



## **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

### **ESTRATÉGIA DE SUBSTITUIÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS BASEADA EM RISCOS E CUSTO DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO NO SETOR DE GERAÇÃO HIDROELÉTRICA BRASILEIRO**

**MATHEUS AUGUSTO LEMOS VIEIRA(1); GUSTAVO LUÍS SOARES(2); ADRIANA DE CASTRO PASSOS MARTINS(1)**  
**CEMIG GERACAO E TRANSMISSAO S.A(1); PUC MINAS(2)**

#### **RESUMO**

O informe técnico apresenta uma proposta de estratégia de substituição ótima de equipamentos baseada em riscos e custo do ciclo de vida. O case foi aplicado no setor de geração hidroelétrica brasileiro e, por meio de otimização (algoritmo genético), permite a definição, em dado período, dos equipamentos candidatos à substituição, considerando a minimização dos riscos técnicos, limitado aos recursos orçamentários disponíveis e atendimento aos requisitos regulatórios. A utilização da computação evolucionária implementada foi necessária devido à complexidade e esforço computacional requerido a um problema de otimização combinatorial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gestão de Ativos, Otimização do Planejamento de Investimento, Geração de Energia, Algoritmo Genético

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

Desde o século XIX até os dias atuais, a matriz elétrica brasileira tem tido como predominante a geração hidráulica. De acordo com a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), em 2017, essa fonte representou 65% da energia gerada no Sistema Interligado Nacional (SIN). E, mesmo com o crescimento da geração por outras fontes previsto para os próximos 10 anos, o Plano Decenal de Expansão de Energia ainda projeta para 2030 uma participação da geração hidráulica em torno 58% da matriz elétrica nacional. Portanto, em qualquer cenário presente ou futuro, o estudo e otimização da gestão relacionada aos ativos de geração hidráulica, considerando o equilíbrio entre o atendimento aos requisitos regulatórios, operacionais e a sustentabilidade financeira dos atores envolvidos com a geração de energia elétrica. Neste contexto, é fundamental e mandatório para os agentes definirem uma estratégia para atendimento ao retorno financeiro requerido pelos acionistas, controle dos riscos associados e atendimento dos requisitos técnicos e regulatórios. Para tal, empresas ativo intensivas, cujo negócio está fundamentado na operação de ativos físicos, têm buscado referências nas boas práticas de gestão, integradas, total ou parcialmente, às normas ISO 31.000 (Gestão de Riscos), ISO 55.000 (Gestão de Ativos) e aos guias do Institute of Asset Management (IAM), com sede em Londres. Dessa forma, em um ambiente regulado, o planejamento financeiro ao longo do ciclo de vida dos ativos torna-se fundamental e complexo devido a diversos fatores, como o volume, diversidade, e complexidade das informações provenientes de registros contábeis, financeiros e técnicos de cada agente. E, dentre as diversas e importantes ações que compõem um ciclo de vida de um ativo/equipamento, encontra-se a necessidade de planejar a substituição dos equipamentos, seja por envelhecimento ou obsolescência ou seja, final de vida útil técnica.

Neste contexto, foi desenvolvida uma proposta de estratégia, por meio de otimização - algoritmo genético, que permite a definição, em dado período, dos equipamentos candidatos à substituição, considerando a minimização dos riscos técnicos, maximização da utilização dos recursos orçamentários disponíveis e atendimento aos requisitos regulatórios. A utilização da computação evolucionária, implementada através dos algoritmos genéticos, foi necessária devido à complexidade e esforço computacional requerido por um problema de otimização combinatorial.

O presente artigo faz parte do escopo do P&D 0651- Plataforma de Gestão de Ativos da Cemig Geração e Transmissão.

#### **2.0 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

##### **2.1 Aspectos regulatórios**

###### **2.1.1 Medida Provisória Nº 579 de 2012**

Após a desverticalização do setor de energia elétrica ocorrida em 2004, ocorreram alterações setoriais e regulatórias através de resoluções normativas da ANEEL e projetos de lei, mas uma das mais drásticas e que acarretou em profundas alterações nas empresas e no setor de geração e transmissão foi a Medida Provisória Nº 579, promulgada

em 11 de setembro 2012. A medida provisória que posteriormente foi transformada na Lei 12.783, publicada em 11 de janeiro de 2013, estabeleceu novos critérios para renovação das concessões de geração e transmissão, tendo como principal objetivo a modicidade tarifária. Em linhas gerais, as empresas geradoras de energia, auferiam sua receita majoritariamente da comercialização de energia, seja no ACR, ACL ou vendas no mercado de curto prazo ("SPOT"). Em contrapartida, de acordo com a Lei 12.783, para que os ativos em final de concessão pudessem tê-la prorrogada por mais um período, o gerador deveria aceitar que a receita oriunda dos ativos, não seria obtida por meio da comercialização de energia, sendo proposta uma nova modalidade de remuneração, a Receita Anual de Geração (RAG), que remunerava somente a operação e manutenção dos ativos.

### 2.1.2 Alterações e impactos nas receitas de uma geradora afetada pela Lei 12.783/2013

Para empreendimentos de geração com contratos de concessão, ainda válidos, renovados sob os critérios da Lei 9.075/1995, ou sob primeira concessão, suas respectivas receitas são provenientes da comercialização de energia (ACL ou ACR). No entanto, o artigo 1º da Lei 12.783/2012, estabeleceu que a renovação da concessão dos ativos de geração elétrica, se daria através do aceite, por parte das concessionárias, da cotização da garantia física às concessionárias e permissionárias de serviço público de distribuição. Dessa forma, para que os concessionários fossem remunerados, foi definido a RAG (Receita Anual de Geração), que anualmente é publicada através de resolução normativa e é composta pela GAG O&M (Custos da Gestão dos Ativos de Geração), RBO (Retorno de Bonificação pela Outorga da Concessão) e encargos setoriais vigentes.

A GAG-O&M, cujos valores são destinados à cobertura dos custos relacionados à operação e manutenção dos ativos, e para cobertura regulatória dos investimentos em substituição de equipamentos, seja por final de vida útil, obsolescência ou critério técnico estabelecido pelas áreas de planejamento da operação e manutenção. Para o presente trabalho, a GAG (O&M) possui especial importância visto que a correta alocação de recurso é fundamental para atendimento aos critérios de qualidade do serviço, regulatórios, segurança e equilíbrio com as expectativas de retorno financeiros estabelecidos pelos administradores.

### 2.1.3 Níveis de desempenho e performance sob a ótica regulatória

Conforme as atribuições definidas na estrutura setorial vigente é dever da ONS o controle dos concessionários de geração e transmissão ligados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e compete a ANEEL à regulação e fiscalização dos agentes setoriais. Em relação aos players de geração, no âmbito do trabalho, foram observados os requisitos e padrões de qualidade descritos nas diversas resoluções normativas da Aneel, tais como: 688/2003, 614/2014, 818/2018 e os sub-módulos 16 e 25 da ONS.

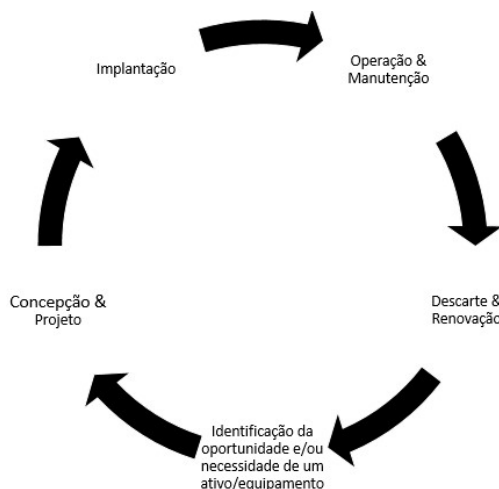
Considerando o escopo de usinas do trabalho, e seus impactos na receita das geradoras, foram observados principalmente: 1) FID (Fator de Disponibilidade); 2) MRGF (Mecanismo de Redução de Garantia Física); 3) AJI (Ajuste por Indisponibilidade)

## 2.2 Gestão de ativos

### 2.2.1 Ciclo de vida de um ativo

Segundo a norma australiana *AS-4536 Life Cycle Cost* e diversas outras publicações, o ciclo de vida de um ativo é definido como o intervalo de tempo entre o reconhecimento de uma necessidade ou oportunidade da implantação de um ativo ou sistema de ativos até a sua disposição final. Esse ciclo, normalmente é caracterizado por uma série de etapas sequenciais, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Ciclo de vida de um ativo



Fonte: Adaptado de NBR ISO 55.000

A decisão de renovação ou substituição de determinado ativo é definida a partir de análise do planejamento e dos objetivos estratégicos de cada agente, portanto, pode-se originar da necessidade de incremento de capacidade, do atendimento à requisitos de qualidade, risco ou desempenho, de questões econômico-financeiras e do final de vida útil técnico. No contexto do presente trabalho, foram analisados os aspectos de riscos, que englobam análises técnicas, regulatórias e financeiras para a decisão de substituição.

### 2.2.2 Custo do Ciclo de Vida e Custo Anual Uniforme Equivalente

Os estudos dos custos do ciclo de vida dos ativos, mais comumente denominados como LCC (Life Cycle Cost), objetivam obter o custo total em todas as fases do ciclo de vida de um ativo ou sistemas de ativos, incluindo os custos diretos, indiretos, recorrentes (periódicos) e não recorrentes.

De acordo com Newnan *et al.* (2004), um paralelo pode ser feito com os seres humanos, que são concebidos, passam por um estágio de crescimento, alcançam seu pico de maturidade e último estágio de declínio. Em cada uma dessas fases, incorrem custos de diferentes naturezas e propósitos. Os benefícios para a sua elaboração e utilização são inúmeros, de acordo com Hastings *et al.* (2010) e AS-4536 *Life Cycle Cost* a metodologia pode ser utilizada para: 1) processos decisórios para aquisições e análises de diferentes alternativas; 2) definição de orçamentos de operação e manutenção e na gestão do ciclo de vida de equipamentos; 3) projeções de resultados com base nos custos futuros estimados; 4) processos de substituição, alienação ou desativação.

Em processos decisórios acerca de substituição de equipamentos, faz-se necessário a comparação entre custos de ciclo de vida de diferentes equipamentos candidatos em diferentes períodos de análise. Dessa forma, desenvolveu-se o cálculo do CAUE (Custo Anual Uniforme Equivalente), que possibilita a determinação de períodos ótimos de substituição de equipamentos, e comparação de diferentes equipamentos ou tecnologias. De acordo com Sullivan *et al* (2003), o cálculo pode ser formulado matematicamente da seguinte forma:

$$CAUE_k = I \left( \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} \right) - S \left( \frac{i}{(1+i)^k - 1} \right) + E \quad (2.1)$$

Sendo:

$$E = \left[ \sum_{j=1}^k E_j \left( \frac{i}{(1+i)^j} \right) \right] \times \left( \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} \right) \quad (2.2)$$

k – Ano base escolhido para cálculo do CAUE; i – Taxa de retorno de referência; I – Investimento Inicial; S – Valor residual no final do período de estudo; E – Custos totais anuais equivalentes; E<sub>j</sub> – Custo total no ano j.

A metodologia do custo anual uniforme equivalente possibilita o entendimento e impacto das variáveis de entrada na composição da vida econômica de um ativo. E a partir respectivo cálculo pode-se obter o momento ótimo ou ideal para substituição sob a ótica econômico-financeira.

### 2.3 Otimização e algoritmos genéticos – Aplicação em Equipamentos de Usina Hidrelétrica

Desenvolveu-se uma proposta para definição da estratégia ótima de substituição de equipamentos, baseada em riscos e custos do ciclo de vida. Em linhas gerais, considerando como n um número finito de equipamentos de uma usina hidrelétrica, busca-se a melhor estratégia ou configuração entre substituir ou manter cada equipamento, em dado período, considerando o critério de minimização de risco e atendimento à restrição orçamentária. Portanto, observa-se que o problema é de otimização combinatorial, com número de possibilidades de solução da ordem de 2<sup>n</sup>. Para sua solução, definiu-se pela utilização de algoritmos genéticos.

De acordo com Whitley (1995) os algoritmos genéticos são uma família de modelos computacionais inspirados nos mecanismos da genética e seleção natural estudados e propostos por Darwin (1909). Foram propostos por Holland *et al.* (1992), em seus estudos de como os fenômenos naturais de adaptação poderiam ser importados para sistemas de computadores. O método proposto por Holland, de acordo com Mitchell (1998), inicia-se de uma população inicial (aleatória), composta por uma série de indivíduos (cromossomos) formados por uma cadeia de genes codificados, normalmente, por *strings* de “0” e “1” em um ambiente com recursos limitados. E o processo de competição nesse ambiente escasso, leva à sobrevivência dos indivíduos mais “fortes”, medidos pela função de desempenho, causando um aumento da aptidão da população nas próximas gerações, conforme descrito em Eiben e Smith (2015).

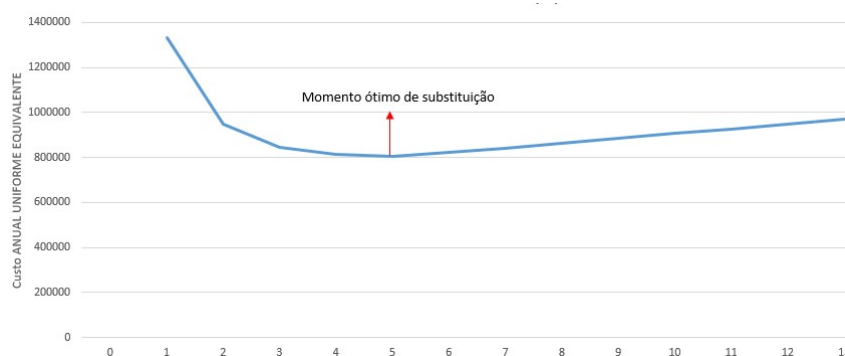
### 3.0 METODOLOGIA

A metodologia proposta encontra-se dividida em duas partes principais: 1) Definição dos equipamentos candidatos à substituição; 2) Otimização, através da aplicação de algoritmos genéticos, da estratégia de substituição de equipamentos.

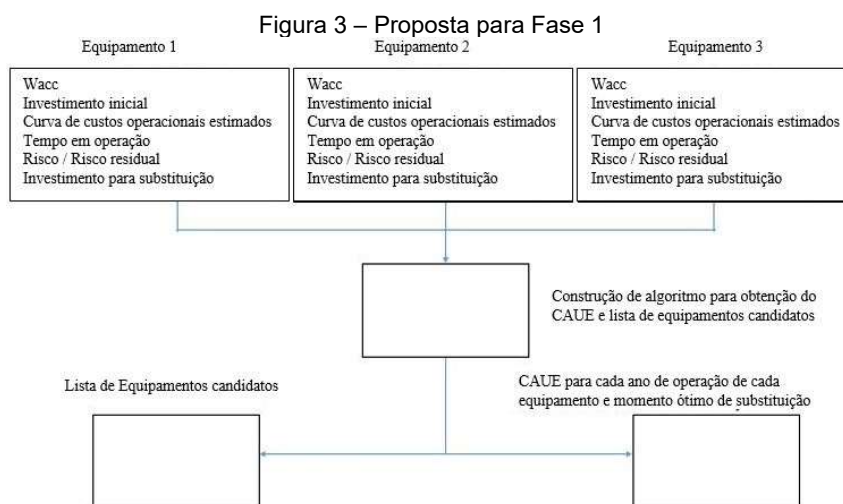
### 3.1 Fase 1 – Candidatos à substituição – LCC

A primeira etapa da metodologia é a definição da condição de um equipamento em relação ao momento ótimo de substituição. Caso tenha ultrapassado o CAUE mínimo, ou momento ótimo em relação a vida econômica, torna-se um candidato à substituição. Para isso, é necessário o levantamento dos custos relacionados ao investimento inicial e os custos operacionais decorrentes de manutenção e operação. Em seguida, define-se a taxa de retorno de referência para análise, o VPL (Valor Presente Líquido) do fluxo de desembolso estimado e, em seguida, obtém-se o CAUE (Custo Anual Uniforme Equivalente) para cada ano. O momento ótimo de substituição é o primeiro ponto de inflexão na curva do CAUE. A Figura 2 exemplifica a vida econômica de um equipamento obtida pela metodologia do CAUE. Observa-se que o ponto de inflexão ocorre próximo ao quinto ano em operação do ativo em questão.

Figura 2 – Vida econômica de um equipamento



Para a fase 1 desenvolveu-se modelagem, conforme a Figura 3, que a partir dos dados de entrada de diversos equipamentos, obtém-se como saída uma lista de equipamentos candidatos à substituição, o CAUE para todos os anos de operação de cada equipamento e o seu respectivo momento ótimo de substituição. Na proposta, optou-se por não levar à fase 2 de otimização, equipamentos em estágios anteriores ao ponto mínimo pelo fato do custo de capital empregado ainda ser relevante para o CAUE.



### 3.2 Fase 2 – Aplicação de otimização

Após a determinação dos equipamentos candidatos à substituição inicia-se a segunda fase da estratégia para substituição ótima de equipamentos. Para cada equipamento candidato à substituição, são inseridas as informações relacionadas ao custo da eventual substituição, risco atual e risco remanescente em caso de substituição.

Em relação ao risco atual e remanescente, vale ressaltar que existem diversas metodologias para a quantificação, sendo necessária cada empresa determinar os parâmetros de entrada para obtenção do risco. Para empresas do setor elétrico de geração hidroelétrica, normalmente leva-se em conta fatores como: 1) Risco regulatório (associado ao FID, MRGF e AJI); 2) Risco técnico – condição atual do equipamento e projeção de deterioração; 3) Histórico de falhas e os respectivos mecanismos associados; 4) Condição operacional – histórico dos fatores operacionais que aceleram mecanismos de deterioração, tais como: temperatura, número de ciclos de operação, fator de utilização e eventuais sobrecargas; 5) Redundância – equipamentos em *stand-by* para execução da mesma função; 6) Estoque – verificação da existência de estoque do mesmo equipamento ou componentes menores; 7) Obsolescência – equipamento em final de vida útil com dificuldade para obtenção de peças de reposição; 8) Classificação de criticidade – importância sistêmica do equipamento; 9) Probabilidade de eventual falha grave.

O risco pode ser formulado matematicamente conforme 3.1:

$$R_t = Pr \times Imp \quad (3.1)$$

Sendo:

Pr – Probabilidade do risco acontecer;

Imp – Impacto do risco;

Para a classificação de risco, considerou-se para cada equipamento, uma faixa atribuída de risco de 1 a 25, provenientes da multiplicação entre o impacto do risco e a probabilidade de ocorrer o risco. Desta forma, pode-se compor uma matriz (5x5) associada a um conjunto de equipamentos conforme o Quadro 1 e a Figura 4.

Quadro 1 – Classificação de risco

| Risco |             | Valor |
|-------|-------------|-------|
| MA    | Muito alto  | 5     |
| A     | Alto        | 4     |
| MA    | Médio       | 3     |
| B     | Baixo       | 2     |
| MB    | Muito baixo | 1     |

Figura 4 – Matriz de risco quantitativa

| Probabilidade<br>do risco | Impacto do risco |    |    |    |    |
|---------------------------|------------------|----|----|----|----|
|                           | 5                | 10 | 15 | 20 | 25 |
|                           | 4                | 8  | 12 | 16 | 20 |
|                           | 3                | 6  | 9  | 12 | 15 |
|                           | 2                | 4  | 6  | 8  | 10 |
|                           | 1                | 2  | 3  | 4  | 5  |

Considerando os equipamentos selecionados na etapa A, e a classificação de risco na etapa B, propõe-se que sejam otimizadas, as estratégias de substituição de equipamentos, considerando o menor risco para o sistema e considerando às restrições orçamentárias.

Desta forma, similarmente ao problema proposto em Nahas (2005) e Rhein *et al* (2016 e 2017), define-se um sistema composto por n equipamentos. Cada equipamento possui uma alternativa de planejamento a ser determinada, manter ou substituir, com alteração dos parâmetros de risco e os custos associados à decisão. Para entendimento da formulação matemática, será apresentada a notação dos parâmetros utilizados: n – Número de equipamentos eletromecânicos associados; m – Número de estratégias de planejamento; b – Restrição orçamentária;  $CAPEX_{i,j}$  – Desembolso financeiro de investimento relacionado a substituição do equipamento i;  $R_{i,j}$  – Risco técnico do equipamento i considerando a estratégia j.

Especificou-se a variável binária de decisão  $X_{i,j}$  (com  $i=1,2,...,n$  e  $j=1,...,m$ ) da seguinte forma:

$$X_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se a estratégia j for selecionada para o equipamento i;} \\ 0 & \text{se a estratégia j não for selecionada para o equipamento i;} \end{cases}$$

Considerando as notações estabelecidas, estabelece-se a seguinte formulação matemática para o problema:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j} \times x_{i,j} \quad (3.2)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m CAPEX_{i,j} \times x_{i,j} \leq b \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{i,j} = 1, i = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

$$X_{i,j} = \{0,1\} \forall j = 1,2, \dots, m \text{ e } i = 1,2, \dots, n \quad (3.5)$$

De acordo com (3.2) o problema tem como objetivo a minimização dos riscos relacionados aos n equipamentos e suas respectivas estratégias. A restrição (3.3) representa as restrições orçamentárias relacionadas às estratégias de substituir ou manter os equipamentos. A restrição (3.4) define que ao menos 1 estratégia deverá ser definida para cada equipamento. A restrição (3.5) define a variável binária de decisão. Quando uma solução satisfaz as restrições do problema, é considerada uma solução viável.

Considerando o problema de otimização combinatorial, classificado como NP-hard, desenvolveu-se proposta de solução através de um algoritmo genético padrão, baseado nas premissas e modelagem matemática descritas, bem como às restrições inerentes ao problema. A única diferença em relação ao algoritmo padrão, é a não necessidade da implementação da codificação, visto que os parâmetros de entrada encontram-se em padrão binário (manter ou substituir).

#### 4.0 RESULTADOS

As informações de entrada necessárias para cada equipamento nas etapas 1 e 2 da proposta de estratégia para substituição ótima são inseridas conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Dados de entrada para cada equipamento

|                    |   |
|--------------------|---|
| Dados equipamentos | = [Usina, Equipamento, Tempo operação, Inv Substituição, Risco Inicial, Risco Substituição] |
| Custo anual total  | = [Custo anual total por equipamento por ano de operação]                                   |

##### 4.1 Resultados - Fase 1

As Figuras 5 e 6 apresentam os dados de entrada para o conjunto de equipamentos sob análise. Os valores numéricos que referem-se à moeda são expressos em R\$ x 1000. Além dos dados de entrada dos equipamentos, define-se a taxa de retorno de referência para análise.

Figura 5 – Dados de entrada – Características dos equipamentos

$$\text{Dados equipamentos} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 400 & 17 & 12 \\ 1 & 2 & 4 & 120 & 16 & 10 \\ 1 & 3 & 5 & 1000 & 10 & 7 \\ 1 & 4 & 6 & 170 & 9 & 4 \\ 1 & 5 & 7 & 90 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 6 – Dados de entrada – Custo anual total estimado dos equipamentos

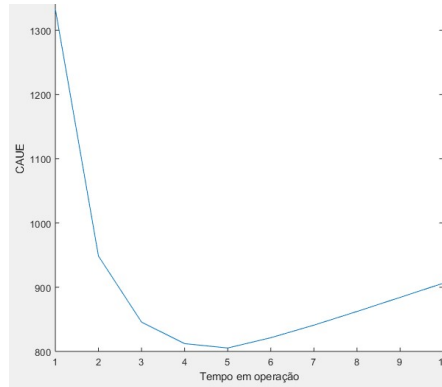
$$\text{Custo anual total} = \begin{pmatrix} 0 & 138.14 & 208.89 & 292.64 & 376 & 460.1 & 623.8903 & 707.6403 & 791.3903 & 875.1403 & 958.8903 \\ 0 & 108.54 & 128.72 & 149.14 & 170 & 190.9 & 212.3068 & 252.1876 & 274.6007 & 297.6365 & 321.4008 \\ 0 & 213.07 & 517.83 & 601.58 & 685 & 769.1 & 935.2421 & 1018.992 & 1102.742 & 1186.492 & 1270.242 \\ 0 & 121.54 & 141.31 & 161.13 & 181 & 200.9 & 222.9101 & 245.3027 & 268.1688 & 291.57 & 315.5759 \\ 0 & 111.84 & 111.98 & 112.12 & 112 & 112.4 & 112.5862 & 112.7585 & 144.1894 & 175.9333 & 207.7414 \end{pmatrix}$$

E a partir dos dados de entrada obtém-se o CAUE para cada equipamento para cada ano de operação conforme a Figura 7. E a partir do valor mínimo do CAUE e a comparação com o tempo de operação de cada equipamento são determinados os candidatos à fase de otimização. No algoritmo implementado também é possível a determinação dos gráficos de cada equipamento, evidenciando os pontos mínimos de CAUE conforme a Figura 8.

Figura 7 – CAUE para cada equipamento em cada ano de operação

$$CAUE = \begin{pmatrix} 586.14 & 408.19 & 373.94 & 374.45 & 387.94 & 417.02 & 445.82 & 473.92 & 501.07 & 527.16 \\ 242.94 & 189.06 & 177.23 & 175.68 & 178.07 & 182.29 & 189.22 & 196.16 & 203.03 & 209.77 \\ 1331.1 & 948.52 & 845.70 & 812.14 & 805.36 & 821.37 & 840.95 & 862.24 & 882.18 & 906.18 \\ 311.94 & 231.45 & 210.61 & 204.41 & 203.87 & 206.21 & 210.09 & 214.81 & 220.00 & 225.45 \\ 212.64 & 165.15 & 149.43 & 141.66 & 137.05 & 134.04 & 131.93 & 132.92 & 135.84 & 139.93 \end{pmatrix}$$

Figura 8: CAUE (Equipamento 3)



#### 4.2 Resultados - Fase 2

Para obtenção dos resultados da fase 2 utilizou-se dados reais de classificação de risco de equipamentos de uma usina hidroelétrica e seus respectivos custos de investimento para substituição. Em relação à definição da estratégia de planejamento, definiu-se duas possibilidades para cada equipamento: manter sem custo para substituição ou substituir com o respectivo custo associado.

Definiu-se a variável  $j$  com as seguintes estratégias de planejamento:

$$j = \begin{cases} 1 & \text{se a estratégia } j \text{ for manter o equipamento } i; \\ 2 & \text{se a estratégia } j \text{ for substituir o equipamento } i; \end{cases}$$

##### 4.2.1 Resultados – Usina “1”

Para a Usina 1 que possui 3 unidades geradoras e garantia física de aproximadamente 20 MWmed iniciou-se a segunda fase da proposta de substituição ótima com 56 equipamentos candidatos. Os parâmetros de entrada referentes ao algoritmo genético encontram-se estabelecidos no Quadro 3 e os dados do impacto do risco e valores necessários de investimento na Quadro 4. O Orçamento teto definido inicialmente foi de R\$5.000,00 x 1000 e o risco inicial do problema encontra-se no montante de 526.

Quadro 3 – Parâmetros de entrada do algoritmo

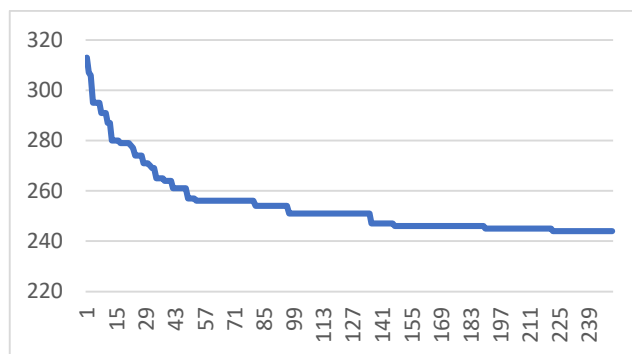
| Parâmetros de entrada do algoritmo |        |
|------------------------------------|--------|
| Tamanho da população               | 500    |
| Número de gerações                 | 250    |
| Número de bits                     | 56     |
| Método de seleção                  | Roleta |
| Percentual de cruzamento           | 0,6    |
| Percentual de mutação              | 0,0015 |
| Percentual de elitismo             | 5%     |

Quadro 4 – Dados iniciais: impacto do risco e investimento dos equipamentos candidatos

| Risco atual [j=1] | Risco Remanescente [j=2] | Valor investimento [j=1] | Valor investimento [j=2] |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 10                | 5                        | 0                        | 3500                     |
| 15                | 5                        | 0                        | 3500                     |
| 20                | 4                        | 0                        | 500                      |
| •                 | •                        | •                        | •                        |
| •                 | •                        | •                        | •                        |
| •                 | •                        | •                        | •                        |
| 8                 | 4                        | 0                        | 140                      |
| 6                 | 1                        | 0                        | 100                      |
| 5                 | 2                        | 0                        | 100                      |
| •                 | •                        | •                        | •                        |
| •                 | •                        | •                        | •                        |
| •                 | •                        | •                        | •                        |
| 1                 | 1                        | 0                        | 14                       |
| 2                 | 1                        | 0                        | 40                       |
| 2                 | 1                        | 0                        | 40                       |
| <b>Total</b>      | <b>526</b>               | <b>177</b>               | <b>20327</b>             |

Conforme a Figura 9 o melhor risco ou *fitness* em 10 execuções do algoritmo foi de 244. Nota-se, portanto, que considerando o risco inicial de 526 obteve-se uma redução de cinquenta e três por cento do risco global dos equipamentos candidatos considerando um orçamento teto de R\$5.000,00 x 1000. Considerando que o montante total necessário à substituição de todos os equipamentos candidatos é de R\$20.327,00 x 1000, espera-se que com a disponibilização de orçamentos teto maiores obtenha-se menor risco global, no entanto, o risco nunca será zero, pois, mesmo novos equipamentos possuem riscos intrínsecos. O menor risco possível para o problema é de 177, considerando que o orçamento seja suficiente para substituir todos os equipamentos considerados candidatos. O Quadro 5 apresenta, para cada equipamento analisado, a estratégia definida.

Figura 9 – Risco global por geração (valores absolutos de risco) Usina 1



Quadro 5 – Estratégia de substituição ótima para minimização de risco

| Estratégia j=1 | Estratégia j=2 | Investimento realizado | Risco residual |
|----------------|----------------|------------------------|----------------|
| 1              | 0              | 0                      | 10             |
| 1              | 0              | 0                      | 15             |
| 0              | 1              | 500                    | 4              |
| 1              | 0              | 0                      | 16             |
| 0              | 1              | 350                    | 4              |
| •              | •              | •                      | •              |
| •              | •              | •                      | •              |
| •              | •              | •                      | •              |
| 1              | 0              | 0                      | 5              |
| 0              | 1              | 140                    | 4              |
| 0              | 1              | 140                    | 4              |
| •              | •              | •                      | •              |
| •              | •              | •                      | •              |
| •              | •              | •                      | •              |
| 1              | 0              | 0                      | 1              |
| 0              | 1              | 40                     | 1              |
| 0              | 1              | 40                     | 1              |
| <b>Total</b>   |                | <b>4983</b>            | <b>244</b>     |

## 5.0 CONCLUSÃO



Este trabalho apresentou uma proposta de estratégia de substituição ótima de equipamentos considerando aspectos de risco, financeiros, orçamentários e técnicos. O trabalho encontra-se aplicado em um contexto de uma empresa geradora hidroelétrica de energia, e, portanto, considera na classificação de risco de cada equipamento os respectivos requisitos regulatórios. Além disso, em um contexto empresarial, a restrição orçamentária é comum, e sabendo-se dos limites impostos, é mandatório que se faça a melhor alocação do recurso disponível. Sua relevância e diferenciação frente aos demais trabalhos relacionados é a proposta que usando uma primeira seleção estabelecesse o momento ótimo de substituição sob a ótica econômico-financeira, determinando assim os equipamentos candidatos, e, em seguida, aplica-se o processo de otimização determinando a estratégia ótima de substituição. E, por fim, cabe destacar que a otimização da estratégia de substituição não tem por objetivo substituir a figura do planejador e o tomador de decisão. A proposta metodológica e os algoritmos implementados entregam ao planejador um portfólio de equipamentos que minimizam os riscos e encontram-se aderentes aos valores orçamentários disponíveis. No entanto, o conhecimento empírico dos planejadores deve ser levado em consideração, e, portanto, o término do escopo apresentado neste trabalho visa subsidiar o processo de tomada de decisão

## 6.0 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT. Gestão de Ativos – Princípios e diretrizes. NBR ISO 55000: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014

ABNT. Gestão de Riscos – Princípios e diretrizes. NBR ISO 31000: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009

Blank, Leland T., and Anthony J. Tarquin. Basics of engineering economy. Boston: McGraw-Hill Higher-Education, 2008.

BRASIL. Lei 12.783: Dispõe sobre as concessões de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sobre a redução dos encargos setoriais e sobre a modicidade tarifária; altera as Leis nºs 10.438, de 26 de abril de 2002, 12.111, de 9 de dezembro de 2009, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 10.848, de 15 de março de 2004; revoga dispositivo da Lei nº 8.631, de 4 de março de 1993; e dá outras providências

Eiben, A. E., and J. E. Smith. Introduction to Evolutionary Computing. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. 13-24.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Energia 2030. Rio de Janeiro, 2021. 453 p. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>>. Acesso em: 28 mai. 2021

Hastings, Nicholas AJ. Physical asset management (Vol. 2). London: Springer, 2010.

Holland, John Henry. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press, 1992.

Nahas, Nabil, and Mustapha Nourelfath. Ant system for reliability optimization of a series system with multiple-choice and budget constraints. Reliability Engineering & System Safety 87.1 (2005): 1-12.

Newnan, Donald G., Ted Eschenbach, and Jerome P. Lavelle. Engineering economic analysis. Vol. 2. Oxford University Press, 2004.

Rhein, Alexander, et al. Ant colony optimization of maintenance and replacement strategies in transmission systems. 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2016.

Rhein, Alexander, Gerd Balzer, and Philipp Renz. Reliability-based improvement of life-cycle maintenance and replacement strategies in transmission systems using ant colony optimization. 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE). IEEE, 2017.

Standards Australia. Custo do ciclo de vida – Um guia de aplicação. AS/NZS 4536: Associação Australiana de Padrões, 1999

Sullivan, William G., Elin M. Wicks, and James T. Luxhoj. Engineering economy. Vol. 12. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.

Whitley, Darrell. A genetic algorithm tutorial. Statistics and computing 4.2 (1994): 65-85.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao programa de P&D da ANEEL.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Eng. Elétrica pela UFES (2012), pós graduação em Gestão com ênfase em Finanças pela FDC (2017) e, no momento, é mestrando em Eng. Elétrica pela PUC-MG (conc. 2021). Atualmente é Eng. de Empreendimentos - Cemig GT. Tem experiência na área de Eng. Elétrica, com ênfase em Geração, atuando principalmente nos seguintes temas: gestão de ativos, suporte à gestão e planejamento de subsidiárias integrais e análise econômico-financeira de empresas e projetos. Participa do P&D 0651 da Cemig GT cujo objetivo é a construção de plataforma de gestão de ativos, o que lhe direcionou a fazer mestrado nesta área.

#### (2) GUSTAVO LUÍS SOARES

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1995), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1997) e doutorado em Engenharia Elétrica (2008) pela Universidade Federal de Minas Gerais e pela Université de Bretagne Occidentale (UBO), França. É Professor Adjunto IV na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, na graduação e pós-graduação lato e stricto sensu. Desenvolve pesquisas e orientações científicas, principalmente, nos seguintes temas: inteligência computacional, otimização, computação evolucionária e tomada de decisão. É diretor da VS2 Consultoria, Pesquisa e Engenharia, empresa que atua nas áreas de engenharia elétrica e tecnologia da informação.

#### (3) ADRIANA DE CASTRO PASSOS MARTINS

Técnico Profissionalizante, Química, Cefet-MG. Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia UFMG; Mestrado em Engenharia Metalúrgica, ênfase em Eng. de Materiais, EEUFMG; Especialização em Engenharia de Materiais para o Setor Elétrico, UFPR; Engenharia Econômica, Fundação Dom Cabral - MG. Engenheira Especialista na Cemig GT, na área de Engenharia e Planejamento de Manutenção com ênfase em Monitoramento Preditivo, Gerenciamento de Manutenção, Ciência de Materiais. Atual coordenadora do Comitê de Estudos D1 -Materiais e Tecnologias Emergentes - do CIGRÊ-Brasil, representante do Brasil no Study Committee D1 CIGRÊ Internacional, especialista do Advisory Group D1.01 – Liquids and Liquid Impregnated Insulation Systems. Gerente do P&D 651