



**XXII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTL/29  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – XV**

**GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS -  
GTL**

**FERRAMENTA CORPORATIVA PARA GERENCIAMENTO E MANUTENÇÃO DOS  
DADOS DE PARÂMETROS ELÉTRICOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.**

**João Henrique M. Almeida (\*)**  
**CEMIG/PROEL**

**Edino B. Giudice Filho**  
**CEMIG**

**Sandro de C. Assis**  
**CEMIG**

**Paulo José C. Nogueira**  
**CEMIG**

**RESUMO**

A expansão do sistema elétrico vem gerando novas necessidades e desafios para os profissionais do setor. O aumento da complexidade dos arranjos de linhas de transmissão é uma consequência da expansão do sistema. Para que os diversos estudos e análises possam ser realizados com qualidade, o desenvolvimento de novas ferramentas torna-se necessário.

Para garantir a confiabilidade dos dados de impedância das linhas de transmissão da CEMIG, foi desenvolvido um sistema para gerenciamento de parâmetros de linhas, o IMPEDAN, associado a uma interface gráfica para melhor atender os setores que consultam recorrentemente os dados dos parâmetros das linhas de transmissão.

**PALAVRAS-CHAVE**

Impedância, Parâmetros Elétricos, IMPEDAN, Linhas de Transmissão, Banco de dados.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A primeira versão do IMPEDAN surgiu em 1991, devido a necessidade de padronização e controle de qualidade dos cálculos de parâmetros elétricos de linhas de transmissão. Inicialmente o programa funcionava em uma plataforma DOS (CLIPPER), passando por outras versões até a atual, construída com o Framework .NET e servidor de banco de dados SQL Server, atendendo às necessidades de um sistema em franco crescimento e que atende toda a corporação.

O sistema IMPEDAN possui um conjunto de banco de dados de cabos condutores, cabos para-raios, estruturas e subestações, que auxiliam o cadastro das linhas de transmissão. O IMPEDAN traz um novo conceito na forma de interação do usuário com o sistema CEMIG, através de diagramas de blocos, visando fornecer os dados de impedâncias, de forma ágil e intuitiva. O principal motivador para essa forma de exibição é a redução do retrabalho gerado pela interpretação dos arranjos e caminhamentos das linhas de transmissão (LTs).

Devido à alta concentração de linhas de transmissão nas proximidades dos centros urbanos e nas grandes unidades geradoras, é bastante comum o compartilhamento de faixas por várias LTs. Esse compartilhamento reduz a necessidade de aquisição de novas faixas, que economicamente é benéfico. No entanto, essa condição aumenta a complexidade do sistema, devido às interferências eletromagnéticas entre as linhas de transmissão. Tal

(\*) Rua Aimorés, n° 3000 – Barro Preto – Edifício Minerva 8º Andar - PELS – CEP 30.140-073 BH, MG, Brasil.  
Tel: (+55 31) 3506-2163 –Email: joaohenriquema@gmail.com

fato leva à necessidade de se calcular com maior precisão os valores dos parâmetros elétricos das LTs, de forma dinâmica, incluindo as impedâncias mútuas. Essas informações são significativas e influenciam diretamente o ajuste da proteção do sistema elétrico. Portanto, torna-se fundamental o controle e o armazenamento dos parâmetros elétricos do sistema de energia, em uma base de dados sólida e confiável, permitindo atualizações que acompanhem o crescimento e alterações do sistema.

Além da disponibilização dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, novas funcionalidades foram e estão sendo inseridas no IMPEDAN, aproveitando-se da estrutura de dados do sistema.

## 2.0 - CONSIDERAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE LTS

### 2.1 Considerações relativas ao cálculo

Os parâmetros elétricos das LTs são representados pelo modelo pi-equivalente, que considera os parâmetros de linha distribuídos, resultando em equações diferenciais parciais as quais são ajustadas ao modelo. O IMPEDAN em seu registro dos parâmetros das LTs, utiliza componentes simétricas. A Figura 1 mostra o circuito pi-equivalente de uma LT.

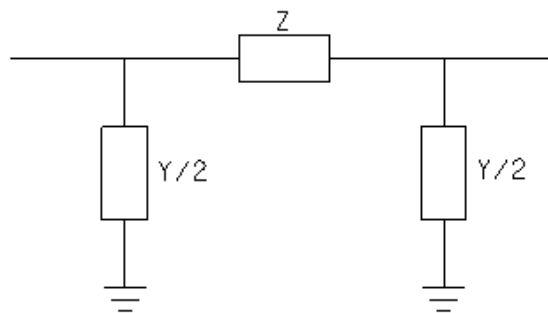


FIGURA 1 – Circuito PI de uma LT

Em que:

$Z$  é a Impedância da LT, sequência positiva ( $Z_1$ ) e sequência zero ( $Z_0$ ), em  $\Omega$ , % na base 100 MVA  
 $Y$  é a admitância da LT, sequência positiva ( $Y_1$ ) e sequência zero ( $Y_0$ ), em  $\mu S$ , kVar

Os valores dos parâmetros exibidos na figura acima são mostrados nas expressões (1) e (2):

$$z = Z \times \frac{\sinh(\gamma \times l)}{\gamma \times l} \quad (1)$$

$$y = Y \times \frac{\tanh(\gamma \times l/2)}{\gamma \times l/2} \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{z \times y}, \text{ constante de propagação,}$$

$$Z = z \times l \quad \text{e} \quad Y = y \times l, \text{ onde } l \text{ é o comprimento da linha.}$$

Em que:

$z$  é a impedância por unidade de comprimento  
 $y$  é a admitância por unidade de comprimento

O cálculo, quando realizado, leva em consideração a geometria da estrutura e temperatura de projeto para determinação da disposição espacial dos cabos condutores e cabos para-raios. Os efeitos relacionados à frequência (efeito pelicular) e temperatura real do condutor são importantes na determinação das impedâncias da LT.

### 2.2 Considerações relativas ao sistema elétrico

A discriminação dos trechos das LTs tem sido cada vez mais relevante para maior precisão dos cálculos dos parâmetros elétricos.

Os trechos são definidos de acordo com características típicas de cabos condutores, cabos para-raios e estruturas. Por exemplo, a variação de um cabo para-raios causa uma sensível diferença nos parâmetros de sequência zero. Já uma variação do cabo condutor irá causar uma sensível variação da impedância de sequência positiva. A melhoria na precisão do cálculo proporciona uma maior exatidão na localização de faltas e consequentemente melhor desempenho da proteção do sistema. É importante, portanto, valores de parâmetros detalhado para cada trecho cuja soma final definirá os parâmetros da linha.

As impedâncias mútuas entre LTs veem sendo cada vez mais requisitadas pelas equipes de operação, devido sua importância para os ajustes dos relés de proteção, que possuem grande sensibilidade. Neste aspecto deve ser considerado todas as LTs próximas dentro de um raio a ser definido, segundo nível precisão exigido. Deve também ser observado os comprimentos dos trechos de paralelismo relevantes em relação à LT em questão.

A Figura 2 ilustra como os trechos são definidos e se relacionam para definição dos parâmetros elétricos do sistema, em que cada bloco representa um trecho de uma linha, com informações detalhadas sobre o mesmo.

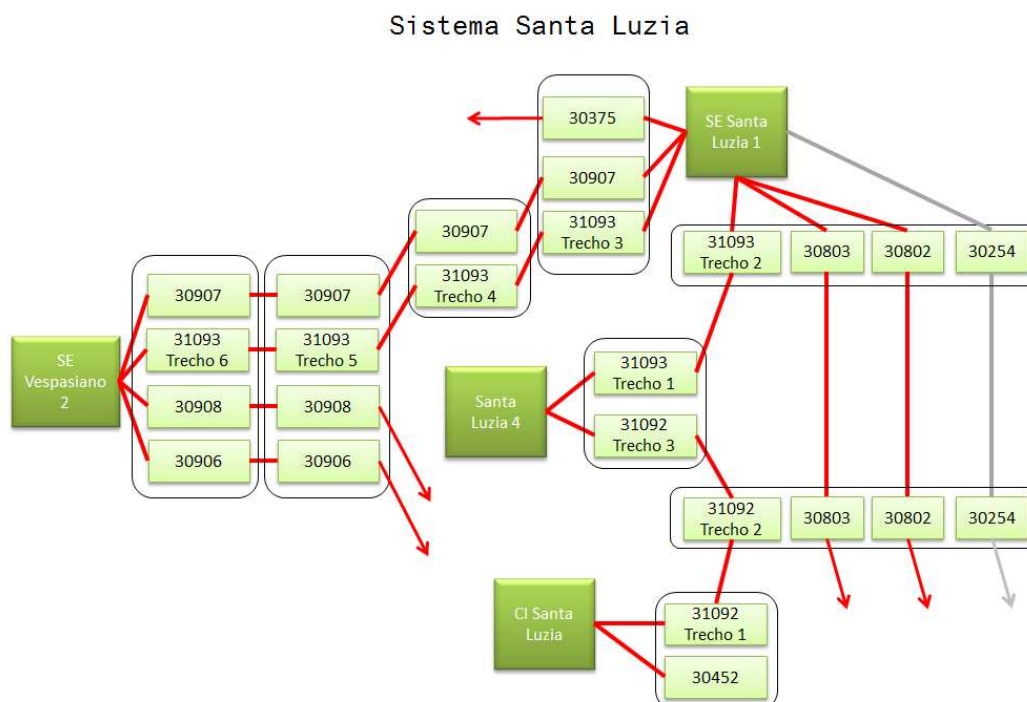


FIGURA 2 – Sistema Elétrico visualizado pela perspectiva dos trechos, para consulta dos parâmetros elétricos das LTs e mútuas entre as mesmas.

### 3.0 - ESTRUTURA DO IMPEDAN

Um dos principais objetivos na definição da estrutura relacional do IMPEDAN foi a sistematização do processo que envolve o cálculo dos parâmetros elétricos das LTs, de forma a permitir que os vários agentes que definem as características básicas do projeto de linha possam fornecer os insumos necessários para o cálculo de forma direta. Portanto, foram criadas entidades para os principais componentes de uma linha de transmissão.

Além das entidades relacionadas com os elementos das LTs, verificou-se também a importância de fornecer o acesso adequado aos diversos grupos de usuários do IMPEDAN, de forma que cada grupo visualize somente a parte que lhe interessa, simplificando assim a navegação e aquisição/inserção de dados.

#### 3.1 Estrutura Relacional do Banco de Dados

A Figura 3 apresenta o Modelo de Domínio do IMPEDAN, para simplificar a apresentação do mesmo, algumas entidades foram inseridas dentro de duas molduras (A e B). As entidades no interior da moldura B são as relacionadas aos registros das linhas, constituindo as informações importantes para a rastreabilidade e disponibilização dos parâmetros elétricos. Já as entidades no interior da moldura A são as relacionadas aos usuários, grupos de acesso e comunicação entre usuários.

FIGURA 3 – Modelo de Domínio

As entidades que compõe os grupos de usuários foram concebidas de forma a permitir a utilização das funcionalidades do IMPEDAN de forma eficiente. A entidade Usuários tem o cadastro dos usuário vinculado diretamente à base de dados dos funcionários da CEMIG. A entidade Empresa, permite que o IMPEDAN atenda a diferentes empresas do grupo CEMIG de maneira independente.

A entidade Grupos de Acesso tem a funcionalidade de determinar permissões específicas aos grupos de usuários à medida que forem criados. Dessa forma os administradores do IMPEDAN podem configurar os grupos de maneira a proporcionar o melhor desempenho e uso do sistema. A entidade comunicado permite o registro mensagens, podendo estar relacionados a uma LT. Os comunicados podem ser consultados em uma ambiente específico, sendo que os mais recentes ficam visíveis na tela inicial do IMPEDAN.

### 3.2 Interface gráfica

Um dos pontos base do novo IMPEDAN é a forma como o usuário acessa o registro dos parâmetros das LTs. Cada componente do diagrama representa um elemento da linha. Isso permite que ao cadastrar a linha um croqui seja construído. Dessa forma registram-se os detalhes que são importantes para os usuários, de maneira geral, como por exemplo a presença de subestações de chaveamento, detalhamento dos principais trechos, incluindo trechos derivados. Os usuários realizam as consultas navegando pelos trechos e parelismos, e dessa forma, a visualização da situação, dispensa a análise de outros documentos, para maioria dos casos, como forma de entendimento do arranjo básico da linha. A Figura 4 mostra como um usuário visualiza os componentes de uma LT.

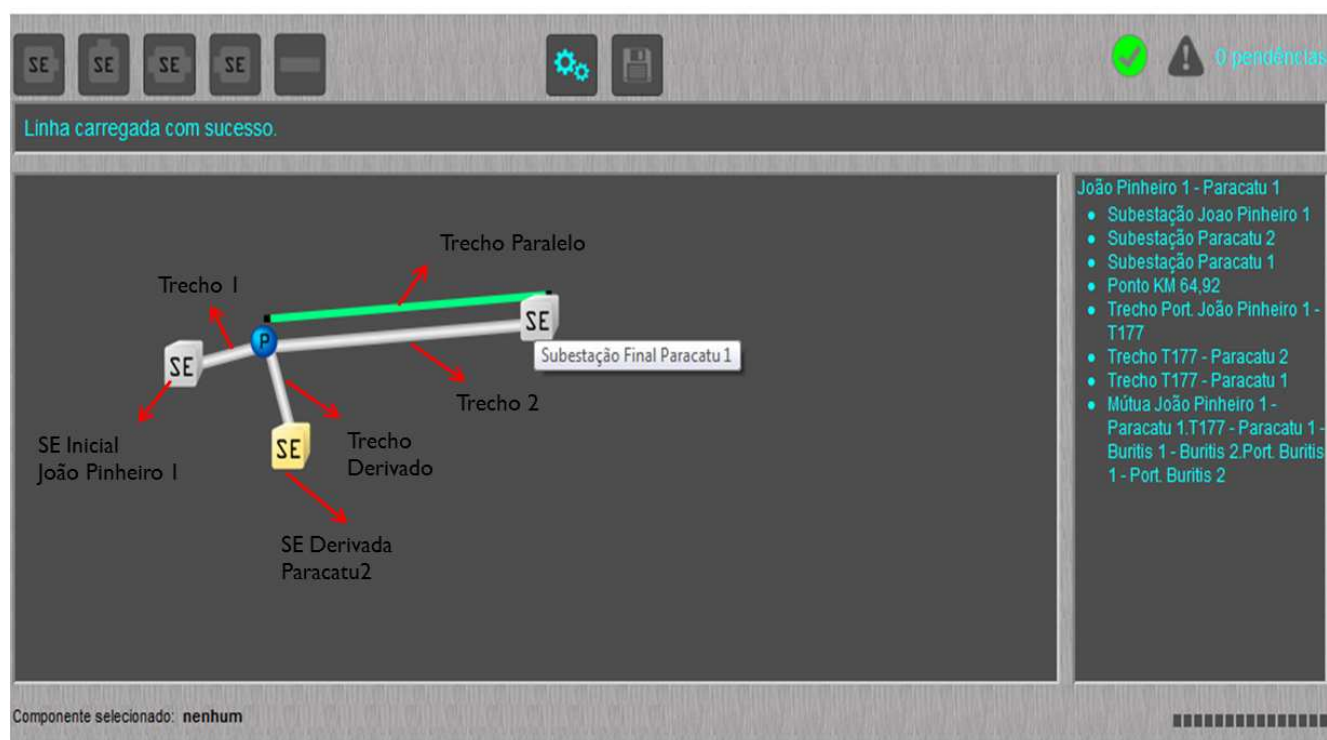


Figura 4 – Interface gráfica do IMPEDAN para consulta em uma LT

No que se diz respeito aos detalhes dos trechos, além dos atributos relevantes para rastreabilidade dos cálculos dos parâmetros, foram inseridos outros atributos que auxiliam os usuários na interpretação dos dados, como por exemplo: marco inicial e final dos trechos, bem como o percentual relativo dos mesmos em relação à LT; dados dos parâmetros de linha em PU e %, somas parciais das impedâncias, dentre outros.

Os trechos paralelos, chamados de “Mútuas” no IMPEDAN, são sempre referenciados a duas LTs, no que se refere ao comprimento total, inicial e final, de forma a situá-lo em cada LT. As impedâncias dos trechos paralelos possuem ainda os valores de impedância em PU e %, corrigidos para uma base comum entre as duas LTs.

### 3.3 Sistematização de Processos

A criação de grupos de acesso tem como vantagem a concentração das informações interessantes à determinado grupo no IMPEDAN e não em e-mails pessoais, de forma que o grupo estará atualizado. Como o e-mail pessoal continua sendo o principal canal de comunicação, quando um comunicado é realizado é possível enviar as informações para os e-mails dos usuários de determinado grupo de acesso. Essa função é opcional e tem como objetivo atender situações de grande importância ou urgência.

Destacamos aqui dois processos que foram sistematizados no IMPEDAN. O primeiro é a solicitação do cálculo dos parâmetros elétricos e o segundo trata-se da integração com o setor de planejamento. O planejamento necessita de insumos básicos para realização das simulações pertinentes à área, sendo dois deles disponibilizados pelo IMPEDAN. Um destes insumos, são os parâmetros elétricos das LTs e o outro as resistências elétricas das malhas de aterramento das subestações.

O planejamento fornece o curto-circuito futuro nas barras das SEs, um insumo importante para atividades do projeto, como por exemplo dimensionamento de cabos para-raios das LTs, dimensionamento de malhas das SEs e o aterramentos especial de estruturas. Os atributos referentes aos dados de curto-circuito nas barras e resistência das malhas de aterramento pertencem à entidade Subestação. A Figura 5 mostra como essas informações são disponibilizadas no IMPEDAN.

**Detalhes da Subestação**

Código(\*):  Nome(\*):

Descrição:

Resistividade do Solo - Primeira camada ( $\Omega \cdot m$ ):

Resistividade do Solo - Segunda camada ( $\Omega \cdot m$ ):

Resistividade do Solo - Profundidade (m):

Resistencia de Aterramento ( $\Omega$ ):

Latitude:  Longitude:

**Curto Circuitos**

		Potência de curto-circuito monofásico (MVA)		Potência de curto-circuito trifásico (MVA)	
Ano dos níveis de curto	Tensão	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
2020	13,80	265,00	-88,00	248,00	-87,00
2020	138,00	796,00	-76,00	1207,00	-75,00

Figura 5 – Registro de uma subestação no IMPEDAN

Os curto-circuitos futuros nas barras das SEs são constantemente atualizados, de acordo com os cenários que surgem, como entrada novas unidades geradores.

## 4.0 - FUNCIONALIDADES FUTURAS

As entidades destacadas na Figura 3, são funcionalidades que ainda não estão complementamente integradas ao IMPEDAN, mas que já são utilizadas para alimentação do banco. Algumas delas existem em versões anteriores do IMPEDAN, com por exemplo os Padrões de Impedância. Outras são utilizadas em programas fora do ambiente corporativo, mas que fazem parte do projeto IMPEDAN. Dentre essas entidades destacam-se as Impedância Otimizadas (resultado do Projeto de Pesquisa 192, ANEEL) e comunicação com base de dados georeferenciadas.

### 4.1 Padrões de Impedância

Os padrões de impedância é uma importante funcionalidade do IMPEDAN, existente desde a primeira versão do banco. Nela os usuários conseguem estimar valores preliminares dos parâmetros de uma LT que ainda não foi projetada. Esses padrões permitem que os setores do planejamento considerem nas análise de fluxo de potência, LTs de diferentes características, de forma a auxiliar a determinação da melhor alternativa para expansão do



sistema. A Figura 6 ilustra a interface básica que os usuários tem acesso.

Consulta Padrão de Impedância	
Tipo:	<input checked="" type="radio"/> PU (ASPEN/PSSE) <input type="radio"/> % (ANAREDE)
Tensão:	138 kV
Condutor:	LINNET
Comprimento:	15.7 km
<input type="button" value="Calcular"/>	

Figura 6 – Padrões de Impedância

Condutores especiais que operam em temperaturas elevadas (acima de 100 °C) são previamente analisados e inseridos na Banco de Dados de Condutores, de forma a disponibilizar para todos setores opções não convencionais e eficiente para transmissão de energia, auxiliando as tomadas de decisão na área de planejamento e operação.

#### 4.2 Impedâncias Otimizadas

A base de dados do IMPEDAN mostrou-se bastante apropriada para exibição dos resultados do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, P&D192 (projeto CEMIG/ANEEL). Seguindo a filosofia dos Padrões de Impedância, o IMPEDAN apresentará os resultados em ambiente exclusivo para o P&D192, em que as variáveis de entrada, já cadastradas no IMPEDAN, poderão ser utilizadas para consulta dos resultados de impedâncias ótimas, dada uma silhueta de torre e configuração de condutores.

O P&D 192, teve como o principal produto um programa que gera resultados de configuração dos feixes de uma dada linha de transmissão que minimizem as indutâncias da mesma, observando restrições de campos elétrico, magnético, rádio interferência e ruído audível no limite da faixa de servidão. As variáveis de decisão são as coordenadas x e y dos cabos condutores e para-raios. Ao final de sua execução, o programa gera um arquivo que contém as soluções ótimas encontradas. Os dados estão organizados na forma de valores de coordenadas x e y.

#### 4.3 Integração com plataforma georeferenciada

Um dos fatores que o torna cálculo dos parâmetros mais complexo é a indentificação de trechos paralelos. Tais informações costumam ser levantadas de forma segmentada, distribuída em vários documentos, o que torna o processo bastante trabalhoso. A CEMIG dispõe de uma plataforma georeferenciada, o Geotrans, que contém informações do traçado e das estruturas, além de outros dados sobre as LTs.

Ao relacionar os marcos finais e iniciais de cada trecho do IMPEDAN com as respectivas estruturas no Geotrans será possível listar os trechos paralelos a uma determinada LT, estabelecendo previamente critério como distância entre eixos, percentual do comprimento do trecho paralelo em relação à linha, ângulo de aproximação ou cruzamento dos paralelismos.

### 5.0 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio de toda equipe PE/LS, TI CEMIG e TTY pelo empenho e dedicação, sem o qual não seria possível a realização do projeto IMPEDAN,

### 6.0 - CONCLUSÃO

O IMPEDAN há mais de 20 anos atende às demandas da CEMIG, no que se refere aos parâmetros de LTs e tido como uma importante ferramenta, atendendo prontamente os setores de planejamento e operação. Para manter sua confiabilidade, necessitada ser dinâmico, no intuito de adaptar-se às necessidades do sistema em expansão.

O desenvolvimento da última versão do IMPEDAN teve como principal objetivo estabelecer um modelo relacional coeso, afim de impedir inconsistências de informações nas base de dados, evitando assim o volume de retrabalho que exige um grande esforço da equipe responsável. Além do conceito primitivo, a reestruturação do sistema buscou integrar atividades inerentes ao processo e sistematizá-las de forma a garantir melhor confiabilidade e rastreabilidade das informações.

Novas etapas estão previstas para serem realizadas no IMPEDAN, aproveitando-se da base de dados já cadastrada e da possibilidade de interação com outros sistemas, incluindo programas de cálculo de engenharia.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FUCHS, R. D. "TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA" – Linhas Aéreas – Vol. II Rio de Janeiro 1977;
- (2) Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above. 2 ed.: Electric Power Research Institute, 1982;
- (3) Elmasri, R. A; Shamkant, N. - Fundamentals of Database Systems, 5th Edition;

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**João Henrique Magalhães Almeida.** Nascido em 1985 em Alvinópolis, MG. Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2009. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações a serviço da CEMIG Distribuição pela PROEL Engenharia LTDA.



**Edino Barbosa Giudice Filho.** Mestrado em Engenharia Elétrica (UFMG) e Doutorando em Eng. Elétrica (UFMG) Atualmente trabalha como engenheiro de projetos de sistemas elétricos (CEMIG) com as atividades de estudos elétricos aplicados a linhas e subestações e em pesquisa e desenvolvimento nestas áreas, atuando como Gerente de projeto de pesquisa.



**Sandro de Castro Assis.** Nascido em 1980 em Coronel Fabriciano, MG. Engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2004 e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2006. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da Cemig Distribuição. Doutrando em Eng. Elétrica pela mesma instituição. Gerente de projeto de pesquisa.



**Paulo José Clebicar Nogueira.** Nascido em 1968 em Caxambu, MG. Engenheiro eletricista pela PUC/MG em 1996 e mestre em engenharia elétrica pela PUC em 2002. É Gestor de Empreendimentos de Alta Tensão da Cemig Distribuição.