° de fios	Diâmetro				CC 20°C	CA - 60 Hz - 75°C
Alliance	246,9	125,09	7	4,770	14,31	343,2	3882	0,2678	0,3194
Butte	312,8	158,49	19	3,259	16,30	434,9	4765	0,2114	0,2523
Canton	394,5	199,9	19	3,660	18,30	548,5	6009	0,1676	0,2001
Cairo	465,4	235,79	19	3,975	19,88	647,0	7088	0,1421	0,1696
Darrien	559,5	283,54	19	4,359	21,80	778,0	8524	0,1181	0,1417
Elgin	652,5	330,62	19	4,707	23,54	907,2	9939	0,1013	0,1218
Flint	740,8	375,36	37	3,594	25,16	1029,9	11041	0,0892	0,1075
Greeley	927,2	469,85	37	4,201	28,15	1289,2	13821	0,0713	0,0864

Fonte: Adaptado de Nexans (2013).

ANEXO D

CROQUI DA REDE DE MÉDIA TENSÃO DO PARQUE EÓLICO

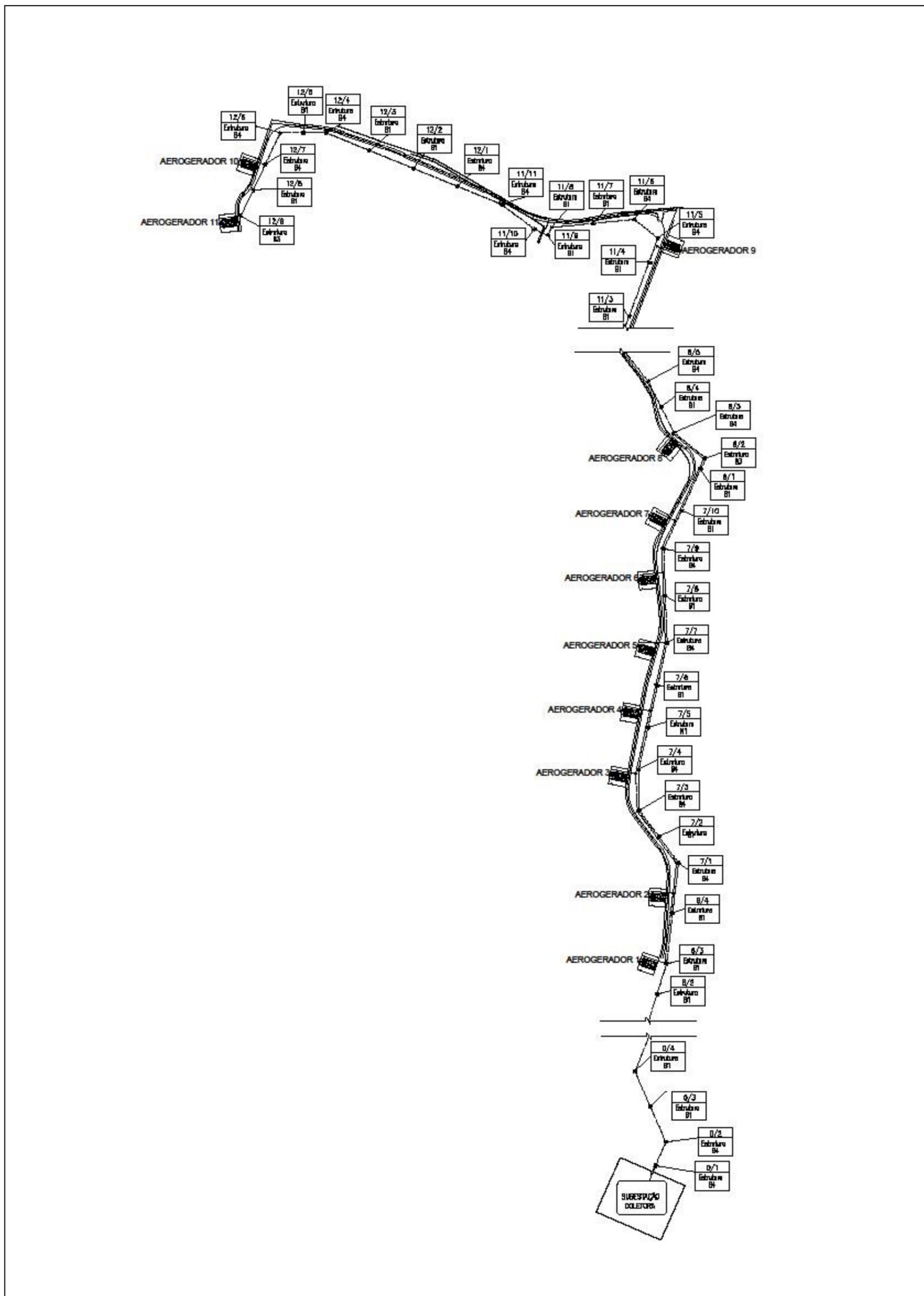


Figura 26 - Croqui da rede de média tensão do parque eólico
Fonte: A autora (2016).