



## **Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE**

### **Projeto de compactação de uma subestação de classe de tensão de 145 kV, implantação da subestação ETC Brookfield Towers**

**JOSE DE MELO CAMARGO (\*) (1); ROBERTO FELIZARDO MORENO (2); GERSON FERNANDES JUNIOR (2);  
MAXIMILIANO MENDES DUARTE (3);  
EEPEA (1); EPTE (2); Tecnova (3);**

#### **RESUMO**

Este informe técnico descreve os pontos principais do projeto executivo da subestação ETC Brookfield Towers, classe de tensão 145 kV, comparando com os estudos e as modelagens realizadas no desenvolvimento do estudo de viabilidade técnica e no projeto básico desenvolvido dessa subestação.

O artigo descreve as alterações realizadas, o processo de execução dos serviços de obras civis, montagem eletromecânica e comissionamento da subestação, focando principalmente nos dois equipamentos mais significativos da subestação, o conjunto blindado GIS e o transformador de potência e, também no sistema de proteção e combate a incêndio instalado.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Subestação, Conjunto Blindado GIS, Transformador de potência

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Esse artigo tem o objetivo detalhar o estudo de caso, referente a implantação de uma subestação a ser conectada ao sistema elétrico da Enel Distribuidora São Paulo, localizada na região central da cidade de São Paulo, denominada ETC Brookfield Towers. Esta subestação tem a tensão nominal de 88/138 – 13,8 kV, que alimentará os circuitos de distribuição subterrâneos internos do conjunto comercial Nações 17007.

Conforme legislação vigente da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, a qual publicou no Modulo 3 do PRODIST, que as demandas de energia acima de 2.500 kW, a concessionária local deve atender qualquer cliente no subgrupo A3, A2 ou A1, isto é, permitir a conexão com o nível de tensão 69 kV, ou 88/138 kV, ou 230 kV ou mais, respectivamente.

No último SNPTTEE/2017, o artigo “ESTUDO DE COMPACTAÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE CLASSE DE TENSÃO DE 145 kV, ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E PROJETO BÁSICO DA ETC BROOKFIELD TOWERS”, teve como objetivo, detalhar o estudo de viabilidade técnica para implantação dessa subestação e o desenvolvimento do projeto básico da mesma, em uma área restrita disponível do empreendimento e, as tecnologias estudadas para sua implantação.

Este artigo tem como objetivo mostrar os acertos e as dificuldades encontradas na execução do projeto, comparando com o projeto básico desenvolvido.

## 2.0 - PROJETO BÁSICO DA SUBESTAÇÃO

O projeto básico da subestação se desenvolveu de acordo com as instruções do livro de fornecimento da Enel Distribuidora (1), com a implantação de particularidades específicas em função da condição de instalação, isto é, uma edificação com áreas de acesso reduzida, e grande impacto na funcionalidade do edifício comercial em caso de falhas de equipamentos elétricos. Dessa forma, adotou-se algumas premissas complementares:

- A subestação deve ter uma configuração que permita atender a contingência N-1, em caso de falha de equipamento. Portanto, projetou-se a configuração barra dupla a três chaves na alta tensão e configuração barra simples com disjuntor de interligação na média tensão.
- Utilização do sistema de alarme e combate a incêndio com CO<sub>2</sub>, nos transformadores e nos cabos de média tensão.
- Segurança operativa dos equipamentos, buscando especificar equipamentos que atendessem as normas técnicas e tivessem suportabilidade aos níveis de curto-circuito previstos para a subestação, e um projeto de aterramento que permitisse realizar a dissipação da energia proveniente de curto-circuitos e de descargas atmosférica, gerando níveis de tensão de passo e de toque compatíveis com a suportabilidade do corpo humano.
- Segurança operacional, especificando dispositivos de intertravamento que diminuíssem os erros operativos, e especial atenção com as distâncias de segurança elétrica, atendendo aos requisitos especificados na NR-10.

### 2.1 Conjunto Comercial Nações 17007

O Conjunto Comercial Nações 17007 é um empreendimento do tipo Mixed Use, localizado na Avenida Nações Unidas 17007, na região sul da cidade de São Paulo. O complexo está implantado em um terreno de aproximadamente 25.800 m<sup>2</sup>, composto por duas torres, uma de conjuntos comerciais (Torre Alpha) e a outra de escritórios corporativos (Torre Sigma), além de um auditório e um Mall com área bruta para locação de 4.500 m<sup>2</sup>.

A Torre Alpha é composta de 30 (trinta) pavimentos e mais 4 (quatro) andares de cobertura, e a Torre Sigma é composta de 28 (vinte e oito) pavimentos, 3 (três) andares de cobertura e um futuro heliporto. A figura 1 mostra a edificação locada no ambiente de sua localização física.



FIGURA 1 – Ilustração da edificação no seu ambiente.

Além da ocupação das duas torres, o projeto do empreendimento contempla a instalação adjacente de uma estação do trem metropolitano, composta de um edifício de acesso, uma passarela sobre a Avenida Nações Unidas e uma plataforma de embarque e desembarque de passageiros, na margem do Rio Pinheiros.

### 2.2 Definições do Projeto Básico

A definição da subestação a partir da solução técnica adotada, aplicando um conjunto blindado de alta tensão em GIS (GAS ISULATED SWITCHGEAR), e dos transformadores de potência utilizando óleo vegetal como meio isolante, o projeto se desenvolveu aplicando as normas técnicas vigentes e as boas práticas de engenharia, na distribuição dos equipamentos, aterramento da subestação e no dimensionamento de capacidade de transmissão e distribuição, e do sistema de proteção da subestação. A figura 2, apresenta os cortes da subestação aprovado pelo empreendedor e pela concessionária local, Enel Distribuidora.

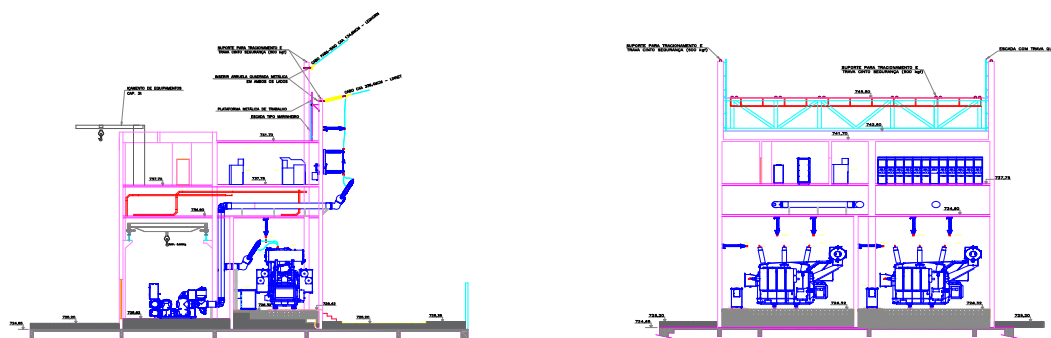


FIGURA 2 – Corte lateral e frontal da subestação.

### 2.2.1 Conjunto blindado de alta tensão – GIS

Na concepção do projeto do conjunto blindado de alta tensão – GIS, se aplicou alguns conceitos utilizados em subestações de maior importância sistêmica, e principalmente em função do eventual tempo de reparo. A partir destas condicionantes, resultou-se:

- Utilização da barra dupla a três chaves, apesar de ser disponível configurações com barra simples, se adotou esta configuração por permitir maior flexibilidade operativa, com alternativas de manobras em caso de contingências no equipamento.
- Utilização do disjuntor paralelo e não de interligação de barra, em função das seccionadoras de barra dos bays não possuir capacidade de interrupção de corrente, somente isolamento. O processo de abertura dessas seccionadoras deve ser realizada com o disjuntor paralelo ligado, e a interrupção de barra será sempre realizada com o barramento em tensão.
- Utilização de dutos de barramento com terminações AR/SF6: A utilização desses equipamentos é em função de garantir a realizações das ligações ao transformador de potência e a chegada do ramal de linha de transmissão com distâncias mais compactas, garantindo o nível de isolamento, resultado que não seria obtido com a utilização de terminações com cabos isolados de alta tensão.
- Estudo detalhado de compartimentação do conjunto blindado, com a montagem do diagrama de compartimentação e a aplicação de bunfers, que facilita o processo de manutenção corretiva, sem interferir na operação normal da subestação.

A figura 3, apresenta um layout da configuração do conjunto blindado de alta tensão definido para ser aplicado na subestação.

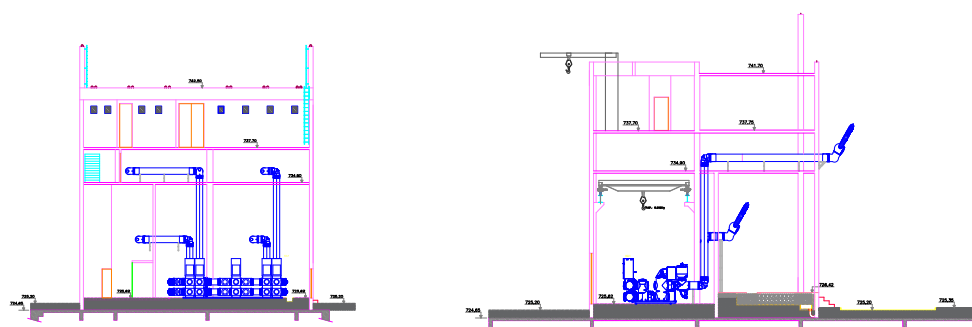


FIGURA 3 – Vista frontal e lateral do conjunto blindado de alta tensão.

### 2.2.2 Transformador de potência

O transformador de potência especificado é de tensão 88/138-13,8 kV, potência de 7,5/9,375 MVA, com comutação automática no enrolamento de alta tensão, e utilizando como meio isolante óleo vegetal do tipo Envirotamp TM FR3 TM, biodegradável, renovável, à base de éster natural, certificado pela FM Global como fluido resistente ao fogo / classe “K”, conforme norma técnica ABNT NBR 13231, com ponto de fulgor e de combustão, com valores aproximados, de 330°C e 360 °C, respectivamente.

A especificação técnica do equipamento contemplou também, que o fornecedor deverá considerar no seu projeto os efeitos das sobretensões que ocorrem na manobra das seccionadoras e dos disjuntores do conjunto blindado GIS, considerado que o fornecedor do conjunto blindado fornecerá as análises obtidas dos resultados das simulações da ocorrência das tensões temporárias denominada VFTO (Very Fast Transient Overvoltage) (2).

### 3.0 - PROJETO EXECUTIVO DA SUBESTAÇÃO

O projeto executivo da subestação iniciou-se em dezembro/2016 e as obras civis em maio/2017. Como 95% dos equipamentos elétricos são instalados dentro do edifício da subestação, a montagem eletromecânica da subestação iniciou-se em dezembro/2018.

Nesse período inicial, o foco foi no desenvolvimento dos projetos executivos dos equipamentos, principalmente do conjunto blindado GIS, do transformador de potência e do conjunto blindado de média tensão.

Os serviços de obras civis, montagem eletromecânica e comissionamento da subestação foram concluídos em novembro/2018. Atualmente aguarda-se a conclusão das obras do ramal de linha de transmissão, as quais dependem de autorização ambiental para serem retomadas.

A previsão é que no segundo semestre de 2019 essa subestação seja energizada em tensão e em carga.

#### 3.1 Subestação

A seguir se apresenta os pontos de divergentes e os acertos obtidos na execução do projeto, comparando com o previsto no desenvolvimento do projeto básico da subestação.

##### 3.1.1 Obra Civil

A edificação da subestação foi implantada a partir no nível térreo do empreendimento Nações 17007, uma vez que, abaixo deste nível o edifício possui cinco subsolos de garagem, portanto, houve a necessidade da realização do reforço nas estruturas existentes, vigas e colunas, visando sustentar o acréscimo de massa a ser posicionado sobre a laje do pavimento térreo. A tabela 1 mostra a estimativa de peso dos equipamentos sem contemplar a estrutura civil da edificação, a movimentação dos equipamentos e demais necessidades para a construção da edificação e montagem dos equipamentos.

Tabela 1 – Estimativa de peso dos equipamentos da subestação

<b>Equipamentos</b>	<b>Estimativa de peso (kg)</b>
Transformadores de potência	66.000
Conjunto blindado GIS	24.400
Cubículos, retificadores e baterias	8.300
Conjunto blindado de média tensão	26.040
Ponte rolante e de içamento	8.000
Demais equipamentos	12.370
Carreta para transporte do transformador de potência	26.400
<b>Total estimado</b>	<b>163.518</b>

- Com essa estimativa de peso, a construtora do empreendimento projetou e construiu todo o reforço estrutural desde do 5º subsolo até o nível térreo, que serviu de fundação para a estrutura da edificação, e também realizou o projeto estrutural da edificação da subestação. Essa etapa foi desenvolvida no projeto básico.
- O projeto executivo da malha de aterramento da subestação se desenvolveu na etapa anterior ao projeto de reforço estrutural, pois é um estudo complexo porque contempla a subestação, o ramal de linha de transmissão, a edificação comercial e a futura estação do trem metropolitano a ser construído nesse local.
- Construiu-se três malhas de aterramento, uma de dissipação no 5º subsolo, uma de captação no nível térreo e a terceira na cobertura da edificação, para captação das descargas atmosféricas através do cabo guarda do ramal de linha de transmissão. Aproveitando o reforço estrutural, instalou-se dutos para a passagem dos cabos de aterramento, interligando essas malhas de aterramento e o aterramento dos equipamentos.
- A construtora da edificação da subestação alterou o projeto estrutural a partir do nível térreo de concreto em loco por estrutura em pré-moldados contemplando os três andares previstos, por maior facilidade construtiva e diminuição do tempo de execução.

As figuras 4 e 5, mostram algumas etapas da construção das bases e montagem das vigas pré-moldadas e suas lajes.



FIGURA 4 – Construção das bases em cima da laje do térreo.



FIGURA 5 – Montagem das estruturas pré-moldadas.

### 3.1.2 Montagem dos Equipamentos

A montagem dos equipamentos elétricos se iniciou somente após a conclusão das obras civis internas da edificação, com prioridade para as instalações de iluminação, bandejamento de cabos, e montagem da ponte rolante e da talha elétrica.

- a. A montagem do conjunto blindado GIS foi a atividade que demandou mais tempo para ser realizada, em torno de 4 meses de trabalho, mesmo sendo os bays entregues pré-montados em fábrica, e na subestação se realizou a união destes elementos e dos barramentos de interligação. Em consideração as especificidades do conjunto blindado, requereu dedicação especial das equipes de trabalho e de limpeza do local.
- b. A montagem dos transformadores de potência foi mais célere, em função de terem sido entregues com a parte ativa coberta com óleo isolante, possibilitando dessa forma, adoção de procedimentos normais de montagem para este tipo de equipamento. Tomou-se um cuidado especial na desmontagem dos transformadores na fábrica após as inspeções, pois todo acessório a qual teve contato com o óleo vegetal, teve que ser transportado pressurizado com nitrogênio, para evitar a entrada de oxigênio internamente e consequentemente ocorrer uma reação química com o resíduo de óleo vegetal, criando uma borra interna.

A figura 6 apresenta detalhes de montagem de alguns equipamentos da subestação.



FIGURA 6 – Montagem do conjunto blindado GIS, buchas de alta tensão do transformador de potência e pré-montagem e ajuste da seccionadora, respectivamente.

### 3.1.3 Fachada da Edificação

A arquitetura externa da edificação teve muita alteração em relação ao projeto básico que previa um acabamento em pastilhas na cor cinza.

- a. A fachada correspondente à chegada do ramal de linha de transmissão foram mantidas as pastilhas em toda a sua face, bem como as telas nas celas dos transformadores de potência, as quais têm por função permitir a

circulação de ar, com vistas à refrigeração do transformador de potência. Considerando-se que as estruturas pré-moldadas possibilitaram vão de maior dimensão, houve melhora na circulação de ar, facilitando ainda a montagem do transformador.

- b. Nas demais faces da edificação foram substituídas as pastilhas por pele de vidro, para harmonizar com as características do empreendimento comercial.
- c. Até a altura de 2 metros, nas faces laterais se manteve as pastilhas e na face oposta ao ramal, correspondendo às portas de acesso ao edifício, se executou um jardim vertical com sistema de irrigação automático.
- d. Toda a estrutura de sustentação da fachada de pele de vidro são estruturas de alumínio, sendo desenvolvido estudo complementar de aterramento dos elementos condutivos, visando evitar a circulação de correntes induzidas.

A figura 6, apresenta detalhes da fachada da edificação da subestação.



FIGURA 6 – Faces da edificação com pele de vidro e jardim vertical.

### 3.2 Conjunto Blindado de Alta Tensão (GIS)

No desenvolvimento do projeto básico com relação ao conjunto blindado GIS recebeu especial atenção, tendo sido especificados requisitos técnicos visando o atendimento à legislação nacional, tais como as Normas Regulamentadoras, a sinalização visual e de estado, etc. Dessa forma, se destaca algumas alterações realizadas no projeto do fabricante:

- a. Utilização de disjuntores termomagnéticos individualizados por equipamento, tanto para a proteção dos motores como para o comando desses equipamentos.
- b. Alteração do esquema de comando do equipamentos de bay de forma a permitir o intertramento elétrico e mecânico, sem alterar a filosofia de comando do conjunto blindado, desenvolvida pelo fabricante e atendendo a norma regulamentadora.
- c. Sinalização e identificação por cores além das letras utilizadas pelo fabricante.
- d. Alteração na alimentação em corrente contínua e de sua supervisão no esquema de comando dos intertravamento elétricos entre bays do conjunto blindado, mantendo a confiabilidade no mesmo nível do sistema de potência do conjunto blindado GIS.

### 3.3 Transformador de Potência de 7,5/9,375 MVA

Os transformadores de potência instalado têm uma potência 7,5/9,375 MVA e tensão de 88/138 – 13,8 kV e, apesar da potência do transformador não ser elevada, a condições de instalação apresentaram especificidades não observadas em instalações convencionais.

Uma das duas maiores dificuldades encontradas na montagem física do transformador foi determinar sua posição correta, devido a uma coluna de sustentação do prédio que vinha desde do 5 ° subsolo, a qual não poderia ser deslocada e consequentemente adequar as distâncias elétricas fase-fase e fase-terra entre as terminações AR/SF6 do conjunto blindado GIS e as buchas de alta tensão do transformador, além do que, instalar um conjunto de para-raios entre as duas terminações, a fim de diminuir os níveis de transitórios provenientes do chaveamento do conjunto blindado GIS, a qual se propagam pelos dutos de barramento.

Outro ponto estudado dentro do projeto executivo do transformador foi determinar as medidas mitigatórias a serem aplicadas, para que o transformador suporte as tensões transitórias denominada VFTO, tendo sido adotada proteção adicional na cabeça das bobinas de alta tensão e na utilização do enrolamento tipo entrelaçado.



Com relação ao impacto da vibração do transformador na estrutura civil da edificação, foi aplicado no transformador um sistema de amortecimento entre a parte ativa e o tanque, dispositivo que, segundo o fabricante do equipamento, deve-se reduzir as forças transmitidas para a base do transformador de forma significativa em relação ao sistema sem amortecimento (3). Esse amortecimento terminou contribuindo também na diminuição do nível de ruído audível do transformador, especificado na compra do mesmo em 55 dB.

### 3.4 Sistema de combate e Proteção de Incêndio

O projeto do sistema de combate a incêndio se iniciou na especificação do transformador de potência. No projeto básico estudou-se a aplicação do óleo vegetal em relação ao óleo isolante naftênico, sendo o escolhido óleo vegetal por dois pontos importantes:

- A primeira questão, se refere ao ponto de fulgor do óleo isolante vegetal de 330 °C, bem superior ao ponto de fulgor de 147 °C do óleo isolante naftênico.
- A segunda questão, refere em especificar as temperaturas de operação do transformador aplicadas com óleo naftênico no óleo vegetal, dessa forma, obteve-se um aquecimento menor do transformador na operação de potência nominal e emergência, comprovado no ensaio de aquecimento. Assim, deverá ocorrer um aquecimento menor dentro da cela do transformador.

Por ocasião da especificação da subestação, a legislação do corpo de bombeiros solicitava a instalação do sistema de combate a incêndio por água pressurizada ou por sistema com CO<sub>2</sub>, independente do tipo de óleo isolante a ser utilizado. Dessa forma, optou-se pelo sistema de combate a incêndio por CO<sub>2</sub> para as celas dos transformadores e também no 1º andar, andar técnico, onde estão os cabos de força.

Entretanto, para a eficácia do sistema de combate a incêndio por CO<sub>2</sub>, as celas dos transformadores deveriam ser totalmente fechadas, o que prejudicaria o sistema de resfriamento dos transformadores de potência. Assim, durante o projeto, se realizou os cálculos de perdas e instalou-se um sistema de dumpers, que são acionados automaticamente quando o alarme de incêndio na cela do transformador é ativado, em seguida, com o aumento da pressão interna da mesma, é acionado um outro dumper com a função de aliviar a pressão interna. A figura 7, mostra alguns detalhes do sistema.



FIGURA 7 – Sistema de descarga de CO<sub>2</sub>, Baterias de CO<sub>2</sub> e dumpers de fechamento, respectivamente.

### 4.0 - COMISSONAMENTO DA SUBESTAÇÃO

O comissionamento referente aos ensaios elétricos, destaca-se o ensaio final do conjunto blindado GIS. Como a fase final de montagem do conjunto blindado é realizado em campo e deve-se aferir a qualidade do processo de montagem, a limpeza do ambiente e o próprio processo de conexão da parte elétrica de potência.

Dessa forma, após a conclusão da montagem e a inserção do gás SF<sub>6</sub> no conjunto blindado, se realizou o ensaio de tensão aplicada a 60 Hz com medição de descargas parciais. O nível de tensão aplicada foi de 235 kV por 1 minuto, sendo que nesse nível de tensão, não pode apresentar uma descarga parcial maior que 5 pC. Os resultados obtidos foram satisfatórios, a figura 8 apresenta alguns detalhes do processo de ensaio.



FIGURA 8 – Gerador de tensão para o ensaio e a medição de descarga parcial.

Em relação ao comissionamento do sistema de controle e proteção, investiu-se no sistema automático de proteção e controle, principalmente na média tensão, aproveitando os recursos disponíveis nos reles de proteção e o sistema de comunicação entre eles, através do protocolo IEC 61850.

Com isso, foram desenvolvidas esquemas de atuações e de restabelecimento que facilitará o processo de operação da subestação, frente a suas ocorrências e falhas técnicas.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Como todo projeto existe os acertos e correções a serem executadas, neste projeto isso também ocorreu e teve-se a felicidade das correções poderem ser realizadas sem termos um aditivo financeiro no contrato. Dessa forma, o acerto do projeto básico em relação ao projeto executivo está na ordem de 90%, sem considerar a alteração da fachada da edificação, a qual foi uma solicitação posterior do cliente, com vistas à harmonização externa das edificações.

O nível de aprendizado com esse projeto e a experiência adquirida, contribuiu muito no aperfeiçoamento profissional das equipes de trabalho.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

A EEPEA / EPTE agradece a Tegra Incorporadora pela oportunidade em desenvolver e acompanhar tecnicamente esse projeto e os fornecedores Tecnova, responsável pelo fornecimento dos projetos executivos, construção e comissionamento da subestação, General Eletric responsável pelo fornecimento dos conjuntos blindados de alta e média tensão e pelo sistema de controle, proteção e automação, Comtrafo, responsável pelo fornecimento dos transformadores de potência e, SPCI Brasil responsável pelo fornecimento do sistema de proteção e combate a incêndio.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Fornecimento de Energia Elétrica – Tensão de Subtransmissão 88/138 kV Subgrupo A2 – AES Eletropaulo de 2011.
- (2) Análise dos Transitórios de Manobra e Descarga Atmosférica – SE ETC Brookfield Towers – ATM Engenharia de julho 2017.
- (3) Relatório da Montagem da Parte Ativa CE-5763 R-D - Comtrafo de março 2018.
- (4) Documento do projeto executivo da subestação ETC Brookfield Towers – janeiro/2017.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José de Melo Camargo, brasileiro, engenheiro, formado em 1985 na Universidade de Mogi das Cruzes e mestre em sistema de potência pela Universidade Federal de Uberlândia em 2009. É membro do Cigré-Brasil e sou especializado em subestações e linhas de transmissão. Trabalhei como engenheiro especialista na AES Eletropaulo desde 1986 se desligando em 2014 e atualmente desenvolvo estudos e projetos básicos de subestações na EEPEA.

Roberto Felizardo Moreno, engenheiro civil e ambiental (POLI 1978), ex-funcionário das empresas Light, Eletropaulo, EPTE e CTEEP, diretor técnico da EDF Engenheiros Associados (EPTE).

Gerson Fernandes Junior, Engenheiro civil na EDF Engenheiros Associados (EPTE).

Maximiliano Mendes Duarte, engenheiro eletricitista (UFPR 2010). Pós-graduado em gerenciamento de projetos e



Coordenador de Projetos da Tecnova Engenharia (Tecnova).