

Heuristic Methodology for Prioritizing Preventive Maintenance Actions in the Electric Power Distribution Networks

A.U. Antunes, A. M. Maciel, A. Meffe, D. Takahata, F. L. Lange – Daimon Engenharia e Sistemas
G. H. N. Panceri, P. R. F. H. da Rocha – EDP Escelsa

Abstract-- The shortage of management tools and maintenance control tools may cause various undesirable consequences to the utilities, such as difficulties in prioritizing activities and spending financial resources with unnecessary expenditures, among others.

This work is the result of a Research and Development Project carried out by Daimon Engineering & Systems, in partnership with two of EDP Energy Group companies (EDP Bandeirante and EDP Escelsa). Altogether these companies supply nearly 2.5 million customers in Brazil.

Index Terms—preventive maintenance, prioritization of measures, reliability indexes, safety.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta uma metodologia que é baseada em algoritmo genético e é capaz de resolver o problema de alocação de recursos de manutenção, proporcionando ao usuário do software, a lista mais adequada de medidas no sistema elétrico, de modo que, após as ações de manutenção correspondentes, ganhos significativos podem ser alcançados, tais como acidentes pessoais e perdas materiais evitadas, melhores indicadores de confiabilidade (DEC e FEC) e favorecer a imagem da concessionária frente aos consumidores. Assim sendo, este artigo apresenta um dos produtos do projeto do P&D PD_0380_0004/2010 com a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. O resultado final do projeto foi o desenvolvimento da ferramenta computacional denominada *GeoSigma*, elaborada pela Daimon Engenharia, empresa executora do projeto, em parceria com as empresas de distribuição do Grupo EDP (Escelsa: empresa

This work has been the result of a R&D Project of ANEEL – Brazilian Electricity Regulatory Agency.

A. U. Antunes is with Daimon Engineering & Systems, São Paulo, SP, Brazil (e-mail: alden@daimon.com.br).

A. M. Maciel is with Daimon Engineering & Systems, São Paulo, SP, Brazil (e-mail: alessandro.maciell@daimon.com.br).

A. Meffe is with Daimon Engineering & Systems, São Paulo, SP, Brazil (e-mail: andre.meffe@daimon.com.br).

D. Takahata is with Daimon Engineering & Systems, São Paulo, SP, Brazil (e-mail: dario@daimon.com.br).

F. L. Lange is with Daimon Engineering & Systems, São Paulo, SP, Brazil (e-mail: lange@daimon.com.br).

G. H. N. Panceri is with EDP Escelsa, Serra, ES, Brazil (e-mail: geraldopanceri@edpbr.com.br).

P. R. F.H. da Rocha is with EDP Escelsa, Serra, ES, Brazil (e-mail: paulo.rocha@edpbr.com.br).

proponente, e Bandeirante: empresa cooperada), que deram o respectivo suporte financeiro.

O outro produto deste projeto de P&D é a metodologia heurística proposta no presente artigo, que fundamenta o *software GeoSigma* e cujas premissas básicas orientaram o desenvolvimento dos trabalhos:

a) Não foram objetos deste projeto, mudanças na periodicidade dos procedimentos de inspeção visual e instrumental, bem como podas periódicas, que geram as respectivas intervenções na rede elétrica. A periodicidade dos procedimentos de inspeção e manutenção está definida em [1], a qual foi fielmente observada pela Daimon Engenharia para os propósitos deste P&D. O principal alvo desta metodologia de priorização foi “como” e “onde” concentrar os esforços de manutenção preventiva na rede aérea de distribuição, buscando como meta minimizar os potenciais riscos que possam se causados pela rede elétrica e melhorar os indicadores de confiabilidade, tendo em vista um certo montante disponível de recursos orçamentários.

Ressalte-se que em metodologias atuais que utilizam conceitos de RCM (*Reliability Centered Maintenance*), ou seja, manutenção baseada em confiabilidade, a manutenção preditiva e preventiva sistemática, baseadas em intervalos fixos de tempo, não é observada. A intervenção só ocorre devido à possibilidade de falha de um determinado componente.

b) Convém ressaltar também que, esta metodologia contempla como dados de entrada para o módulo de priorização, as informações sobre a avaliação dos estados físico e operacional do sistema elétrico através dos métodos direto e indireto, conforme apresentado em [2].

Além disso, as ordens de serviço de manutenção preventiva têm uma classificação [1], de acordo com a sua prioridade, como se segue:

- Emergentes (medidas imediatas);
- Urgentes (dentro de uma semana);
- Prioritárias (medidas dentro de três meses);
- Programáveis (medidas dentro de um ano);
- Informativo (medidas não antes de três anos).

Adicionalmente, a fim de se evitar no processo, a entrada de notas de manutenção rotuladas como sendo emergentes (medidas imediatas), no processo de sorteio do Algoritmo Genético, as mesmas serão realizadas compulsoriamente. As demais notas serão contempladas pelo Algoritmo Genético, que levará em conta a influência das variáveis do alimentador (FEC / DEC, compensações pecuniárias, e ocorrência de piscadas do alimentador), configuradas pelo usuário do software, de acordo com a ponderação estipulada. A solução (conjunto de notas de serviço de manutenção) também dependerá do orçamento disponível.

II. METODOLOGIA

O problema da hierarquização de ações de manutenção preventiva em redes de distribuição de energia é um problema de otimização que pode incluir variáveis inteiras e contínuas, conforme levantamento de dados apresentado em [2]. Neste problema, busca-se a priorização da ação a ser tomada, em diferentes horizontes (curto, médio e longo prazo) e as respectivas listagens de materiais/equipamentos substituídos, bem como os custos de mão-de-obra.

Portanto, a escolha adequada dos tipos de dispositivos e de suas localizações e ajustes não é tarefa trivial, sendo o problema de análise combinatorial, variáveis inteiro-mista, restrições não lineares e múltiplos objetivos.

Dentre os artigos técnicos pesquisados, [3] apresenta uma solução para o ranqueamento das ações de manutenção preventiva, a partir de ações preditivas de poda de árvores, inspeção visual detalhada e instrumental para alimentadores, e periódica para os equipamentos, que resultam em ações corretivas (reparos) nos componentes da rede de distribuição onde foram constatadas irregularidades pelos inspetores de rede. Uma vez que todas estas inspeções candidatas possuem um índice de mérito atribuído, as mesmas são priorizadas com base em um modelo de otimização. A priorização é determinada através de um método de programação matemática (programação inteira), no qual a função objetivo visa a maximização do índice de mérito global, levando-se em consideração atributos tais como, o risco de desenvolvimento de um defeito, a importância estratégica da área inspecionada, e a densidade de consumidores, estando a mesma sujeito às restrições orçamentárias.

Um outro artigo técnico apresenta uma aplicação de um modelo híbrido de otimização [4], baseada em Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm*) e Escalada da Montanha (*Hill Climbing*) [5], procurando resolver a priorização da manutenção em alimentadores devido à interferência da vegetação nas redes de distribuição. Este algoritmo determina “quando” e “onde” realizar a manutenção, sujeito às restrições de confiabilidade, custo e disponibilidade de equipes.

A. Considerações Iniciais

Direcionar a equipe de manutenção da empresa nos seus serviços envolve conhecimento técnico específico, além de considerar variáveis resultantes de inspeções, e/ou ainda de variáveis de dados históricos da empresa, como os indicadores de qualidade de energia, idade do equipamento, dentre outras. O propósito em desenvolver um módulo de otimização visando a priorização de recursos de manutenção permite auxiliar o engenheiro na tomada de decisão, baseando-se nas variáveis mais relevantes ao problema.

Os estudos realizados nessa etapa do projeto permitiram analisar alguns diferentes métodos cabíveis ao problema, tais como Algoritmo Genético (AG), Exame de Partícula, Colônia de Formigas e Recozimento Simulado, considerando a sua aplicabilidade em estudos do sistema elétrico e, mais precisamente, na área de manutenção. Optou-se pelo método de otimização conhecido como Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm*), com eventual possibilidade em se utilizar também um modelo híbrido.

Vale ressaltar que outra questão impactante para a escolha do método de otimização está relacionada com a função objetivo do problema, sobre a qual será abordada com maior detalhe mais adiante.

B. Algoritmo Genético

B.1. Princípio do Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (GA – *Genetic Algorithm*) é uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela Biologia Evolutiva de seleção natural de Darwin. Os elementos que definem um estado do problema formam uma população, representados por cromossomos. Estes por sua vez, são representados por genes. Assim, utilizando-se alguns conceitos de hereditariedade como cruzamento, mutação e seleção natural dos mais aptos após algumas gerações, espera-se encontrar as melhores soluções.

A seguir está apresentada uma explanação sucinta sobre o princípio do Algoritmo Genético, utilizando-se a título ilustrativo, a alocação de chaves. Raciocínio análogo pode ser utilizado para a priorização de ações de manutenção preventiva.

A simulação de uma rede de distribuição de energia elétrica pode ser realizada através da representação de uma *string*. Na analogia com a Genética, a *string* seria o cromossomo, enquanto que o *bit*, por sua vez, seria o gene, como mostrado na rede elétrica da Figura 1.

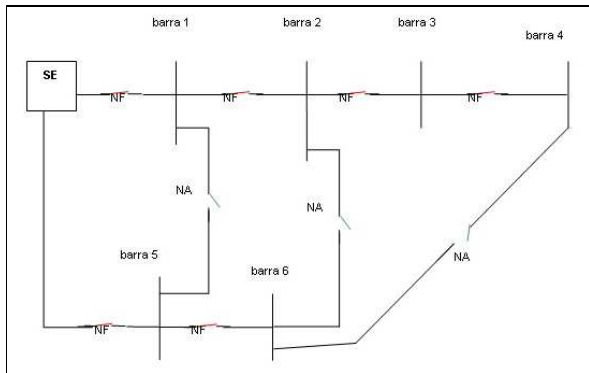


Figura 1: Rede Composta para Exemplo

Uma string é composta por diversos bits, sendo que cada bit pode assumir o valor “0” ou “1”.

Assim, a informação contida no gene corresponde ao tipo de ramo (com chave fechada : $bit = 1$, ou com chave aberta : $bit = 0$), utilizando a codificação binária convencional, conforme mostrado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Representação Binária da Rede Elétrica da Figura 1

Configuração 1		
Ramo	Chave	Bit
SE – Barra 1	Fechada	1
Barra 1 – Barra 2	Fechada	1
Barra 2 – Barra 3	Fechada	1
Barra 3 – Barra 4	Fechada	1
SE – Barra 5	Fechada	1
Barra 5 – Barra 6	Fechada	1
Barra 1 – Barra 5	Aberta	0
Barra 2 – Barra 6	Aberta	0
Barra 4 – Barra 6	Aberta	0

Uma rede de distribuição, desta forma, pode ser representada, para cada configuração, com uma sequência de genes (*bits*) de “0” e “1”.

Parte-se, assim, de uma população inicial de indivíduos (várias configurações contendo chaves abertas e fechadas), sendo que cada configuração é representada por uma sequência de genes (*bits*) de “0” e “1”. Os indivíduos são avaliados através de uma função objetivo, a qual atribuirá ao indivíduo avaliado um índice de mérito. Assim, por exemplo, com um programa de fluxo de potência, poder-se-ia avaliar a performance ou aptidão de cada configuração (indivíduo) em relação a determinados parâmetros, tais como, custo, quantidade de consumidores atingidos, perdas, níveis de tensão, etc.

O processo de seleção, por conseguinte, seleciona os melhores indivíduos da população através de uma função de adaptação (*fitness*), conhecido também como método da roleta, dessa forma, os melhores avaliados terão maior probabilidade de serem selecionados para gerar futuras gerações (novas configurações de redes com chaves de manobra alocadas).

Além dessa seleção por aptidão dos indivíduos, o processo de elitismo também garante que a melhor solução encontrada

por geração sempre estará presente na geração futura, no qual um indivíduo selecionado é substituído pelo melhor indivíduo da geração anterior de forma aleatória.

B.2 Metodologia do Algoritmo Genético para a Escolha de Soluções

O Algoritmo Genético se baseia em uma análise combinatória, na qual se busca uma solução otimizada. O princípio básico do Algoritmo Genético é a adaptação da população conforme a herança de bons genes das gerações anteriores, sendo que as boas características dos indivíduos serão passadas para as gerações futuras, conforme o processo de avaliação. A Figura 2 a seguir, apresenta o fluxograma do Algoritmo Genético.

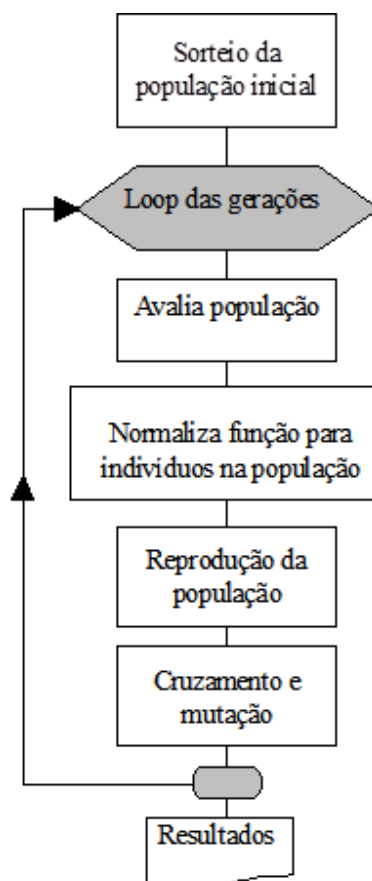


Figura 2: Fluxograma do Algoritmo Genético

Define-se como sendo um indivíduo, o conjunto de notas de serviço abertas, provenientes do sistema SAP, nas quais a codificação binária indica se as ações presentes na nota devem ser realizadas (“1”) ou não (“0”). Note-se que a quantidade de combinações possíveis de notas abertas implicará diretamente no tempo computacional, para uma dada população (isto é, um conjunto de indivíduos). Assim sendo, comparando-se com a

Genética, as boas características de cada configuração correspondem analogamente aos bons genes do cromossomo.

O princípio é análogo à adaptação dos seres vivos nos diversos ambientes. Inicialmente faz-se um sorteio inicial de indivíduos, no qual será escolhida a população. Desta, selecionam-se os melhores seres adaptados e aplica-se a possibilidade de mutação e cruzamento. Finalmente, avaliam-se todos os indivíduos desta geração e, caso seja atingido o número máximo parametrizado de gerações, encontra-se assim o indivíduo mais adaptado. Caso contrário, o ciclo poderá ser reiniciado a partir da seleção dos melhores adaptados.

B.3. Etapas do Algoritmo Genético

As etapas necessárias para a execução do processo descrito na Figura 7 são basicamente:

- a) Avaliação;
- b) Seleção;
- c) Elitismo;
- d) Cruzamento, e;
- e) Mutação.

Através da execução desses passos repetidamente, espera-se chegar a uma solução mais próxima da ótima quando um determinado critério de parada é alcançado na etapa de avaliação.

a) Avaliação

A avaliação deve acontecer sempre que uma nova geração de indivíduos é produzida, a fim de parar o processo caso uma solução satisfatória tenha sido atingida.

Para que a avaliação seja realizada, é necessário que cada geração tenha rastreados os melhores e piores indivíduos, assim como informações sobre o tempo de processamento. Dessa maneira, pode-se estabelecer um critério de parada, otimizando o tempo de processamento.

No entanto, deve-se estabelecer também um número máximo de gerações, pois alguns casos podem ter problemas para convergir, o que geraria um tempo muito grande de processamento.

b) Seleção

Os algoritmos genéticos operam em um conjunto de soluções possíveis. No entanto, há uma natureza aleatória em várias partes do processo, levando o algoritmo a obter soluções boas, ruins ou até mesmo ineficazes.

Para contornar esse problema, é atribuído para cada solução um valor de *fitness* (ou apenas *fitness*), que representa o quão boa é uma solução dentro de um espaço de soluções possíveis. Para obter essas representações, os valores numéricos atribuídos para cada indivíduo (os índices de mérito, que serão

explicados adiante) são normalizados, de forma que a soma de todos os *fitness* fique sempre igual a 1.

Esses valores de *fitness* são utilizados para selecionar os indivíduos que serão cruzados para gerar os indivíduos filhos. Esses filhos irão substituir os indivíduos da outra geração, de maneira que é esperado que a nova geração seja sempre melhor que a anterior.

Vale ressaltar que mesmo sendo utilizados valores de *fitness*, ainda existe um caráter aleatório na seleção, de forma que mesmo que os melhores indivíduos tenham mais probabilidade de serem selecionados, os indivíduos considerados ruins também podem ser escolhidos para o cruzamento. Isso impede que os cruzamentos sejam realizados entre indivíduos muito parecidos entre si, o que geraria pouca mudança de uma geração para outra e, conseqüentemente, limitaria o espaço de soluções e faria que o algoritmo ficasse preso em um ótimo local.

c) Elitismo

O elitismo consiste em manter determinada porcentagem de indivíduos mais aptos da geração anterior na geração atual. Isto conserva os melhores indivíduos, garantindo que eles sobrevivam ao longo das gerações e contribui para uma convergência mais rápida no processo.

Esses indivíduos da geração anterior tomam o lugar de indivíduos da geração atual que são aleatoriamente excluídos.

d) Cruzamento

Após os indivíduos serem selecionados, eles entram na etapa de cruzamento (também conhecida como *crossover*) para gerar novos indivíduos. Cada par de indivíduos selecionados deve gerar dois filhos através do cruzamento das informações armazenadas.

Existem diversas técnicas de cruzamento e nesse projeto será utilizada a técnica conhecida como *One Point Crossover*, onde as informações são trocadas a partir de um único ponto, como mostrado na Figura 3 a seguir.

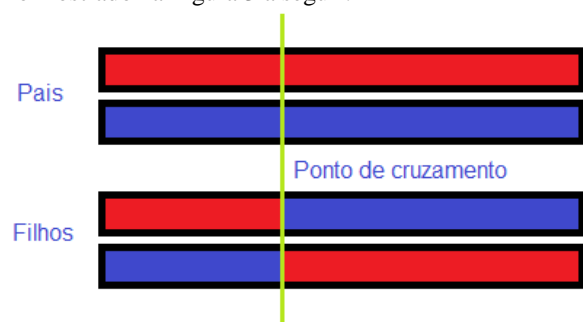


Figura 3: Demonstração do Cruzamento (*One Point Crossover*)

O ponto de cruzamento também é escolhido de forma aleatória, de forma a evitar os mínimos locais e causar mais diversidade entre as gerações.

e) Mutação

A mutação é uma operação que faz uma pequena mudança nos indivíduos, mas que não cria novos. Ela é, portanto, realizada em indivíduos que foram criados no processo de cruzamento, mas somente em alguns indivíduos que são sorteados com base em certa probabilidade de mutação.

Nesses indivíduos sorteados, um gene é escolhido aleatoriamente e somente esse gene é alterado.

Essas pequenas mudanças também contribuem para o aumento da diversidade entre as gerações.

B.4. Codificação do Indivíduo

A codificação dos indivíduos do Algoritmo Genético será feita através de um vetor com componentes binários, que representam a variável de decisão sobre a realização ou não de ações de uma determinada nota de manutenção. Cada um dos elementos do vetor é um gene do indivíduo, que está mostrado na Figura 4 a seguir.

Cada nota de manutenção possui um índice de mérito específico, sendo que o valor atribuído ao indivíduo será a soma dos índices de mérito das notas que estiverem marcadas com o bit “1” na variável de decisão.



Figura 4: Codificação do Algoritmo Genético

C. Algoritmo Aplicado à Priorização da Manutenção

C.1. Considerações Gerais

O presente item apresenta a aplicação do Algoritmo Genético no problema da priorização de manutenção, introduzindo as algumas variáveis que terão papel fundamental para a avaliação das soluções correntes de cada iteração do algoritmo através da função objetivo.

A hierarquização das ações de manutenção ocorrerá em duas partes, a saber:

a) Definição dos circuitos prioritários, de acordo com uma pré-avaliação que leva em conta o cálculo do índice mérito das notas sem as variáveis de projeção, constituindo um índice de mérito para cada alimentador;

b) Serão exibidos os alimentadores ordenados pelo índice de mérito, permitindo ao usuário selecionar os alimentadores que entrarão na priorização, onde será de fato utilizado o Algoritmo Genético.

C.2. Índice de Mérito do Alimentador

A priorização se dará em duas etapas:

C.2.1 Primeira Etapa – Circuitos Prioritários

Na primeira etapa da priorização, serão definidos quais circuitos serão prioritários, mediante uma pré-avaliação, que poderá levar em conta, todas as variáveis de influência que compõe o Índice de Mérito.

Esse índice dever ser composto basicamente com variáveis históricas, levando em consideração o FEC, o DEC, as multas e as piscadas, de acordo com o seguinte equacionamento:

a) Variáveis de entrada:

i. Período de análise.

- m_{ini} Mês e ano do início do período para cálculo das variáveis influentes;
- m_{fin} Mês e ano do final do período para cálculo das variáveis influentes.

ii. Flags de decisão se determinada variável entrará no cálculo do IM.

- b_{FEC} Flag de decisão se a variável FEC entrará no cálculo (0 ou 1);
- b_{DEC} Flag de decisão se a variável DEC entrará no cálculo (0 ou 1);
- b_{MUL} Flag de decisão se a variável Multas entrará no cálculo (0 ou 1);
- b_{PIS} Flag de decisão se a variável Piscadas entrará no cálculo (0 ou 1);

iii. Pesos das variáveis que entrarão no cálculo do IM.

- P_{FEC} Peso da variável FEC (pu);
- P_{DEC} Peso da variável DEC (pu);
- P_{MUL} Peso da variável Multas (pu);
- P_{PIS} Peso da variável Piscadas (pu);

b) Cálculo do Índice de Mérito do Alimentador (IM_{CIR})

O Índice de Mérito do circuito é obtido através de (1):

$$IM_{CIR} = b_{FEC} * IM_{FEC(hist)} + b_{DEC} * IM_{DEC(hist)} + b_{MUL} * IM_{MUL(hist)} + b_{PIS} * IM_{PIS(hist)} \quad (1)$$

Sendo que:

$$IM_{FEC(hist)} = P_{FEC} * \sum_{m=m_{ini}}^{m_{fin}} \frac{FEC(hist)_{CIR}^m}{FEC(hist)_{EMP}^m} \quad (2)$$

$$IM_{DEC(hist)} = P_{DEC} * \sum_{m=m_{ini}}^{m_{fin}} \frac{DEC(hist)_{CIR}^m}{DEC(hist)_{EMP}^m} \quad (3)$$

$$IM_{MUL(hist)} = P_{MUL} * \sum_{m=m_{ini}}^{m_{fin}} \frac{MUL(hist)_{CIR}^m}{MUL(hist)_{EMP}^m} \quad (4)$$

$$IM_{PIS(hist)} = P_{PIS} * \sum_{m=m_{ini}}^{m_{fin}} \frac{PIS(hist)_{CIR}^m}{PIS(hist)_{EMP}^m} \quad (5)$$

Onde,

- $IM_{FEC(hist)}$ Índice de Mérito da variável FEC com dados históricos.
- $IM_{DEC(hist)}$ Índice de Mérito da variável DEC com dados históricos.
- $IM_{MUL(hist)}$ Índice de Mérito da variável Multas com dados históricos.
- $IM_{PIS(hist)}$ Índice de Mérito da variável Piscada com dados históricos;
- $FEC(hist)_{CIR}^m$ Contribuição do FEC registrado do Circuito, no FEC da Empresa, no mês **m**;
- $FEC(hist)_{EMP}^m$ FEC registrado da Empresa no mês **m**;
- $DEC(hist)_{CIR}^m$ Contribuição do DEC registrado do Circuito, no DEC da Empresa, no mês **m**;
- $DEC(hist)_{EMP}^m$ DEC registrado da Empresa no mês **m**;
- $MUL(hist)_{CIR}^m$ Multas estimadas por violação de FIC do Circuito no mês **m**;
- $MUL(hist)_{EMP}^m$ Multas estimadas por violação de FIC da Empresa no mês **m**;

Esse cálculo de índices de mérito deve fornecer uma primeira análise sobre a situação dos circuitos mais críticos, abrindo a possibilidade para o usuário selecionar aqueles que forem de maior interesse para a priorização das notas.

C.2.2 Segunda Etapa – Aplicação de Algoritmo Genético

A segunda etapa da priorização é onde o algoritmo genético realmente irá atuar, com base nos valores dos índices de mérito das notas de serviço abertas que estiverem contidas nos circuitos selecionados na primeira etapa.

Nesta etapa, são incluídas as variáveis de projeção do FEC e de multas, assim como as prioridades atribuídas a cada nota, cada qual com seu respectivo peso, de acordo com o seguinte equacionamento:

a) Variáveis de entrada:

i. Período de análise.

• (todas as variáveis da primeira etapa)

ii. Flags de decisão se determinada variável entrará no cálculo do IM.

• (todas as variáveis da primeira etapa)

• b_{CUS} Flag de decisão se a variável Custo Planejado/Calculado da nota de serviço entrará no cálculo (0 ou 1);

• b_{PRI} Flag de decisão se a variável Prioridade da nota de serviço entrará no cálculo (0 ou 1);

○ Se houver recursos para executar todas as notas de serviço “emergentes”, serão calculados os índices de méritos dessas notas, ranqueando-as do maior para o menor índice de mérito. Após essa primeira priorização, o AG será executado para as demais notas;

○ Se não houver recursos para executar todas as notas de serviço “emergentes”, somente entrará na priorização do AG as notas de serviço “emergentes”, a fim de se obter uma solução otimizada com o recurso disponível.

iii. Pesos das variáveis que entrarão no cálculo do IM.

• (todas as variáveis da primeira etapa)

• p_{CUS} Peso da variável Custo Planejado/Calculado da nota de serviço (pu);

• p_{PRI} Peso da variável Prioridade da nota de serviço (pu).

○ Para cada tipo de prioridade da nota de serviço haverá um peso específico $p_{PRI}^{(prioridade\ da\ NS)}$, de forma que a soma de todos estes pesos específicos seja igual a 1. Assim, o peso final da nota de serviço será igual à multiplicação do peso específico (de acordo com o tipo da prioridade) com o peso da variável P_{PRI} . As prioridades são classificadas como:

- ✓ $P_{PRI}^{(emergente)}$;
- ✓ $P_{PRI}^{(urgente)}$;
- ✓ $P_{PRI}^{(prioritaria)}$;
- ✓ $P_{PRI}^{(programavel)}$;
- ✓ $P_{PRI}^{(informativa)}$;

Onde,

$$P_{PRI}^{Emergente} + P_{PRI}^{Urgente} + P_{PRI}^{Prioritaria} + P_{PRI}^{Programada} + P_{PRI}^{Informativa} = 1 \quad (6)$$

iv. Restrição

• Flag se a restrição de recursos financeiros será considerada no otimizador, bem como o valor do recurso disponível.

b) Cálculo do Índice de Mérito da Solução, ou Indivíduo (IM_{IND}), bem como o Índice de Mérito da Nota de Serviço (IM_{NS}):

O Índice de Mérito da Solução é obtido através de (7):

$$IM_{IND} = \sum_{n=1}^{N_{OS}} b_{NS} * IM_{NS} \quad (7)$$

O Índice de Mérito da Nota de Serviço é obtido através de (8):

$$IM_{NS} = \frac{IM_{NS}^{num}}{IM_{NS}^{den}} \quad (8)$$

Onde,

• b_{NS} Variável, ou o *bit*, que definirá se determinada nota de serviço da solução corrente será executada ($b_{NS}=1$) ou não ($b_{NS}=0$). Desta forma, uma solução, ou indivíduo, será a composição de várias notas de serviço, ou genes, envolvidas na otimização.

$$IM_{NS}^{num} = b_{PRI} * IM_{PRI} + b_{FEC} * (IM_{FEC(hist)} + IM_{FEC(proj)}) + b_{DEC} * IM_{DEC(hist)} + b_{MUL} * (IM_{MUL(hist)} + IM_{MUL(proj)}) + b_{PIS} * IM_{PIS(hist)} \quad (9)$$

Ressalte-se que:

$$\text{Se } b_{CUS}=0, \text{ então } IM_{NS}^{den} = 1 \quad (10)$$

$$\text{Se } b_{CUS}=1, \text{ então } IM_{NS}^{den} = \frac{C_{PLAN}}{C_{TOTAL}} \quad (11)$$

$$IM_{PRI} = p_{PRI} * p^{(prioridade da NS)} \quad (12)$$

$$IM_{FEC(proj)} = p_{FEC} * \frac{N_{CONS_JUS}}{N_{CONS_EMP}} \quad (13)$$

$$IM_{MUL(proj)} = p_{MUL} * \frac{D_{JUS}}{D_{JUS}} \quad (14)$$

$$IM_{PIS(proj)} = p_{PIS} * \frac{PIS_{CIRC}}{PIS_{EMP}} \quad (15)$$

- $IM_{FEC(proj)}$ Índice de Mérito da variável FEC projetado pela não realização da nota de serviço;
- $IM_{MUL(proj)}$ Índice de Mérito da variável Multas projetado pela não realização da nota de serviço;
- $IM_{PIS(proj)}$ Índice de Mérito da variável Piscadas projetado pela não realização da nota de serviço;
- $IM_{FEC(hist)}$ Índice de Mérito da variável FEC histórico;
- $IM_{MUL(hist)}$ Índice de Mérito da variável Multas histórico;
- IM_{PRI} Índice de Mérito da variável Prioridade da nota de serviço;
- IM_{CONS_JUS} Número de consumidores que seriam afetados pela não realização da nota de serviço;

- N_{CONS_EMP} Número de consumidores da empresa;
- D_{JUS} Demanda calculada à jusante da chave pai da instalação em que está associada a nota de serviço;
- D_{EMP} Demanda total da empresa;
- PIS_{CIRC} Quantidade de piscadas do alimentador;
- PIS_{EMP} Quantidade de piscadas da empresa;
- B_{CUS} Flag de decisão se a variável custo entrará no cálculo (0 ou 1).
- C_{PLAN} Custo planejado/calculado da nota de serviço;
- C_{TOTAL} Custo total planejado/calculado de todas as notas de serviço envolvidas na priorização;
- b_{PRI} Flag de decisão se a variável Prioridade da nota de serviço entrará no cálculo (0 ou 1);
- b_{FEC} Flag de decisão se a variável FEC entrará no cálculo (0 ou 1);
- b_{DEC} Flag de decisão se a variável DEC entrará no cálculo (0 ou 1);
- b_{MUL} Flag de decisão se a variável multa entrará no cálculo (0 ou 1);
- b_{PIS} Flag de decisão se a variável piscada entrará no cálculo (0 ou 1).

Desta forma, a ferramenta de priorização heurística deverá fornecer ao final da segunda etapa, uma lista com a priorização das notas de serviço de manutenção, dentre os circuitos mais críticos selecionados, focando na melhoria ótima dos indicadores de segurança e também aqueles relativos aos de continuidade (indicadores globais e individuais).

III. RESULTADOS

A. Considerações Iniciais

Para a avaliação das ações de manutenção preventiva a serem priorizadas, foram consideradas as notas de manutenção abertas, dados históricos de DEC e FEC, além das multas pecuniárias por transgressões dos indicadores individuais de continuidade, porém, não levando-se em consideração as interrupções momentâneas e temporárias de tensão, pois estes últimos ainda estão em fase final de extração e formatação.

Além da avaliação das notas, uma avaliação dos circuitos, que é feita considerando-se apenas dados históricos, é feita antes do início dos cálculos e ordena os circuitos de acordo com seus índices de mérito, indicando quais são aqueles mais críticos, de acordo com os critérios definidos pelo usuário. Essa avaliação de circuitos pode também ser feita independentemente das ações de manutenção.

Para essas simulações, serão considerados os circuitos da subestação BCU, que possuem 512 notas de serviço abertas no período de 01/2012 até 12/2012, totalizando um custo de R\$ 925.847,88, de acordo com a Figura 5. Como as piscadas não estão sendo consideradas ainda, a caixa “Perturbações

(histórico)” foi desmarcada e foram dados pesos iguais para as outras variáveis.

Foram considerados os seguintes parâmetros para o Algoritmo Genético:

- Número de gerações: 1000;
- Número de indivíduos: 600;
- Probabilidade de cruzamento: 80%;
- Probabilidade de mutação: 5%.

Não foi considerado um limite máximo de tempo (*time out*) para as simulações.

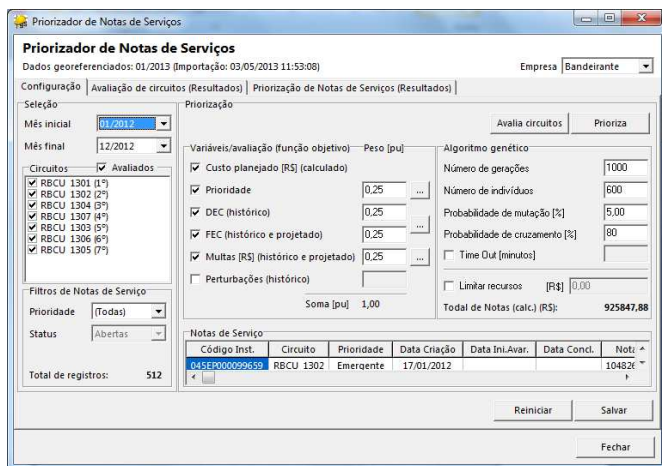


Figura 5: Circuitos Selecionados para Priorização

Desta forma, contemplando-se as considerações acima citadas, está apresentado a seguir, os resultados do *GeoSigma*.

B Avaliação de Circuitos

A avaliação de circuitos, que precede a priorização de notas de serviço, apresentou os resultados mostrados na Figura 6.

Os circuitos foram ordenados pelo índice de mérito, indicando que o circuito “BCU1301” é o mais crítico, enquanto o “BCU1305” é o menos crítico, considerando-se pesos iguais, atribuídos às variáveis para o cálculo do índice de mérito.



Figura 6: Resultados da Avaliação de Circuitos

Ressalte-se que os valores históricos de DEC e FEC, correspondem aos valores da contribuição de cada circuito no DEC e FEC anual da concessionária.

C. Aplicação do AG: Orçamento de R\$700.000,00

Para início das análises dos resultados do Algoritmo Genético, foi considerada uma restrição orçamentária de R\$ 700.000,00. Vale lembrar que, caso não seja selecionada nenhuma restrição de orçamento, o Algoritmo Genético não será executado, pois não havendo restrições, a melhor solução é a de sempre executar todas as notas.

Foram feitas análises, considerando ou não, o custo planejado modular de cada nota de serviço, pois a inclusão, ou não do mesmo, altera o cálculo do índice de mérito, produzindo resultados com diferentes conotações.

C.1 Considerando o Custo Planejado

A Figura 7 mostra a janela de resultado do Algoritmo Genético para este caso.

Como as notas de serviço emergentes não entram no cálculo do AG, o mesmo só é executado com as demais notas, sendo o resultado dessas mostrado em azul.

A solução final encontrada apresentou um custo de R\$ 602.256,79, ou seja, dentro do orçamento máximo estipulado.

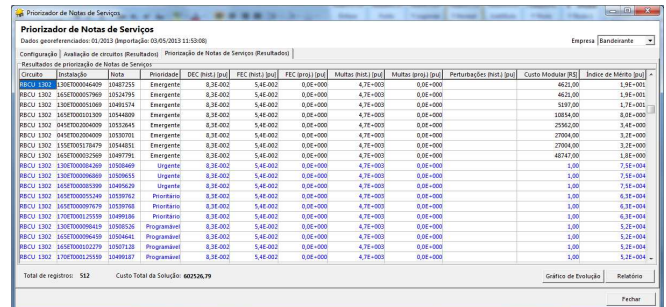


Figura 7: Resultados de Priorização Considerando o Custo Planejado

C.2 Não Considerando o Custo Planejado

A mesma análise do item C.1 foi refeita, sem considerar o custo planejado, ou seja, desmarcando a opção “Custo Planejado [R\$] (calculado)” presente na janela de configuração mostrada na Figura 5.

A desmarcação desse item causa uma mudança no cálculo do índice de mérito de cada nota, pois o mesmo não será mais dividido pelo custo da nota em pu.

A Figura 8 mostra os resultados dessa análise. Verifica-se que a solução encontrada apresenta um custo total de R\$ 692.944,07, dentro do orçamento estipulado.

Embora o custo planejado não tenha sido inicialmente considerado no cômputo do índice de mérito, este valor resulta

da somatória dos valores das notas de manutenção selecionadas pelo Algoritmo Genético.

Código	Intensidade	Nota	Prioridade	DEC (pu) [pu]	FEC (pu) [pu]	FEC (pu) [pu]	Multas (pu) [pu]	Multas (pu) [pu]	Perfurbacoes (pu) [pu]	Custo Modular [pu]	Índice de Mérito [pu]
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	4,7E-003	0,0E-000	1454,00	9,3E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	4,7E-003	0,0E-000	23,00	9,3E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	4,7E-003	0,0E-000	645,00	9,3E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	4,7E-003	0,0E-000	527,00	9,3E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	4,7E-003	0,0E-000	544,00	9,3E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	4,7E-003	0,0E-000	151,00	9,3E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	1,1E-003	0,0E-000	14,00	7,8E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Emergente	0,38-002	0,48-002	0,08-000	1,1E-003	0,0E-000	334,00	7,8E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	57,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	63,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	793,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	897,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	520,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	140,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	284,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	164,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	271,00	6,5E-002	
RCU 1302 13187000000000000000	13187000000000000000	13187000000000000000	Urgente	4,38-002	3,38-002	0,08-000	1,1E-004	0,0E-000	136,00	6,5E-002	

Figura 8: Resultados de Priorização sem Considerar o Custo Planejado

D. Análise dos Resultados

Após uma avaliação dos casos apresentados, percebe-se que o algoritmo implementado apresenta uma boa alternativa de priorização da manutenção preventiva, dentro do orçamento estipulado e com base nos critérios técnicos definidos pelo usuário.

Há, no entanto, algumas divergências em relação aos resultados quando se considera ou não, o custo planejado modular de cada nota de serviço.

Quando esse custo é considerado, o índice de mérito da nota é dividido pelo custo da mesma, em pu, o que faz com que notas com custo baixo tenham um índice de mérito muito maior que outras com custo um pouco mais elevado. Isso faz com que as notas de custo mais elevado não tenham muita influência no índice de mérito total, podendo até serem excluídas da solução, ao passo que notas com custo muito baixo, tendem a se perpetuar até o final da execução do AG.

Essa análise é uma otimização da relação (benefício / custo) e pode deixar o custo da solução mais abaixo da restrição, do que a otimização apenas do benefício.

Quando apenas o benefício é considerado, ou seja, quando o custo modular de cada nota é desconsiderado no cálculo do índice de mérito, existe uma tendência maior de aproveitamento de todos os recursos disponíveis (restrição orçamentária), pois, uma vez que o custo não está sendo considerado, os índices de mérito das notas terão valores mais próximos uns dos outros, indicando apenas o benefício técnico de cada nota.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a ferramenta computacional elaborada pela Daimon Engenharia, em parceria com as empresas de distribuição do Grupo EDP (Bandeirante e Escelsa).

No cenário anterior de indicadores técnicos [6], o incentivo de investimentos estava sendo direcionado para que as concessionárias tivessem mais zelo com o conglomerado de

unidades consumidoras (em outras palavras, consideradas de forma coletiva), como por exemplo, os bairros residenciais.

Com a nova regulamentação [7], a tendência do incentivo à melhoria da confiabilidade está focada principalmente na unidade consumidora (DIC, FIC e DMIC; e mais recentemente, o DICRI), pois como a compensação financeira é proporcional à fatura da mesma, a distribuidora está sendo incentivada a atuar mais sob o ponto de vista da manutenção preventiva, por exemplo, nas unidades consumidoras do Grupo A4 (que possuem consumo elevado). Assim, desde o início de 2010, vislumbra-se que o foco da atuação das concessionárias possa estar migrando do coletivo para o individual, podendo influenciar nas decisões de priorização de medidas preventivas. Desta forma, devido às incertezas de natureza regulatória, que possam afetar as prioridades em termos de continuidade no fornecimento de energia elétrica, optou-se por implementar uma metodologia que contemplasse tanto parâmetros relacionados ao conglomerado de clientes (FEC e DEC), quanto parâmetros que avaliam o cliente de forma individual (compensações pecuniárias por transgressão dos indicadores individuais DIC, FIC e DMIC). Assim, esta metodologia pode considerar tanto aspectos coletivos, tanto individuais, dependendo das ponderações (pesos) atribuídos pelo usuário do *software*, na composição do “Índice de Mérito” (avaliado pelo usuário, de forma a contemplar a(s) variável(eis) de maior representatividade no estudo).

Adicionalmente, ressalte-se que o aplicativo computacional, além de contemplar as interrupções de tensão de longa duração (igual ou superior a 3 minutos), também podem considerar aquelas que são causadas, por exemplo, por contato temporário com a arborização, e que, no entanto, podem acionar os dispositivos de proteção automáticos, provocando “piscadas” aos consumidores. Embora estas interrupções de curta duração não estão ainda passíveis de compensações, podem acarretar prejuízos aos processos produtivos das unidades consumidoras, razão pela qual, estes registros de interrupções momentâneas ou temporárias de tensão também podem ser contempladas pelo *software*.

Por derradeiro, é importante ressaltar que a ferramenta em desenvolvimento visa primordialmente a prevenir ocorrências que produzam cenários de riscos patrimoniais ou de segurança a pessoas e animais, além de promover a adequação técnico-econômica da rede/equipamentos aos padrões vigentes da concessionária, identificando e priorizando alimentadores (através de um ranqueamento) que sejam objeto de uma intervenção de campo mais mandatária, localizando aqueles circuitos com maior necessidade de intervenções, além de se melhorar os indicadores de confiabilidade, e consequentemente, redução de multas pecuniárias pagas aos consumidores, e menor impacto devido às “piscadas”. Assim sendo, a exposição de possíveis benefícios em termos econômicos da aplicação dos resultados do *GeoSigma* é assaz subjetiva, ou até mesmo intangível, em situações onde ocorra, por exemplo, o rompimento de um condutor primário devido a não realização de poda, podendo ter consequências negativas das mais diversas para a concessionária, inclusive jurídicas.

V. REFERENCES

Utility Standard:

- [1] EDP - Energias do Brasil S.A.: Estratégias de manutenção de Redes MT e BT – Norma NO.MA.02.00.001, de 27.02.07.

Technical Report:

- [2] Daimon, “Análise do Estado dos Elementos das Redes de Distribuição – RT 1.2, versão 3”, Projeto de P&D Um Novo Paradigma de Planejamento e Gestão da Manutenção dos Sistemas de Distribuição Fundamentado em Indicadores de Continuidade, DAIMON/ESCELSA, São Paulo, março de 2013.

Papers Presented in Conferences:

- [3] Pelegrini, M.A.; Kagan, N.; Henriques, H. O.; Vaz, M. R.; Araújo, A. C. M.; Moreira, A. C. C.; Ferreira, A. F., "Optimization of maintenance Actions in Distribution Networks", CIRED 18th International Conference on Electricity Distribution, Turim, Jun. 2005.
- [4] Kuntz, P.A.; Christie, R. D.; Subrahmanyam, S. V., "Optimal Vegetation Maintenance Scheduling of Overhead Electric Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, n^o 4, pp. 1164-1169, Out. 2002.

Book:

- [5] Oliveira, C. C. B.; Kagan, N.; Schmidt, H. P.; Kagan, H.; "Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência", Editora Blucher, 2009, p. 108-111.

Regulatory Decrees:

- [6] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Resolução n^o 024, de 27 de janeiro de 2000.
- [7] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Resolução n^o 395, de 15 de dezembro de 2009 (e atualizações subsequentes) - PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.

VI. BIOGRAPHIES



Alden Uehara Antunes was born in Ilha Solteira, Brazil, on March 10th, 1971. He graduated in Electrical Engineering at the Politechnic School of São Paulo University in 1996. He received his MSc at the Politechnic School of São Paulo University in 1999 and his PhD at the Politechnic School of São Paulo University in 2004. Nowadays, he is with “Daimon Engenharia e Sistemas”, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects. He has experience in the area of Electrical Engineering with emphasis on the Distribution of Electricity acting mainly on the following topics: Electrical distribution system planning, methodologies for calculating technical losses, protection of primary feeders, service quality and smart grids.



André Meffe was born in São Paulo, Brazil, on April 23th, 1976. He graduated in Electrical Engineering from University of São Paulo in 1998. He received his MSc in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2001 and his PhD in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2006. He has been with the Department of Electrical Engineering at the University of São Paulo from 1999 to 2004, where he worked with researches related to electric distribution systems. Nowadays, Mr. Méffe is with “Daimon Engenharia e Sistemas”, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects His current research interests include electrical power distribution planning, methodologies for calculating technical losses and technical losses’ targets, service quality and smart grids.



Alessandro Mendonça Maciel was born in Jales in the state of São Paulo, Brazil, on November 28th, 1986. He graduated from the University of São Paulo at the São Carlos Engineering School (EESC). His employment experience includes electrical engineering studies such as electrical systems protection, load flow and transients. Nowadays he works with Research and Development in the electrical energy distribution area.



Dário Takahata was born in São Paulo, Brazil, in 1959. He graduated in Electrical Engineering at the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 1985 and received the M.S. degree at the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 1997. He has been working in the electricity industry since then, in Brazil and abroad. His experience as an electrical engineer comprises a period with Kennedy & Donkin, a consultancy company in England, Themag Engineering (one of the leading consultancy companies in Brazil) and ARSESP (São Paulo State Regulatory Agency of Energy and Sanitation). Currently he is Coordinator of Research & Development (R&D) Projects of Daimon Engineering & Systems.



Fernando Locks Lange was born in Medianeira in the state of Paraná, Brazil, on May 17th, 1982, and graduated in Electrical Engineering in December 2007, at the State University of West Paraná, with emphasis on Power Systems. He joined the company Daimon Engineering and Systems Ltd. in 2008, and since then he has been working as an engineer of technical solutions and software development. He has participated in several R & D projects, developing technical modules calculation, optimization algorithms, among other jobs. Some of these works have earned him publications at important events in the power sector. He has been working for Daimon, acting continuously in studies of distribution systems of electric utilities in Brazil.