



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

BR/GPL/26  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - VII**

**GRUPO DE ESTUDO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL**

**PROJETO MAIS SUBESTAÇÕES MENOS REDES  
UMA ESTRATÉGIA INOVADORA PARA A EXPANSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DA CEMIG-D**

**Tiago Vilela Menezes (\*)**

**Beline Q. A. Fonseca**

**Blunio E. da Silva**

**Bruno H. A. Catão**

**Cemig Distribuição S.A. – CEMIG-D**

**RESUMO**

Este artigo apresenta uma síntese da metodologia e dos principais resultados práticos do projeto Mais Subestações Menos Redes, considerado uma estratégia inovadora para a expansão do sistema CEMIG-D, tendo em vista seu propósito, metodologia e resultados. Sua motivação foi o desafio de melhorar, no médio e longo prazo, a infraestrutura de energia elétrica compatível com a ambição de crescimento diversificado do estado de Minas Gerais, incluindo regiões ainda com baixo consumo e distantes das fontes de suprimento, garantindo modicidade tarifária e rentabilidade do negócio frente às pressões atuais do atendimento com menores prazos e custos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Planejamento, Estratégia, Área de Influência, Baixa Densidade de Carga, Padrões Não Convencionais

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Em regiões com baixa densidade de consumo e distantes das fontes de suprimento, a viabilidade técnico-econômica da distribuição de energia elétrica torna-se mais desafiante, visto que a obrigação contratual de garantir o fornecimento adequado nestas áreas exige a implantação de obras de maior porte e com maiores investimentos que, em certos casos, não oferece a contrapartida da rentabilidade mínima no tempo desejado.

Boa parte da área de concessão da CEMIG-D, que atende quase a totalidade do estado de Minas Gerais, possui estas características de carga (distante e rarefeita), apresentando-se um desafio constante planejar e definir obras com a rentabilidade requerida. A CEMIG-D possui uma das maiores áreas de concessão, 567 mil km<sup>2</sup>, e o maior número de consumidores, 7,4 milhões, entre as distribuidoras do país, dispersos não uniformemente, e o 17º lugar no consumo médio/cliente entre as 24 distribuidoras com mais de 1 milhão de clientes (1).

Neste cenário, iniciou-se em 2011, o projeto Mais Subestações Menos Redes (2), considerado inédito no planejamento da expansão da CEMIG-D tendo em vista seu propósito, metodologia prática e ganhos operacionais, bem como pela sua abrangência na área de concessão. O projeto consistiu em desenvolver uma nova metodologia de estudos de expansão, para se propor, no médio e longo prazo, uma configuração futura do sistema elétrico com maior número de SE e menor extensão de redes. Uma das conclusões do trabalho, que se refere à necessidade de reduções nos custos de implantação de subestações e linhas de distribuição, apresentou-se como o ponto de partida para o estudo de novos padrões construtivos mais simplificados em desenvolvimento na empresa.

**2.0 - SISTEMA DE ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DA CEMIG-D**

**2.1 Indicadores Físicos**

A Figura 1 mostra o sistema elétrico de subtransmissão da CEMIG-D, referente ao ano de 2012.

(\*) Endereço Av. Barbacena, n° 1200 – 8º Andar - Ala B2 – CEP 30.190-131 Belo Horizonte, MG, – Brasil  
Tel: (+55 31) 3506-3299 – Fax: (+55 31) 3506-2948 – Email: tmenezes@cemig.com.br

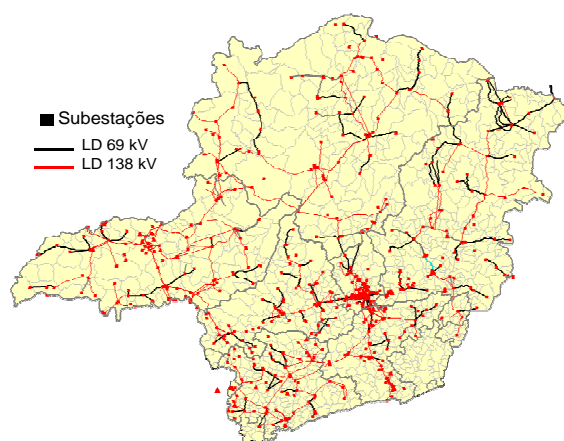


FIGURA 1 – Sistema Elétrico de Subtransmissão CEMIG-D

As regiões Norte e Leste apresentam um sistema elétrico mais esparsos em função das características da carga.

## 2.2 CEMIG-D e Outras Empresas

A Tabela 1 apresenta uma comparação da extensão média dos troncos de rede de MT da CEMIG-D e de outras empresas. Geralmente, quanto mais subestações em uma área, menor a extensão das redes troncos associadas.

TABELA 1 – CEMIG-D e Outras Empresas (3)

Malha	Área de Concessão ~ km <sup>2</sup>	km médio – Tronco Rede MT
CEMIG-D	567.000	228
Empresa A	120.000	117
Empresa B	563.000	96
Empresa C	903.000	88
Empresa D	335.000	50
Empresa E	328.000	47
Empresa F	195.000	15
Empresa G	103.000	8
<b>MÉDIA</b>	<b>287.000</b>	<b>81</b>

Observa-se grandes diferenças no comprimento médio do tronco da rede entre as empresas

## 3.0 - DESENVOLVIMENTO

### 3.2 Abrangência e Base de Dados

O projeto envolveu quase a totalidade da área de concessão da CEMIG-D, conforme se verifica na Tabela 2.

TABELA 2 – Abrangência do Projeto (ref. 2012)

Atributo	Área de Concessão-CEMIG-D	Abrangência do Projeto	%
Área (mil km <sup>2</sup> )	~ 558	~ 545	99
Municípios	774	732	95
km de Rede de MT	~385.000	~ 365.000	95
Nº de Alimentadores	~1.782	1.400	75
Subestações abaixadoras	396	345	87

A base de dados utilizada foi o sistema elétrico de AT (subtransmissão) e MT georreferenciado da Cemig D, denominado G-DIS.

### 3.3 Metodologia

A metodologia desenvolvida buscou, através de aproximações de cálculos elétricos previamente validados, simplificar o modelo de cálculo adotado nos estudos tradicionais, que são minuciosos e consomem muito tempo, inviabilizando a abrangência da análise necessária no projeto. Não foram exploradas otimizações das soluções de expansão, abordados por exemplo, em métodos heurísticos como a busca tabu (4).

#### 3.3.1..Metodologia do Projeto x Metodologia Tradicional

A Tabela 3 faz uma comparação entre a Metodologia do Projeto e a Metodologia Tradicional de Planejamento

TABELA 3 – Metodologia do Projeto x Metodologia Tradicional

Item	Metodologia do Projeto	Metodologia Tradicional
Abrangência	99% da área de concessão	Por Microrregião (5% concessão)
Função Objetivo	Custo Global: Obras, Perdas, O&M	Custo Global: Obras, Perdas, O&M
Restrições -Multicritérios	Limites de Equipamentos/Qualidade	Limites de Equipamentos/ Qualidade
Cálculos Elétricos	Algoritmo Próprio – “Poda de Redes”	Fluxo de Potência e Curto-Circuito
Proposta de Novas SE	Áreas Limites	Comparação Individual por Alternativa
Visão Elétrica	Global e Georreferenciada	Local e Não Georreferenciada
Tempo de Execução	6 meses	3 anos

#### 3.3.2..Etapas do Projeto

O projeto foi elaborado por Etapas conforme mostra o fluxograma da Figura 2, destacando-se nos retângulos os novos procedimentos. Os destaques das etapas estão apresentados nos itens seguintes.

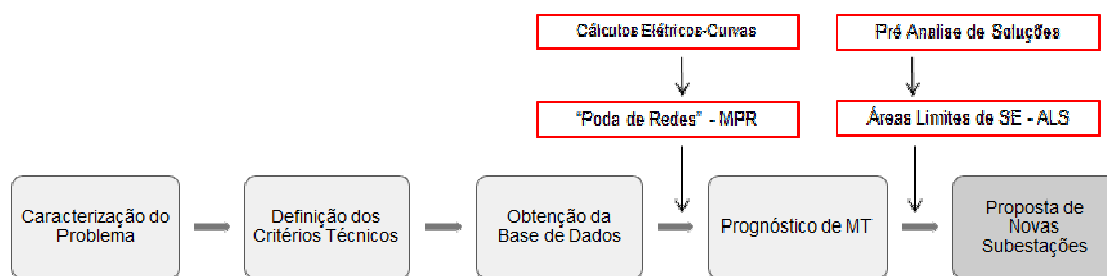


FIGURA 2 – Etapas Básicas do Projeto

#### 3.3.3..Caracterização do Problema de Novas Subestações

Uma nova subestação geralmente é proposta em função da impossibilidade de ampliação de SE existentes, crescimento de carga em direção oposta à SE existente e esgotamento do sistema de MT sem solução viável de rede. No projeto, foi considerado o Esgotamento do sistema MT.

Uma nova abordagem para a análise e definição de subestações foi dada através de 2 (dois) novos parâmetros, que se constituíram como a base da metodologia do projeto.

- Distância mínima (km) entre subestações: Área de Influência de SE - Raio Ideal (RI) e Raio Real (RR)
- Carga mínima (MVA) para implantação de subestações: Áreas Limites - AL

Diferentemente do método tradicional onde se estuda ano a ano progressivamente, as análises foram feitas para o último ano do horizonte (2025). A Figura 3 ilustra esta nova abordagem, mostrando esquematicamente exemplos de violação dos parâmetros na localização e indicação de uma subestação.

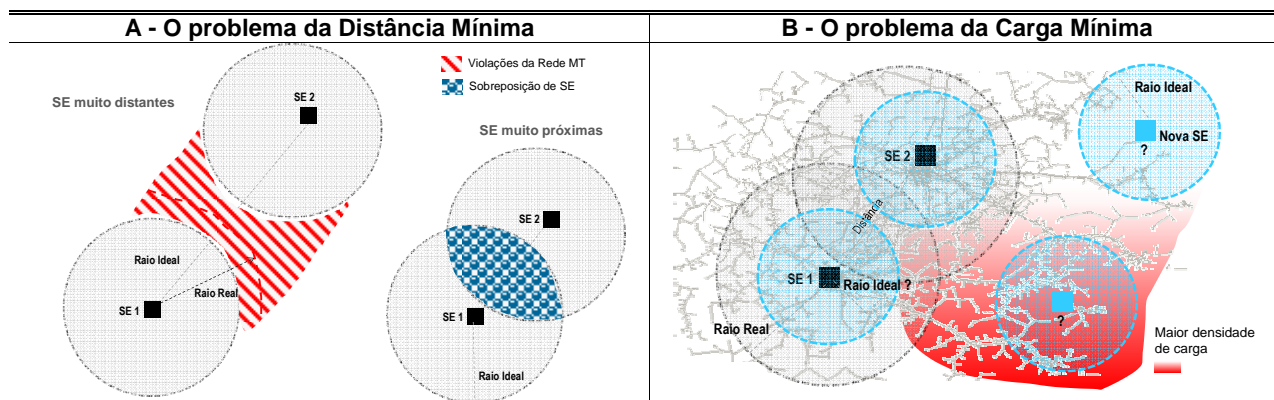


FIGURA 3 – Condições de Contorno Básicas do Projeto

Enquanto a violação da “Distância Mínima” (áreas hachuradas) significa falta ou excesso de subestações, ocasionando, respectivamente, violações técnicas na rede de MT ou desperdício de recursos (sombreamento de subestações), a violação do parâmetro “Carga Mínima” significa a indicação de uma subestação em local sem porte mínimo de carga (área mais clara) do ponto de vista econômico.

### 3.3.4. Definição dos Critérios Técnicos

Foram utilizados critérios técnicos de MT aplicados nas Etapas “Prognóstico de MT” e “Propostas de Novas Soluções de SE” e de AT aplicados na Etapa “Propostas de Novas Soluções de SE”, conforme Tabela 4.

TABELA 4 – Critérios Técnicos de MT e AT

Por alimentador de MT	Sistema de AT (Soluções)
Tensão Urbana $\geq 0,97$ p.u., Rural $\geq 0,95$ p.u.	$1.03 \text{ p.u.} \leq \text{Barra de MT} \leq 1.05 \text{ p.u.}$
Carregamento $\leq 80\%$ capacidade nominal	Carregamento de SE $\leq 100\%$ capacidade nominal
Perdas ôhmicas $\leq 10\%$ do carregamento	Carregamento de LD $\leq 100\%$ capacidade nominal
Corrente de curto circuito fase-terra $\geq 75\text{A}$	
Nº de Clientes $\leq 5.000$	

Os critérios adotados seguem as diretrizes e limites de qualidade de antecedimento da ANEEL definidos em (5) e (6). O sistema de subtransmissão de retaguarda não foi diretamente simulado no projeto, mas seu desempenho, obtido em estudo anterior, foi utilizado como orientação para a conexão das novas subestações.

### 3.3.6. Prognóstico de MT – Método Poda de Redes (MPR)

Para a obtenção do Raio Ideal e Real das subestações, foi elaborado o Prognóstico de MT em 2013 e 2025, utilizando-se o Método de Poda de Redes – MPR, com algoritmo específico que realiza automaticamente cálculos elétricos, identifica as violações e “corta” partes da rede até que o sistema remanescente se torne novamente adequado. Os trechos de rede “podados” formam as Áreas de Análises onde são estudadas as soluções de expansão em ambiente GIS.

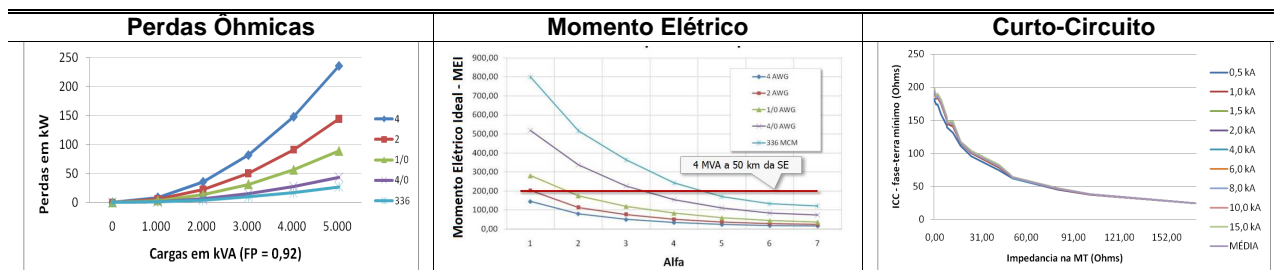
A média do comprimento dos alimentadores troncos remanescentes é o Raio Ideal da subestação, dando ao planejador, a idéia do tamanho da área de influência da SE. O Raio Real da Subestação é a média do comprimento dos alimentadores antes da poda. Ambos indicam a Área de Influência de SE.

Os dados de entrada do Método foram funções matemáticas de “Curvas Elétricas”, geradas através de simulações prévias da rede MT. Neste caso, foram considerados 35 tipologias de rede, correspondendo à 5 (cinco) diferentes condutores (4 AWG, 2 AWG, 1/0 AWG, 4/0 AWG e 336 MCM) e 7 distribuições de carga (alfa) ao longo do alimentador, conferindo representatividade ao modelo.

#### a. Curvas Elétricas - Perdas Ôhmicas, Curto-Circuito e Momento Elétrico

A Tabela 5 mostra as curvas elétricas de Perdas Ôhmicas, Momento Elétrico e Curto-Circuito utilizadas.

TABELA 5 – Exemplos de Curvas Elétricas



O Momento Elétrico (carga x distância) foi utilizado para calcular os níveis de tensão ao longo da rede, e varia com as distribuições de carga (Alfa) e tipo de cabo condutor. O “Momento Elétrico Ideal” (MVA x km) indica a capacidade máxima de transporte do alimentador considerando suas características. O Momento Elétrico Real (MER) foi obtido considerando os dados reais da rede, podendo ser superior ou inferior ao MEI.

### 3.3.7...Proposta de Novas Subestações

Esta etapa teve como objetivo a indicação referencial das novas subestações nas Áreas de Análises.

#### a. Sombreamento de SE

Para evitar o “sombreamento” de subestações, utilizou-se o parâmetro Raio Ideal (RI). Os problemas identificados na rede dentro deste raio foram considerados solucionáveis com reforços de MT. Adotou-se no estudo das Áreas de Análises, o valor de 25 km de RI, tendo em vista os resultados encontrado no Prognóstico. Os raios de influência das novas SE deveriam avançar o mínimo possível na área das subestações existentes.

#### b. Área Limite de Subestações - ALS

O procedimento de Área Limite de Subestações utilizado para obter os valores do parâmetro “Carga Mínima”, foi a alternativa encontrada para simplificar as tradicionais comparações técnicas e econômicas, municiosas e morosas. Criaram-se modelos prévios de soluções de expansão que foram aplicados nas Áreas de Análises. Foi realizada a “Pré Análise de Soluções”, que consistiu na simulação de alternativas de obras para diferentes valores de carga inicial das Área de Análise, considerando um horizonte de crescimento de mercado 10 anos. O quadro da Figura 4 mostra um resumo das opções de alternativas utilizadas.

Tipos de Obras – Simulação das Pré Análises			Subestação Modular	
Carga - ano 0 (MVA)	Carga - ano 10 (MVA)	Soluções de AT (Nova SE)		
2,0	3,1	Padrões Atuais		
3,0	4,7	69 kV Tradicional	69 kV Singela	Novo Padrão (Em estudo)
4,0	6,2	138 kV Tradicional	138 kV Singela	69 kV Modular
5,0	7,8	LD Associada Cabo 4/0 AWG ou 336 MCM - 40 km		
6,0	9,3	N x Rede MT Associada - Aérea - Cabo 4/0 AWG - 10 km e Alfa (α) - 4		
6,0	9,3	Soluções de Rede		
7,0	10,9	N x Rede Aérea - Cabo 4/0 AWG		
8,0	12,4	35 km e Alfa (α) - 2		
10,0	15,5	Obra de AT associada (5º ano)		
15,0	23,3	Ampliação de SE Existente		
20,0	31,1			

FIGURA 4 – Pré Análise de Soluções de AT e MT e Subestação Modular

Foram feitas simulações de diferentes Tipos de Obras, com valores típicos de distâncias e distribuição de cargas. Destaca-se a solução não convencional, indicada como “subestação modular”, simulada referencialmente com custos 25% inferiores aos custos das subestações singelas (7) (8), em estudo na CEMIG-D. O resultado das simulações foram curvas de Valor Presente do Custo Global apresentadas na Figura 5, através das quais foi possível, de forma relativamente rápida e simples, a indicação das soluções para cada Área de Análise.

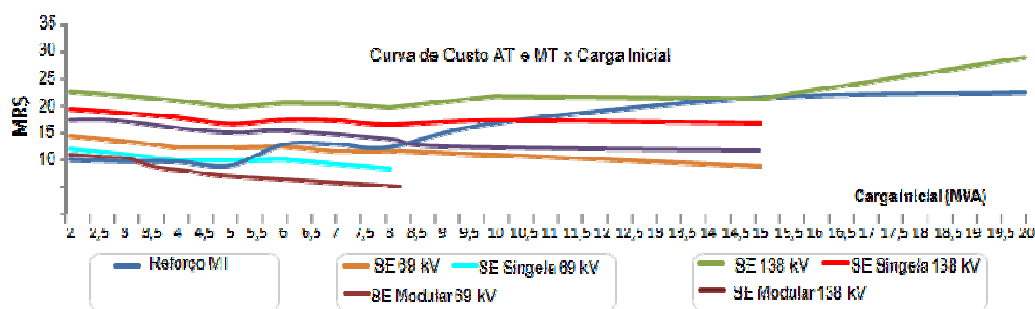


FIGURA 5 – “Carga Mínima” – Custo Global x Carga Inicial

Por exemplo, a curva de “Reforço MT” mostra a evolução temporal média do custo global de atendimento de uma área, feito exclusivamente por reforços na rede de MT. As demais curvas mostram esta a evolução dos custos para as soluções de subestações, considerando os diversos tipos de padrões.

O ponto de cruzamento das curvas de Subestações com a de “Reforço de MT” indica a “Carga Mínima” referencial, a partir da qual justifica-se economicamente a implantação de uma nova subestações. O custo descendente das soluções de AT deve-se à maior redução de perdas ôhmicas quando a carga inicial é maior, gerando a redução relativa do custo global.

### 2.3 Exemplo de Definição de Nova Subestação

Finalmente, definidos os parâmetro “Raio Ideal” e “Carga Mínima”, as equipes de planejamento aplicaram a metodologia em quase todo o sistema elétrico da CEMIG-D, em menos de 3 semanas, sendo considerado principalmente a experiência das equipes de planejamento.

A Figura 6 mostra a visão inédita contendo de forma simulatânea e georreferenciada, o Prognóstico com as violações dos critérios de MT e as Subestações existentes com os Raios Ideais, o que possibilitou em um mesmo plano a criação das Área de Análise indicada para implantação de nova subestação

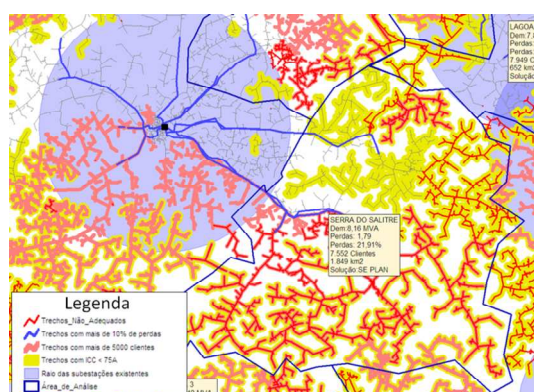


FIGURA 6 – Área de Análise de Subestação – 2025 (ex Serra do Salitre)

### 2.3 Resultado Final

A Figura 7 mostra o mapa da área de concessão da CEMIG-D com a proposta referencial das novas subestações no horizonte até 2025, com um resumo quantitativo por regional.



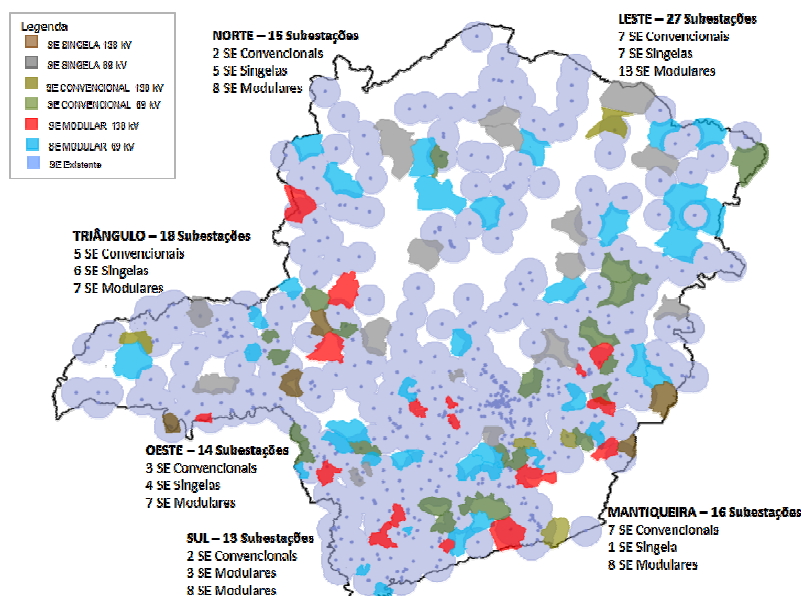


FIGURA 7 – Novas Subestações Propostas – 2025

No horizonte até 2025, foram propostas 46 (quarenta e seis) subestações de padrões tradicionais, já incluindo a “SE Singela” cujos arranjos e custos já são inferiores ao padrão convencional.

Como solução não convencional para a expansão com Mais subestações Menos Redes, estão indicadas mais 51 (cinquenta e uma) novas subestações designadas de “Modular”, cuja viabilidade de implantação é objeto de estudo em desenvolvimento na CEMIG-D.

Destacam-se a região Leste com a maior indicação de subestações e a a região Norte, onde 50% das subestações propostas são do tipo modular como esperado em função da carga rarefeita. Os números apresentados são passíveis de alterações após o detalhamento das obras em outros estudos de planejamento.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Do ponto de vista metodológico, verifica-se que a nova estratégia para a expansão do sistema elétrico trouxe vantagens importantes sobre o método tradicional de planejamento, não devendo substituí-lo e sim auxiliá-lo. Dentre os benefícios apresentados, destaca-se ganhos operacionais pela simplificação do processo com resultados práticos validados, e ganhos de qualidade técnica em função, principalmente, da padronização das análises e da possibilidade inédita de visão global e georreferenciada do desempenho elétrico em toda a área de concessão.

Do ponto de vista prático, o projeto atendeu seu objetivo maior, que foi indicar uma melhor infraestrutura elétrica referencial do sistema elétrico com Mais Subestações e Menos Redes. Foi possível com os resultados, evidenciar a necessidade de novas alterações nos atuais padrões para garantir ainda mais a viabilidade desta infraestrutura, sendo a referência inicial do estudo de padrões construtivos mais simplificados em desenvolvimento na empresa.

Como contribuição ao setor elétrico, espera-se que os resultados alcançados possam estimular outros estudos similares para melhorias na infraestrutura elétrica do país, com sustentabilidade econômica, principalmente em regiões em fase inicial de crescimento econômico. Para a Transmissão, esta visão global do sistema de distribuição permite uma análise mais abrangente nos estudos de ampliações dos pontos de rede básica de fronteira, bem como para definição de novas fontes regionais para a Subtransmissão via o sistema de Transmissão.

Os próximos passos referem-se à automatização e otimização das soluções de subestações encontradas, objeto do projeto de pesquisa P&D ANEEL D 370 “Desenvolvimento de uma ferramenta computacional de Otimização Multicritério para Localização Estratégica de Novas Subestações considerando a Projeção Espacial da Carga”.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL, 2012 – Informações Gerenciais ANEEL 2012 (<http://rad.aneel.gov.br/ReportServerSAD>)
- (2) CEMIG-D, 1 – Projeto Mais Subestações Menos Redes, 02.111-PE/PL-2151, 2012
- (3) NOTAS TÉCNICAS ANEEL – Cálculos de Perdas Técnicas 2º Ciclo de Revisão Tarifária, 2008
- (4) BARRETO, L. HAFFNER. S, PEREIRA. A.L, PEREIRA F. L. - Modelo multiestágio de otimização para o planejamento da expansão de sistemas de distribuição, 2006
- (5) PRODIST MÓDULO 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição, Resolução Normativa ANEEL 543, 04/2013;
- (6) PRODIST MÓDULO 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Resolução Normativa ANEEL469, 02/2012;
- (7) CEMIG, 2 – 02.111-PL- 425 - Custos de Referência de Subestações e Linhas de Transmissão e Subtransmissão, 12/2004
- (8) CEMIG, 3 – E.D 1.7 - Padrões de Subestações da CEMIG-D, 04/2010

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Beline Quintino de Araújo Fonseca

Alvarenga/Minas Gerais, 1961

Graduação: Instituto de Tecnologia de Governador Valadares - Engenharia Mecânica: 1984;

Pós Graduação:

Universidade Federal de Minas Gerais – Especialista em Estruturas - 1991

Universidade Federal de Minas Gerais – Mestre em Engenharia Mecânica - 2002

Universidade Federal de Minas Gerais - Doutor em Engenharia Mecânica - 2009

Blunio Elias da Silva

Ibiá/Minas Gerais, 1966

Graduação: Faculdade Politécnica de Uberlândia – FPU – Engenharia Elétrica – 2008

Bruno Hercílio de Andrade Catão

Belo Horizonte/Minas Gerais, 1980

Graduação: CEFET-Belo Horizonte/MG – Engenharia Elétrica - 2007

Pós-graduação: IBS - FGV - Belo Horizonte – 2012

Tiago Vilela Menezes

Belo Horizonte/Minas Gerais, 1978

Graduação: Universidade Federal de Minas Gerais: Engenharia Elétrica – 2000

Pós-graduação:

Universidade Federal de Minas Gerais – Mestre em Engenharia Elétrica - 2007

MBA Gestão Executiva – IBMEC Belo Horizonte/MG - 2008