

## **OTIMIZAÇÃO DE ESTOQUES DE TRANSFORMADORES DE SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO CRONOLÓGICA E TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS**

**Kascilene Gonçalves Machado**

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)  
Av. BPS, 1303 - CEP 37.500-903, Itajubá, MG – Brasil  
dkasci@yahoo.com

**João Guilherme de C. Costa**

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)  
Av. BPS, 1303 - CEP 37.500-903, Itajubá, MG – Brasil  
costa@unifei.edu.br

**Armando M. Leite da Silva**

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)  
Av. BPS, 1303 - CEP 37.500-903, Itajubá, MG – Brasil  
armando@unifei.edu.br

### **RESUMO**

Este trabalho propõe uma nova metodologia baseada em técnicas metaheurísticas para dimensionamento ótimo de estoques de transformadores reservas para uso em subestações de distribuição de energia elétrica. Um algoritmo baseado em simulação Monte Carlo cronológica é usado no cálculo de indicadores de desempenho e custos do sistema em um período de interesse, considerando fatores como crescimento de carga, aumento do número de transformadores em operação e inclusão de reforços ao estoque inicial. Diversos experimentos numéricos são realizados para ilustrar as potencialidades do método proposto.

**Palavras-chave** — Metaheurísticas, transformadores reservas, simulação Monte Carlo.

**Área principal:** EN, MP, MH, OC, SIM

### **ABSTRACT**

This paper presents a new methodology based on metaheuristic optimization techniques for computing optimal distribution substation spare transformers. A chronological Monte Carlo simulation-based algorithm is used in the calculation of performance indices and system costs in a period of interest, considering factors such as load growth, increasing in the number of transformers in operation, and inclusion of reinforcements to the initial inventory. Several numerical experiments are carried out in order to illustrate the potentialities of the proposed method.

**Keywords** — Metaheuristics, Monte Carlo simulation, spare transformers.

## 1. Introdução

De um modo geral, os trabalhos relacionados ao dimensionamento de reserva técnica de transformadores procuram determinar o número de reservas que garanta aos sistemas uma operação confiável com o menor custo possível. Este conceito se aplica tanto aos transformadores de distribuição, instalados nos postes, quanto aos transformadores de força, presentes nas subestações. O estoque de reservas deve ser suficiente para suprir à demanda de transformadores avariados no período de interesse, sem, no entanto, implicar investimentos desnecessários. Segundo Mielczarski, Khan e Sugianto (1995), o dimensionamento de estoques é uma tarefa difícil e decisiva, com influência direta no orçamento das empresas. Em seu trabalho, os autores propõem uma metodologia baseada em Programação Dinâmica para dimensionar estoques de transformadores de distribuição, visando maximizar a confiabilidade do sistema com um investimento limitado.

No que se refere à modelagem dos eventos de falha dos transformadores, a maioria dos trabalhos consultados utiliza a distribuição de Poisson ou processos de Markov, cuja base teórica pode ser encontrada em Billinton e Allan (1992). Ambos os modelos admitem tempos de vida exponenciais, o que corresponde a assumir que os transformadores operem sempre na fase de vida útil, desprezando-se, portanto, os efeitos do envelhecimento. Chowdhury e Koval (2005) utilizam a distribuição de Poisson como modelo probabilístico para o número de falhas de transformadores por ano e calculam os custos de investimento, operação e manutenção do sistema em função do número de reservas. O processo de otimização consiste em variar o número de reservas e tomar a solução de menor custo total. Li, Vaahedi e Mansour (1999) usam a distribuição normal, caracterizada por uma taxa de falha crescente com o tempo, e técnicas de enumeração de estados para planejar o estoque em sistemas com grande parte dos transformadores na região de envelhecimento.

A teoria de processos de Markov é usada em Hamoud (2011) na determinação do número necessário de transformadores fixos e móveis para atendimento do nível requerido de confiabilidade de um grupo de subestações. Em Hamoud (2012), o mesmo modelo é aplicado ao cálculo do número de reservas que minimiza a soma entre os custos de investimento no estoque e os custos decorrentes da indisponibilidade de transformadores no campo. Em Leite da Silva, Costa e Chowdhury (2010), são propostos e comparados modelos baseados em processos de Markov e simulação Monte Carlo cronológica para cálculo de índices de confiabilidade e custos de grupos de subestações. Um algoritmo de simulação cronológica para dimensionamento de reserva técnica de transformadores de distribuição é discutido em Costa e Leite da Silva (2008), onde são modeladas reposições periódicas do estoque com quantidades que dependem do número de falhas ocorridas no período anterior.

Este artigo apresenta uma nova metodologia que emprega técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas e Simulação Monte Carlo Cronológica para determinar o dimensionamento ótimo da reserva técnica de transformadores em subestações de distribuição de energia elétrica. Este objetivo é alcançado a partir da definição do momento e da quantidade adequada de equipamentos a serem adicionados ao estoque, para que o sistema apresente a menor soma entre custos de investimento e operação, mantendo os índices de confiabilidade dentro de limites aceitáveis. O modelo proposto também viabiliza o tratamento, no decorrer do período de análise, de aspectos como: 1) crescimento da carga; 2) expansão do parque de transformadores; e 3) ampliação planejada do estoque. Os desenvolvimentos propostos são ilustrados por diversos experimentos numéricos com um sistema-teste. A próxima seção descreve o modelo baseado em simulação Monte Carlo e apresenta os indicadores de confiabilidade e modelagem de custo. Na Seção 3 são desenvolvidos alguns experimentos numéricos. Técnicas de otimização baseadas em metaheurísticas, em particular a metaheurística ES (*Evolution Strategies*), são apresentadas na Seção 4. As conclusões do trabalho estão descritas na Seção 5.

## 2 Avaliação de Confiabilidade e Custos

### 2.1 Descrição da Simulação Monte Carlo (SMC)

A simulação Monte Carlo cronológica permite a representação de condições não admitidas por métodos baseados na distribuição de Poisson e processos de Markov. Essas metodologias pressupõem tempos exponencialmente distribuídos e equipamentos com taxas de falha idênticas, o que nem sempre é verificado nos sistemas reais. Ademais, a falta de memória característica da distribuição exponencial impede que o efeito do envelhecimento e os danos causados por curtos-circuitos e outros impactos sejam representados em processos Markovianos.

A consideração do envelhecimento dos transformadores e a representação de outros fatores dependentes da cronologia dos eventos exigem a especificação de um intervalo de tempo (denominado período de análise), para o qual será avaliado o desempenho do sistema. A Figura 1 ilustra o início da simulação de um sistema hipotético formado por 5 transformadores com idades diferentes. O instante “0” representa o momento presente em que se conhece o estado de cada transformador, i.e., disponível (*up*) ou avariado (*dn*). A avaliação de confiabilidade se dará entre 0 e  $t_f$ . Os tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  e  $t_5$  correspondem a valores sorteados de distribuições de probabilidade dos tempos de vida restante dos transformadores. Na amostra apresentada, o transformador  $TR_2$  falha no instante  $t_2$ . Admitindo-se a existência de um transformador reserva no estoque e desprezando seu tempo de instalação, é possível sortear o instante  $t_2^*$  em que ocorrerá a falha deste equipamento. Este sorteio não deve considerar a distribuição de probabilidade do  $TR_2$  avariado (que, por hipótese, é um equipamento usado), mas a distribuição do  $TR_2$  atual, que é novo no instante da instalação. Isto mostra que o modelo proposto considera a existência de equipamentos com idades diferentes e trata adequadamente a substituição de um equipamento usado por outro com as mesmas características, porém novo.

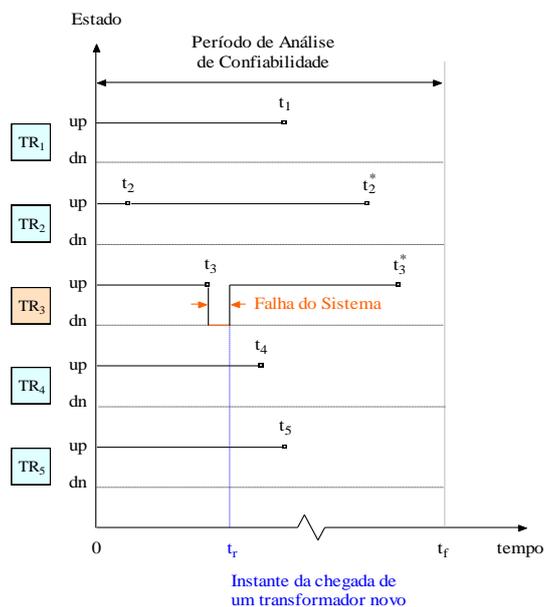


Figura 1. Ilustração da simulação Monte Carlo cronológica.

A falha de  $TR_2$  no instante  $t_2$  inicia também o processo de compra de um novo transformador para substituir o retirado do estoque. O tempo necessário para que esse transformador esteja disponível também é modelado por uma distribuição de probabilidade. Dependendo do instante da chegada do novo transformador e do número de reservas em estoque, o sistema poderá continuar em estado de sucesso ou apresentar uma falha em decorrência da avaria de outro transformador no campo. Considere, por exemplo, que com a retirada do transformador reserva para substituir  $TR_2$ , o estoque tenha ficado vazio. Se a reposição deste equipamento ocorrer antes de  $t_3$  (instante da próxima falha na Figura 1), o sistema continuará no estado de sucesso. Por outro lado, se o

novo transformador for disponibilizado no instante  $t_r$  (posterior a  $t_3$ ), o sistema ocupará o estado de falha entre  $t_3$  e  $t_r$ . Neste caso, o novo transformador adquirido não será enviado ao estoque, mas instalado no campo para compor o número de transformadores necessários ao funcionamento do sistema. Observe ainda que a falha de  $TR_3$  inicia o processo de compra de outro transformador, cuja duração será determinante para o sucesso ou a falha do sistema, considerando-se a possibilidade de futuras avarias.

A simulação Monte Carlo consiste na análise de um grande número de períodos como o ilustrado na Figura 1, para um sistema com estoque definido. Assim, são calculados índices para o período de análise e para cada ano do mesmo, o que permite identificar os momentos de maior exposição às falhas. A Figura 2 ilustra o fluxograma básico da avaliação proposta.

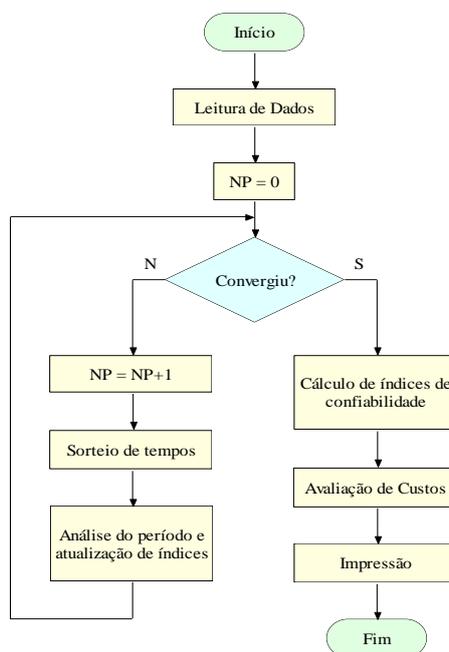


Figura 2. Fluxograma básico da análise de confiabilidade.

## 2.2 Índices de Confiabilidade

Durante a simulação são amostrados NP períodos, para os quais são monitoradas variáveis como número de falhas, tempo de falha e energia não suprida. A partir dos valores acumulados destas ao longo da simulação (valores totais), calculam-se índices de desempenho como:

*Indisponibilidade:* número médio de horas no período, em que o sistema apresenta interrupção:

$$U = \frac{\text{tempo total de falha}}{NP} \quad (1)$$

*Frequência média de falha:* número médio de falhas do sistema no período. Matematicamente:

$$f = \frac{\text{número total de falhas}}{NP} \quad (2)$$

*Duração média da falha:* tempo médio de interrupção a cada falha apresentada, i.e.

$$D = \frac{\text{tempo total de falha}}{\text{número total de falhas}} \quad (3)$$

*Energia Média Não Suprida (EENS):* valor médio da energia que o sistema deixa de fornecer no período considerado em decorrência as falhas. Assim:

$$EENS = \frac{\text{energia total não fornecida}}{NP} \quad (4)$$

Da forma como definido por (1), (3) e (4), os índices U, f e EENS são relativos ao período de análise. Por exemplo, se o período for de 10 anos, a indisponibilidade será expressa em horas/década. Porém, se desejado, os índices podem ser expressos em base anual. Para isso, basta dividir os valores calculados por (1), (3) e (4) pelo número de anos do período.

A SMC pode ser interrompida quando o número de períodos amostrados (i.e., NP) for grande o suficiente para que o coeficiente de variação de algum índice de interesse seja menor que um limite aceitável (e.g., 1%). O coeficiente de variação (normalmente designado por  $\beta$ ) é definido em Rubinstein (1991) como o quociente entre o desvio-padrão da média amostral do índice de interesse e seu valor esperado.

### 2.3 Recursos Adicionais

A seguir, são descritos aprimoramentos incorporados ao algoritmo ilustrado na Figura 2.

*Indicadores Anuais:* Indicadores como frequência de falha, indisponibilidade e EENS podem ser decompostos por ano do período de análise. Com isso, pode-se verificar como o nível de confiabilidade previsto varia no tempo, revelando possíveis tendências de deterioração dos indicadores.

*Reforço do Estoque:* O método permite o planejamento de reforços ao estoque, sendo possível incluir novas reservas em momentos especificados. Assim, o planejador pode elaborar uma estratégia de formação do estoque ao longo do período de interesse.

*Aumento da Carga e Expansão do Sistema:* O modelo cronológico é adequado à representação de variações na carga e número de transformadores no campo. Assim, a avaliação de confiabilidade pode levar em consideração os aumentos de carga previstos e a entrada de novas subestações em operação durante o período de interesse.

*Supervisão do Estoque:* A modelagem inicial assume que a falha de um transformador no campo inicia automaticamente o processo de aquisição de um novo equipamento para substituir o retirado do estoque. Este procedimento faz com que a reposição ocorra da forma mais rápida possível. No entanto, o programa computacional implementado permite que sejam, ou não, habilitadas reposições automáticas. Se as reposições automáticas forem ativadas, o programa se comportará exatamente como descrito acima. Caso contrário, a estratégia de composição do estoque deverá conter, além dos reforços, a aquisição de equipamentos para substituição de transformadores avariados no período de análise. Esta forma de administrar o estoque oferece total autonomia ao planejador, permitindo que este defina quando e como adicionar novas reservas.

### 2.4 Modelagem de Custos

Na metodologia proposta, os custos são divididos em duas classes: 1) custos de investimento no reforço de um estoque inicial e 2) custos de operação, que incluem os custos de interrupção e perda de receita provocada pelas falhas do sistema. Em ambos os casos, calcula-se o custo esperado referido ao ano inicial do período de análise.

Os custos de investimento correspondem à soma dos valores presentes de todas as aquisições ocorridas no período de análise, e, assim, desconsidera-se o custo do estoque inicialmente existente. Este custo representa uma parcela comum a todas as alternativas de ampliação do estoque a serem comparadas, e, portanto, sua consideração não afetaria a decisão. Os custos de operação ocorrem sempre que a falha de um transformador no campo não puder ser eliminada com a instalação de um equipamento novo, se o estoque estiver vazio. O valor esperado deste custo é:

$$E(C_{\text{operação}}) = (C_i + C_e) \times \text{EENS} \quad (5)$$

em que  $C_i$  e  $C_e$  são, respectivamente, o custo unitário de interrupção em \$/MWh e o preço médio de venda da energia elétrica em \$/MWh.

O dimensionamento ótimo do estoque é o que minimiza a soma dos custos de investimento e operação do sistema. O problema do dimensionamento do estoque pode ser modelado como:

$$\min \sum \text{Custo} = \min [C_{\text{investimento}} + E(C_{\text{operação}})] \quad (6)$$

### 2.5 Validação do Modelo Proposto

O modelo proposto é validado através de comparações com duas formulações encontradas na literatura; a primeira, baseada na distribuição de Poisson e; a segunda, que utiliza a teoria de processos de Markov. Os resultados são obtidos para um sistema-teste composto por 132 transformadores de 72-25 kV com potência de 16 MVA, apresentado em Chowdhury e Koval (2005). Admite-se que os transformadores sejam idênticos e operem na região de vida útil, com taxas constantes de falha ( $\lambda = 0,011$  falha/ano) e de reposição do estoque ( $\mu = 1$  reposição/ano).

#### Primeira Comparação

De acordo com o modelo de Chowdhury e Koval (2005), baseada na distribuição de Poisson, a confiabilidade de um sistema para um período  $t$ , em que o estoque não pode ser repostado, é calculada por:

$$R(t) = e^{-N\lambda t} \sum_{k=0}^n \frac{(N\lambda t)^k}{k!} \quad (7)$$

Assim, fazendo  $\lambda = 0,011$  falha/ano,  $N = 132$  transformadores em operação,  $t = 1$  ano, e admitindo, por exemplo, um estoque com  $n = 5$  reservas, tem-se:

$$R(1) = e^{-1,452} \sum_{k=0}^5 \frac{1,452^k}{k!} = 0,996185 \quad (8)$$

Para se reproduzir este resultado pelo método proposto (implementado em um programa computacional), deve-se fixar o período de análise em 1 ano e admitir a distribuição exponencial como modelo dos tempos de funcionamento, pois os transformadores operam na fase de vida útil. De acordo com a fundamentação teórica de Billinton e Allan (1992), o sorteio do tempo de funcionamento de cada transformador deve ser feita por:

$$t_f = -\frac{1}{\lambda} \times \ln(U_{01}) \quad (9)$$

em que  $U_{01}$  é um número aleatório com distribuição uniforme entre 0 e 1, e  $\lambda$  é a taxa de falha do transformador. Além disso, o estoque inicial deve conter 5 reservas que, se utilizados no período de análise, não poderão ser substituídos por novos, para que as hipóteses do modelo analítico sejam satisfeitas. Para impedir que o estoque seja repostado, deve-se desativar o recurso de reposições automáticas, cuja função é discutida na Seção 2.3.

Com auxílio do programa, são obtidos por (1) a (4), os valores de indisponibilidade, frequência, duração média das falhas e EENS, apresentados na Tabela 1. A confiabilidade,  $R(t)$ , também é obtida por simulação Monte Carlo, através de:

$$R(t) = \frac{\text{número de períodos de sucesso}}{NP} \quad (10)$$

Na simulação, um período é avaliado como de sucesso, se o sistema tiver conseguido completá-lo com os  $N$  transformadores em operação, tendo, ou não, usado transformadores do estoque.

Tabela 1. Simulação para Reproduzir o Modelo de Poisson

Indicador	Valor
Indisponibilidade (horas/ano)	5,57
Frequência de Falha (falhas/ano)	0,0038
Duração Média das Falhas (dias)	61,27
EENS (MWh/ano)	49,11
Confiabilidade $R(t)$	0,996214

Como observado na Tabela 1, o valor de confiabilidade obtido por simulação (i.e., 0,996214) é razoavelmente próximo de 0,996185, calculado em (8). Isto mostra que o método proposto reproduz o modelo de Poisson quando: 1) os transformadores possuem a mesma taxa de falha; 2) os tempos de funcionamento são exponenciais; e 3) não sejam feitas reposições no estoque, i.e., deve-se fazer a taxa de reposição  $\mu = 0$ . A simulação permite o cálculo de outros indicadores, não acessados pelo modelo de Poisson.

### Segunda Comparação

Em Leite da Silva, Costa e Chowdhury (2010), um modelo Markoviano é aplicado ao mesmo sistema teste, resultando nos indicadores apresentados na Tabela 2, que foram calculados a partir das probabilidades estacionárias dos estados do sistema. Neste caso, admite-se que a taxa de reposição seja  $\mu = 1$  reposição/ano.

Tabela 2. Indicadores Obtidos pelo Modelo de Markov

Indicador	Valor
Indisponibilidade (horas/ano)	33,35
Frequência de Falha (falhas/ano)	0,0183
Duração Média das Falhas (dias)	76,00
EENS (MWh/ano)	301,85

Apesar de considerarem o mesmo sistema, os resultados das Tabelas 1 e 2 não são comparáveis entre si. Os indicadores da Tabela 1 se referem ao primeiro ano de operação do sistema (que se inicia com 132 transformadores em operação no campo e um estoque de 5 reservas), enquanto os indicadores da Tabela 2 correspondem a valores estacionários, i.e., consolidados após um longo tempo de operação.

De acordo com a teoria de processos de Markov, as probabilidades estacionárias (e os demais indicadores calculados a partir das mesmas) são independentes do tempo e da condição inicial do sistema. Assim, para que o modelo proposto reproduza os valores da Tabela 2, é necessário definir um período de análise suficientemente longo para que a influência da condição inicial sobre os indicadores de confiabilidade do sistema possa ser desprezada.

A Tabela 3 apresenta os valores de indisponibilidade e EENS obtidos pelo algoritmo proposto, considerando diferentes períodos de análise. Note que com o aumento da duração do período de análise, os indicadores obtidos por simulação tendem a se aproximar dos calculados analiticamente (Tabela 2). Este resultado mostra que o modelo de Markov é um caso particular do cronológico, quando: 1) os transformadores têm a mesma taxa de falha; 2) os tempos de funcionamento e reposição do estoque são exponenciais; e 3) o período de análise é longo o bastante para atingir a fase estacionária das probabilidades.

Tabela 3. Simulações para Reproduzir o Modelo de Markov

Período de Análise (anos)	Indisponibilidade (horas/ano)	EENS (MWh/ano)
5	18,93	169,72
10	25,72	230,08
20	28,90	264,80
40	32,23	298,68
80	33,36	308,62

O modelo cronológico pode reproduzir resultados de metodologias analíticas, o que valida o modelo proposto. Contudo, a representação cronológica é mais abrangente, pois possibilita a avaliação de confiabilidade sob condições proibitivas às metodologias anteriores. Com isso, é possível tratar adequadamente: 1) parques de transformação formados por equipamentos com

diferentes taxas de falha e tempos de vida não exponenciais; 2) sistemas em expansão, onde o número de transformadores em operação e a carga aumentam no decorrer do período de análise; e 3) situações que envolvem ampliações do estoque, com inclusão de novos transformadores reservas em diferentes momentos. Essas características são ilustradas a seguir, através de experimentos numéricos.

### 3 Experimentos Numéricos

O sistema utilizado nos exemplos anteriores é também considerado nas aplicações desta seção, as quais estão descritas resumidamente na Tabela 4. Em todos os casos, admite-se um período de análise de 20 anos (de janeiro de 2014 a dezembro de 2033), e tempos de reposição do estoque (compra de um transformador novo) com distribuição uniforme entre 11 e 13 meses.

Tabela 4. Descrição Resumida dos Casos Analisados

Caso	Descrição
1	Referência
2	Crescimento da carga e expansão do sistema
3	Ampliação do estoque – Alternativa 1
4	Ampliação do estoque – Alternativa 2

O Caso 1 representa a situação de referência, onde o sistema possui 132 transformadores de 16 MVA no campo e um estoque de 5 reservas. Embora a metodologia proposta seja capaz de considerar tempos de funcionamento não exponenciais, todos transformadores (atuais e novos) são admitidos na vida útil, implicando em tempos de funcionamento exponenciais, cuja taxa de falha é de 0,011 falha/ano. A carga total do sistema (963 MW) é considerada igualmente dividida entre os transformadores.

Os resultados de custos e indicadores de confiabilidade deste caso, bem como para os demais, estão apresentados na Tabela 5. Os custos mostrados nesta tabela foram obtidos considerando o preço de aquisição de um transformador reserva novo igual a R\$ 1.000.000,00, amortizado ao longo de 35 anos a uma taxa de 12% ao ano. A tarifa de energia e o custo unitário de interrupção são, respectivamente, 204,60 e 1500,00 R\$/MWh.

Tabela 5. Custos do Sistema (1000 R\$) e Indicadores de Confiabilidade

Caso	Investimento	Operação	Soma	Indisponibilidade (h/ano)	EENS (MWh/ano)
1	0,00	9.834,22	9.834,22	32,43	288,46
2	0,00	13.474,04	13.474,04	40,34	395,23
3	410,74	5.335,99	5.746,73	16,11	156,62
4	821,49	3.315,80	4.137,29	10,19	97,26

No Caso 2 é considerada a entrada em operação de 15 novos transformadores em 2023 e impõem-se, ao sistema, acréscimos anuais de carga equivalentes a 1% do montante de 2014. Nesse caso, a EENS passa ocupar um patamar mais elevado, já que o número de equipamentos expostos à falha aumenta de 132 para 147 e o estoque é mantido em 5 unidades.

Os Casos 3 e 4 correspondem a duas alternativas para ampliação do estoque em 2022, com a inclusão de 1 e 2 novos reservas, respectivamente. A EENS reduz com a adição do 6º transformador reserva ao estoque, demonstrando o efeito do reforço do estoque sobre a confiabilidade.

Os resultados da Tabela 5 mostram que os investimentos no 6º e 7º reservas são viáveis, já que a diminuição do custo de operação supera o valor investido no reforço do estoque. Outras opções de ampliação do estoque também poderiam ser testadas, em busca de uma solução de menor custo. A impossibilidade de testar infinitos valores pode não, necessariamente, atingir o

melhor resultado. Em suma, a simulação não gera a solução ótima, apenas faz comparação das alternativas resultantes.

Nesse sentido, com o objetivo de complementar o modelo de simulação, na próxima seção é apresentado um algoritmo de otimização baseado em técnicas metaheurísticas para a avaliação da estratégia ótima para a composição da reserva técnica. Desta forma, será possível determinar não somente o número de transformadores reservas no estoque, mas também o ano em que estes devem ser incluídos. A obtenção de um conjunto de “boas” soluções (i.e., com baixo custo total e desempenho aceitável) para a composição do estoque permitirá que o planejador escolha a alternativa mais conveniente para sua empresa.

## 4 Otimização do Estoque

### 4.1 Considerações sobre Otimização

De acordo com April et al. (2006), uma vez desenvolvido um modelo de simulação para representar um sistema, pode-se encontrar a melhor configuração entre um conjunto de possíveis escolhas. Quando os processos são complexos e a configuração depende de algumas decisões estratégicas, a aplicação da abordagem de tentativa e erro terá um sucesso bem limitado.

Para determinar a melhor solução, devem-se empregar ferramentas de otimização. Segundo Banks (2005), a simulação responde a questões do tipo “e se” e a otimização busca os valores ótimos para as variáveis de decisão do sistema, que permitem a minimização ou maximização de uma função objetivo (ou medida de desempenho).

Na interação entre simulação e otimização, a última deve ser vista como uma ferramenta complementar à simulação. Fu (2002) estabelece que, neste processo, a otimização fornece as variáveis de uma possível solução (*inputs*) à simulação; esta, após o processo de simulação, fornece respostas (*outputs*) para a situação proposta, que retornam à otimização. A otimização gera novas variáveis, utilizando técnicas específicas, que serão novamente testadas pela simulação. Este ciclo é repetido até a sua parada, definida de acordo com o método considerado. O modelo de otimização proposto neste trabalho é baseado em técnicas metaheurísticas para fazer o dimensionamento de transformadores reservas de subestações, definindo o momento e a quantidade adequada de equipamentos a serem adicionados a um estoque previamente existente.

Várias técnicas metaheurísticas têm sido empregadas para resolver problemas complexos, com características dinâmicas e estocásticas. Dentre essas técnicas podem ser citadas: Busca Tabu (*TS - Tabu Search*) (Glover, 2003), Algoritmos Genéticos (*GA - Genetic Algorithms*) (Goldberg, 1989), Estratégias de Evolução (*ES - Evolution Strategies*) (Schwefel, 1975), Evolução Diferencial (*DE - Differential Evolution*) (Storn, R. e Price, K. 1995), Otimização por Colônias de Formigas (*ACO - Ant Colony Optimization*) (Dorigo e Stützle, 2004) e Otimização por Enxame de Partículas (*PSO - Particle Swarm Optimization*) (Kennedy e Eberhart, 1995). As metaheurísticas, em geral, são aplicadas para resolver problemas de otimização muito complexos, onde uma solução ótima não é necessariamente o objetivo, mas sim, um conjunto de boas soluções.

Os modelos baseados em metaheurísticas utilizam técnicas de otimização que realizam um processo de geração, avaliação e seleção de alternativas para a solução do problema. De acordo com Glover (2003) as metaheurísticas são métodos de solução que implementam uma interação entre processos de melhoria local e estratégias de nível superior para criar um processo capaz de escapar de ótimos locais e realizar uma pesquisa robusta no espaço solução.

### 4.2 Programa de Otimização via Simulação Monte Carlo Cronológica e Metaheurística ES

O programa de otimização via SMC cronológica utiliza a metaheurística *ES*. A *ES* procura a solução ótima de um problema, por meio da evolução de uma população (conjunto de soluções possíveis). De acordo com Schwefel (1975), a cada geração, ou iteração, as sequências (indivíduos) sofrem mutações e são avaliadas pela função objetivo do problema e os melhores indivíduos são selecionados para serem os progenitores da próxima geração. Como em cada geração os

melhores indivíduos são selecionados e procriados, espera-se que as futuras gerações sejam indivíduos com bons desempenhos, e conseqüentemente, os melhores indivíduos são selecionados como solução do problema.

Os seguintes valores foram atribuídos aos parâmetros da metaheurística *ES*: amplitude de mutação  $\sigma = 0,4$  e número máximo de gerações  $N_{GER} = 50$ . O tamanho da população foi definido em 40 indivíduos e sua seqüência varia conforme o período analisado (expresso em anos). A matriz população representa as opções de quantidade de transformadores e cada elemento da matriz (gene) representa o número de transformadores que será incorporado ao estoque em um determinado ano. A escolha dos parâmetros foi baseada em testes empíricos.

O programa de otimização foi desenvolvido usando o ambiente MATLAB. O algoritmo desenvolvido consta dos seguintes passos:

1. Gerar aleatoriamente a população (progenitora) composta de  $\mu$  indivíduos (seqüência);
2. Replicar (clonar) os indivíduos progenitores;
3. Aplicar mutação nos indivíduos clonados, respeitando as restrições impostas;
4. Agrupar em uma matriz, o número total de seqüências progenitoras ( $\mu$ ) e descendentes ( $\lambda$ );
5. Analisar a matriz população e eliminar seqüências semelhantes, para garantir a seleção de uma população de boa qualidade e diversificada;
6. Avaliar a população inicial, através do algoritmo de SMC cronológica;
7. Selecionar a metade da população  $(\mu+\lambda)/2$ , as quais devem fazer parte da população progenitora da próxima geração. Esta seleção deve escolher as melhores seqüências que minimizem a função objetivo (Eq. 9);
8. Se o número máximo de gerações não for atingido, uma nova geração é iniciada (voltar ao passo 2). Senão, o processo de busca é encerrado e as melhores seqüências são selecionadas.

Para o problema de dimensionamento ótimo do estoque, a população é gerada aleatoriamente através da função “*rand*”. Após aplicar mutação nos indivíduos que compõem a população inicial, a matriz resultante passa a ser constituída de oitenta indivíduos formados pelas seqüências progenitoras ( $\mu$ ) e descendentes ( $\lambda$ ). Nesta etapa, é feita uma verificação desta matriz, onde se eliminam as opções semelhantes e geram-se novas opções para manter o tamanho da população.

Esta matriz é constituída pelas opções de estoque e todas são analisadas através do algoritmo de SMC cronológica. Após esta análise, é fornecida uma matriz solução composta pelos índices de confiabilidade e custos, ordenada do menor para o maior custo. As quarenta primeiras opções são selecionadas para compor a população progenitora da próxima geração. Novamente, aplica-se mutação nos indivíduos, agrupa-se a população progenitora e descendente em uma matriz, eliminam-se as opções repetidas, avaliam-se as opções e obtém-se a matriz resultante. Todo este processo é finalizado quando o número máximo de gerações é alcançado. Também foi criado um vetor para armazenar as melhores opções de estoque do período analisado e, se a mesma opção for encontrada dez vezes, o processo de busca é encerrado e as melhores seqüências analisadas são selecionadas. Este mecanismo adotado é definido como critério de parada do programa de otimização.

#### 4.3 Exemplo de Aplicação

O modelo de otimização proposto foi utilizado no sistema-teste apresentado na Subsecção 2.5 para definir a melhor opção de número de transformadores para compor o estoque, sob as condições de crescimento de carga e expansão do sistema definidas no Caso 2, para o período de análise especificado. Admite-se um estoque inicial de 5 transformadores reservas e um acréscimo de no máximo 5 unidades no período de análise.

O programa de otimização via SMC foi executado em um computador com processador Intel® Core TM I7 de 3,4GHz com 8 núcleos de processamento, 4GB de RAM e sistema operacional Windows 7 (64 bit). O programa foi desenvolvido usando o ambiente MATLAB, empregando-se computação paralela. Fez-se uso da biblioteca *Parallel Computing Toolbox* (PCT) para configurar o MATLAB em paralelo e utilizar os oito núcleos da máquina. A paralelização con-

siste em realizar várias tarefas em múltiplos processadores simultaneamente, reduzindo o tempo de processamento.

Para paralelizar o algoritmo de otimização, utilizou-se a função *parfor* do MATLAB, isto é, foi feita uma substituição do *loop for* por *parfor*, na parte do código que será processado em paralelo. O resultado da execução de um *loop parfor* é o mesmo que o de um *loop for* padrão (não paralelizado). Mas, devido ao fato de vários núcleos efetuarem cálculos computacionais simultaneamente no mesmo ciclo, um ciclo *parfor* pode fornecer um desempenho significativamente melhor do que seu análogo *loop for* (MathWork, 2014).

Durante o processo de simulação, a matriz com as opções de estoque foi analisada com  $\beta < 0,1$ , mas, para garantir que o sistema tenha uma boa convergência, no final do processo, as cinco melhores opções encontradas são novamente analisadas pelo algoritmo de simulação, especificando o valor do coeficiente de variação  $\beta < 0,03$ .

Para o problema proposto, o programa de otimização apresenta as cinco melhores opções, considerando o menor custo total possível para o investimento. Os resultados da Tabela 6 foram obtidos em 38 gerações e o tempo de processamento foi de 4,8 horas. Apesar de em todas as alternativas terem sido adicionados 5 novos transformadores, os custos resultantes são diferentes entre si, mostrando que a especificação do momento da inclusão dos reforços tem fundamental importância nos custos de investimento e operação apresentados na Tabela 7.

Tabela 6. Melhores Opções de Composição de Estoque

Opção \ Ano <sup>†</sup>	Ano											
	2015	2018	2019	2022	2023	2024	2025	2027	2030	2031	2032	2033
1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
3	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
4	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
5	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1

<sup>†</sup> A tabela mostra somente os anos em que novos reforços são incluídos

Tabela 7. Custos Esperados (1000 R\$) e Indicadores de Confiabilidade

Opções	Investimento	Operação	Soma	R(t)	EENS do período (MWh)
1	1.681,73	577,14	2.258,87	0,980	338,58
2	1.603,57	656,79	2.260,36	0,977	385,31
3	1.656,55	615,18	2.271,73	0,976	360,89
4	1.739,78	593,71	2.333,49	0,980	348,30
5	1.723,76	646,78	2.370,54	0,979	379,43

No entanto, os índices de confiabilidade apresentados na Tabela 7 diferem muito pouco entre si, indicando que todas as opções possuem praticamente os mesmos níveis de confiabilidade. Ao considerar os custos, apesar de uma alternativa ter um custo menor, quando comparada à outra, nota-se que esta diferença é pequena. Assim, cabe aos gestores do sistema decidir, dentre as alternativas de composição de estoque avaliadas, a que deverá ser implementada.

## 5 Conclusões

Os desenvolvimentos descritos neste artigo permitem concluir que o método proposto é adequado à análise de confiabilidade de parques de transformação reais, onde as hipóteses das formulações analíticas podem restringir sua aplicação. A capacidade de modelar fatores como ex-

pansão do sistema, crescimento da carga e aumento do estoque, torna o método proposto uma ferramenta útil na difícil tarefa de dimensionar a reserva técnica de transformadores.

No que se refere à modelagem do tempo de vida dos transformadores, desenvolvimentos vêm sendo realizados com intuito de considerar a idade, a deterioração do material isolante e o efeito de curtos-circuitos e outras ocorrências capazes de influenciar a durabilidade dos equipamentos. Isto permitirá a determinação das distribuições de probabilidade da vida restante de cada transformador, para substituir o modelo teórico exponencial adotado neste trabalho.

A inserção do programa de análise de confiabilidade e custos em um ambiente de otimização baseado em Estratégias de Evolução tornou possível obter o conjunto das melhores soluções para a composição do estoque ao longo de um horizonte de tempo especificado, permitindo que o planejador escolha a alternativa mais conveniente para sua empresa. Embora neste trabalho a otimização de estoques tenha sido obtida via Estratégias de Evolução, outras técnicas metaheurísticas (e.g., Evolução Diferencial, etc.) foram também testadas com sucesso. Finalmente, uma comparação entre essas técnicas será alvo de um trabalho futuro.

### Referências Bibliográficas

- April, J., Better, M., Glover, F., Kelly, J. e Laguna, J. M.** (2006). “Enhancing Business Process Management with Simulation Optimization”, Proceedings of the Winter Simulation Conference.
- Banks, J.** (2005). “Discrete-event System Simulation”. 4<sup>th</sup> ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Billinton, R. e Allan, R.N.** (1992). Reliability Evaluation of Engineering Systems, NY, Plenum, 2<sup>nd</sup> ed.
- Chowdhury, A. A. e Koval, D. O.** (2005). Development of Probabilistic Models for Computing Optimal Distribution Substation Spare Transformers. Ind. and Com. Power Syst. Technical Conf., IEEE: 204-211.
- Costa, J. G. C. e Leite da Silva, A. M.** (2008), Monte Carlo Simulation to Assess the Optimum Number of Distribution Spare Transformers. 10th Int. Conference on PMAPS – Probability Methods Applied to Power Systems, May 25-29, Rincón, Puerto Rico.
- Dorigo, M. e Stützle, T.** (2004). “Ant Colony Optimization”, The MIT Press, A Bradford Book, England.
- Fu, M. C.** (2002). “Optimization for Simulation: Theory versus Practice”, Journal on Computing, vol.14.
- Glover, F. e Kochenberger, G. A.** (2003). Handbook of Metaheuristics. Kluwer Academic Publishers.
- Goldberg, D.E.** (1989) “Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning”, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Hamoud, G.** (2011), Assessment of Spare Transformer Requirements for Distribution Stations. IEEE Trans. on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 174-180.
- Hamoud, G.** (2012), Use of Markov Models in Assessing Spare Transformer Requirements for Distributions Stations. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 2, pp. 1098-1105.
- Kennedy, J. e Eberthart, R.C.** (1995) “Particle swarm optimization”, neural networks, Proceedings, IEEE International Conference, Vol. 4, pp. 1942-1948, Dec. 1995.
- Leite da Silva, A. M., Costa, J. G. C. e Chowdhury, A. A.** (2010), Probabilistic Methodologies for Determining the Optimal Number of Substation Spare Transformers. IEEE Trans. on Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 68-77.
- Li, W., Vaahedi, E. e Mansour, Y.** (1999). Determining Number and Timing of Substation Spare Transformers using a Probabilistic Cost Analysis Approach. IEEE Trans. on Power Delivery, EUA, vol. 14, no. 3, pp. 934-939.
- MathWorks** (2014). “Parallel Computing Toolbox User’s Guide”, The MathWorks, Natick, MA.
- Mielczarski, W., Khan, M. E., e Sugianto, L. F.** (1995), Management of Inventory to Reduce Outages in Supply Feeder. EMPD’95 Int. Conf. on Energy Management & Power Delivery, vol. 1, pp. 222-227.
- Rubinstein, R.Y.** (1991). Simulation and the Monte Carlo Method, J. Wiley and Sons, New York.
- Schwefel, H.** (1975). “Evolutions Strategie und Numerische Optimierung”, Dissertation, Technische Universität Berlin, Germany.
- Storn, R. e Price, K.** (1995). “Differential Evolution – A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces”, Technical Report TR-95-012, ICSI, March 1995.