

# Ciclo de rotinas para melhoria de sistemas e processos de geração de energia elétrica aplicado na região norte do Brasil

**Eraldo Cruz dos Santos**

eraldo@unifei.edu.br  
Universidade Federal de  
Itajubá

**Marco Antônio Rosa do  
Nascimento**

marcoantonio@unifei.edu.br  
Universidade Federal de  
Itajubá

## Resumo

O presente trabalho mostra o desenvolvimento de uma metodologia de gestão chamada de “Ciclo de Rotinas para Melhoria dos Sistemas e Processos de Geração de Energia Elétrica”, ou simplesmente, “Ciclo de Rotinas”, cujo desenvolvimento foi motivado pela necessidade de identificar os pontos críticos existentes em sistemas de geração de energia elétrica e aumentar a confiabilidade operacional das unidades diesel geradoras – UDGs e, conseqüentemente, reduzir os custos globais de operação e de manutenção. O método “Ciclo de Rotinas” tem como objetivo o desenvolvimento e a implantação de uma sistemática de planejamento das atividades de manutenção de usinas termelétricas – UTEs, neste estudo de caso, com motores a diesel, no período de 2002 a 2008. A metodologia utiliza ferramentas de inteligência artificial, como lógica Fuzzy, algoritmos genéticos e redes neurais, para a realização de diagnósticos e os prognósticos operacionais das usinas, os quais propiciaram o controle, a supervisão e a melhoria das condições de operação das UTEs. Todas as usinas, do estudo de caso, operam no sistema isolado e são gerenciadas pela concessionária do Estado do Pará, na região Norte do Brasil. Serão ainda expostos os resultados da implantação do método, como a redução dos custos operacionais de 20 % e do número de desligamentos em 15 %.

**Palavras-chave:** Geração de energia. Gerenciamento. Criticidade. Inteligência artificial. Diagnósticos e prognósticos.

## Abstract

This paper shows the development of a management methodology called “Cycle of Routines for the Improvement of Electrical Power Generation Systems” or simply “Cycle of Routines”, whose development was motivated by the need to identify critical points in the system of power generation and increase the operational reliability of generating units – GU and, consequently, reduce the overall costs of operation and maintenance. The method of the “Cycle of Routines” aims to develop and implantation of a systematic planning of maintenance activities, monitoring and diagnosis of gensets for Thermoelectric Power Plants – TPP, in this case study, with diesel engines in the period 2002 to 2008. The methodology uses artificial intelligence tools such as fuzzy logic, genetic algorithms and neural networks to perform diagnostic and prognostic of operating power plants, which provided the control, supervision and improvement the operating conditions of the TPPs. All power plants, the case study, operate in an isolated system and are managed by the utility of the state of Para in northern Brazil. Will also be exposed to the results of the deployment method, such as reducing operating costs by 20% and the number of shutdowns at 15%.

**Keywords:** Generation of energy. Management. Criticality. Artificial intelligence. Diagnosis e prognosis.

## 1 Introdução

O Estado do Pará, localizado na região Norte do Brasil, é composto atualmente por 143 municípios. Em 2008, 39 localidades do Estado eram atendidas por usinas termelétricas – UTEs com motores a diesel, sendo o biodiesel o tipo de combustível utilizado na geração de eletricidade, em sistema isolado. Os outros municípios têm várias de suas localidades interligadas ao sistema nacional, existindo ainda algumas localidades sem atendimento de energia elétrica.

A concessionária do Estado terceiriza os serviços de geração de energia elétrica em 25 municípios, sendo 23 UTEs, de responsabilidade da empresa Guascor do Brasil e 2 da Soenergy, ficando o restante da geração e manutenção para a própria empresa, totalizando 165 unidades geradoras – UDGs.

Nas UTEs que operam em sistema isolado e em serviço público, é necessário se controlar e reduzir os custos da geração de eletricidade, tornando-as mais eficazes e eficientes. Isto requer o controle efetivo de todos os parâmetros operacionais de geração de energia, como por exemplo, o consumo de combustível, a prevenção e a investigação de falhas nos sistemas e subsistemas dos equipamentos, etc., chegando ao planejamento de manutenção das UDGs.

É preciso ainda considerar que, as degradações do desempenho de alguns componentes das UDGs causarão, com o tempo, um aumento gradual no consumo das peças e elementos necessários para se manter a operação normal da usina, quando comparado com a produção da mesma quantidade de eletricidade de um sistema em perfeito estado. Além disso, deve ser considerada, ainda a tendência dos custos da manutenção que, segundo Jelen *et. al.*, (1983) e Santos *et. al.* (2009), variam, em média, entre 5 a 15% do custo do investimento no sistema de geração termelétrica por ano.

O controle dos parâmetros operacionais das usinas pode levar a uma economia considerável, já que facilita a avaliação dos custos de possíveis ações corretivas imprevistas, ou de manutenção de emergência nas UTEs, permitindo a identificação dos componentes e/ou sistemas responsáveis pela perda de rendimentos e pelas causas de falhas.

Como consequência do controle operacional, tem-se a redução do consumo de combustível e dos elementos consumíveis das usinas. Além disso, o conhecimento das condições de funcionamento, dos custos da manutenção e a definição dos parâmetros operacionais das UDGs propiciam a definição do momento onde se pode ou quando se deve intervir em uma unidade geradora, com menor custo operacional e de forma planejada.

Este artigo expõe uma metodologia para a detecção das anomalias ou deficiências nos elementos das UDGs de usinas termelétricas, responsáveis pela perda de eficiência do sistema de geração, realizando os diagnósticos e os prognósticos dos componentes dos grupos geradores a fim de se propiciar o controle, a supervisão e a melhoria das condições de operação das UTEs com motores a diesel do sistema isolado, determinando os seus pontos críticos e indicando, através de um sistema especialista, as ações a serem adotadas para sanar as anomalias detectadas..

## 2 Ciclo de Rotinas para Melhoria de Sistemas de Geração de Energia Elétrica

O método “Ciclo de Rotinas” foi desenvolvido para obter todas as informações operacionais de sistemas para geração de energia, e foi aplicado em usinas termelétricas do sistema isolado utilizando, além de ferramentas de inteligência artificial, técnicas e métodos de gestão e administração de sistemas e processos, como: Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC, 5S, Manutenção Produtiva Total – TPM, Seis Sigmas, ciclo PDCA, etc., incluindo as filosofias da engenharia de confiabilidade. (Santos, 2004)

A funcionalidade básica do “Ciclo de Rotinas” é baseada na identificação, na análise, na sistematização, na padronização, na normalização, no acompanhamento, no controle, na avaliação e no tratamento das: tarefas e atividades planejadas, tanto de operação quanto de manutenção, dos sistemas e processos em estudo, partindo do planejamento da utilização dos recursos (pessoais, materiais e financeiros), dentro dos objetivos e metas definidos pela empresa.

As Figuras 1 (a) e 1 (b) mostram as telas iniciais do software “Ciclo de Rotinas”, com as tarefas e atividades a serem desenvolvidas durante a implantação do método e a tela de sistematização do programa, onde é realizada a divisão e a classificação dos elementos das UDGs em sistemas e subsistemas.

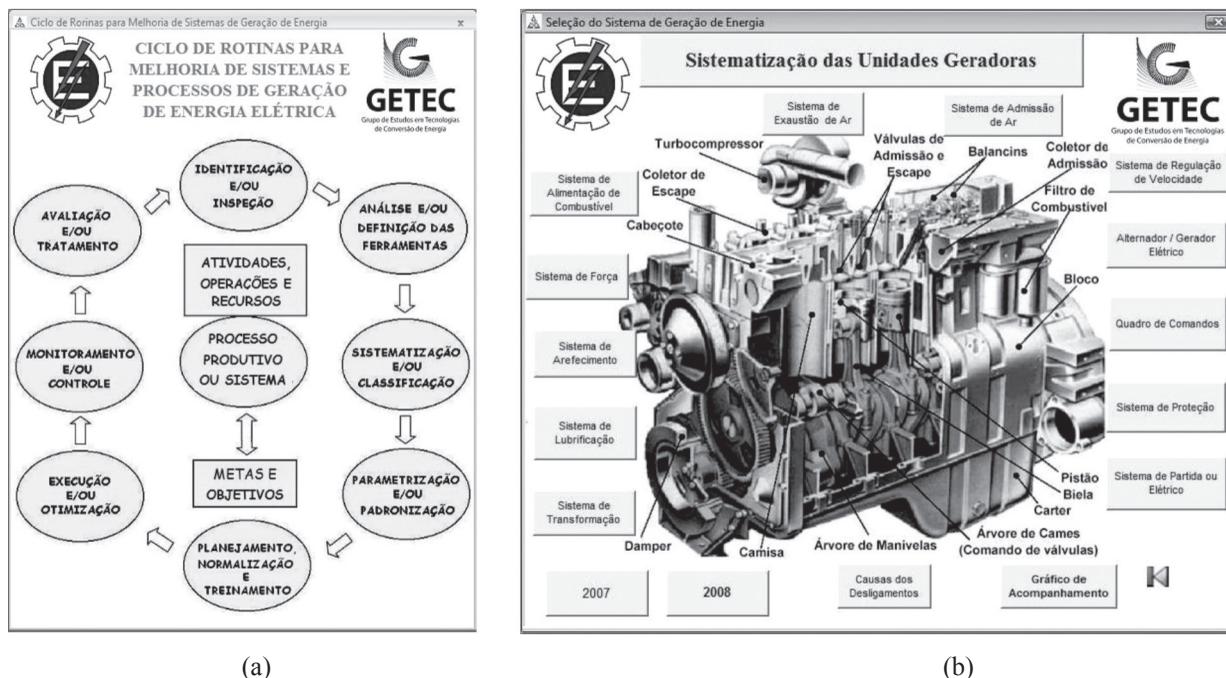


Figura 1: Tela inicial do software Ciclo de Rotinas: (a) Tela inicial e (b) Tela de sistematização.

As interfaces gráficas do software “Ciclo de Rotinas”, como mostrado nas Figuras 1 (a) e 1 (b), foram desenvolvidas na linguagem de programação Java, em forma de diagramas de blocos, onde são utilizadas partes de um sistema especialista híbrido de inteligência artificial composto de: uma base de conhecimento relacional; uma máquina (ou motor) de inferência (banco de regras) e uma interface de usuário. (Santos, *et. al.*, 2009)

A base de conhecimento, utilizada no método, combina o conhecimento declarativo dos fatos (ações adotadas no passado para se sanar problemas nas UTEs), associados às informações de um banco de dados (formado com as características dos componentes e elementos que compõe os sistemas de geração), onde se encontram também todos os procedimentos, ou normas para o desenvolvimento de tarefas e/ou atividades de operação e manutenção.

Esta base de conhecimento tem como objetivo fornecer suporte aos usuários do software para as tomadas de decisões gerenciais, indicando as melhores ações a serem aplicadas nos sistemas das usinas.

As ações indicadas pelo “Ciclo de Rotinas” utilizam como referência as experiências das equipes de manutenção e operação no desenvolvimento das tarefas e atividades do método, armazenando-as em sua base de conhecimento e, por se tratar de um sistema especialista, nele é possível se realizar simulações das possíveis falhas que possam ocorrer nas UTEs, tomando por base o raciocínio humano, a fim de solucionar as mais variadas anomalias ou eventos nas usinas.

Nesta tarefa são considerados os históricos de eventos ocorridos nas UTEs e a comparação do rendimento das mesmas com as condições de comissionamento ou de testes de recepção das UDGs.

## 2.1 Características do Ciclo de Rotinas

A Figura 1 (a) mostra ainda que, no desenvolvimento das tarefas do método “Ciclo de Rotinas”, os objetivos gerais e as metas, do processo produtivo ou sistema em estudo, devem ser analisados e avaliados, a fim de que cada uma das tarefas e/ou atividade possam ser desenvolvidas com pleno conhecimento do conjunto de atividades, de operações (normas ou procedimentos), dos recursos disponíveis, etc., de forma que os objetivos e metas sejam tangíveis.

As quatro primeiras tarefas do “Ciclo de Rotinas” devem ser iniciadas, preferencialmente, no segundo semestre de cada ano, a fim de que, durante o desenvolvimento das mesmas possam ser levantadas todas as informações da(s) usina(s), as quais irão formar a base de conhecimento do software desenvolvido, além de facilitar a elaboração do planejamento de manutenção dos equipamentos e o cronograma físico – financeiro para o ano seguinte, onde método esteja sendo implantado. (Santos, 2004)

## 2.2 Atividades do Ciclo de Rotinas

A Tabela 1 mostra um breve resumo das tarefas e atividades do método “Ciclo de Rotinas”, aplicados para usinas termelétricas com motores a diesel.

**Tabela 1:** Tarefas e atividades do método Ciclo de Rotinas.

Tarefas / Atividades	Descrições
Identificação e/ou Inspeção	Identificar as necessidades, deficiências e/ou ocorrências no processo, os problemas a serem corrigidos, os tipos de falhas frequentes, os componentes dos subsistemas que apresentam níveis críticos de desgaste, a existência de procedimentos, as falhas nas condições ambientais, etc. Nesta atividade, devem-se conhecer todos os processos internos e externos à empresa.
Análises e/ou Definição das ferramentas	Realizar uma análise das necessidades para verificar todos os aspectos envolvidos na solução da mesma, definindo os instrumentos de gestão (softwares / métodos) a serem usados em cada um dos sistemas e subsistemas em estudo, ou seja, definir o planejamento das ações a serem adotadas.
Sistematização e/ou Classificação	Usando os princípios de gestão e de administração de sistemas, realiza-se a divisão das UDGs em sistemas e subsistemas. Realizar a implantação da codificação operacional e a classificação de todos os componentes, a fim de identificá-los como itens de manutenção. Figura 1(b)
Parametrização e/ou Padronização	O levantamento das condições de funcionamento e a obtenção de parâmetros operacionais dos equipamentos que compõe as usinas, através de testes de recepção nas UTEs, são os objetivos dessas tarefas, seguindo pelo estudo da padronização de componentes e elementos de consumíveis nas usinas, buscando a redução dos custos e a padronização dos procedimentos de manutenção.
Planejamento, Normalização e Treinamento.	Nesta etapa são feitas as configurações e o detalhamento das atividades a serem executadas para atingir os objetivos e metas estipuladas. São elaborados os planos de ações, as atividades, os cronogramas físicos e financeiros, as normas e procedimentos operacionais, além de treinamentos.
Execução e/ou Otimização	Estas atividades têm o objetivo de efetivar os planos desenvolvidos e estudados de forma a executá-lo com máxima eficiência e eficácia, visando sempre à otimização de todos os parâmetros que possam contribuir para uma boa avaliação ou a melhoria dos processos das usinas.
Monitoramento e/ou Controle	Esta fase do “Ciclo de Rotinas” tem como objetivo verificar se a Execução/Otimização dos planejamentos foram feitos de forma eficiente e eficaz, ou se as atividades desenvolvidas atingiram os objetivos e metas estabelecidas, criando ou utilizando parâmetros de controle para os sistemas.
Avaliação e/ou Tratamento	Durante a avaliação do sistema é feito o tratamento dos riscos existentes nos mesmos, a fim de obter um lastro informações sobre as possíveis perdas nas UDGs e os danos que possam ocorrer nas UTEs. Nesta fase elaboram-se os contratos de seguro de equipamentos das usinas.

**Fonte:** Santos, *et. al.*, (2009).

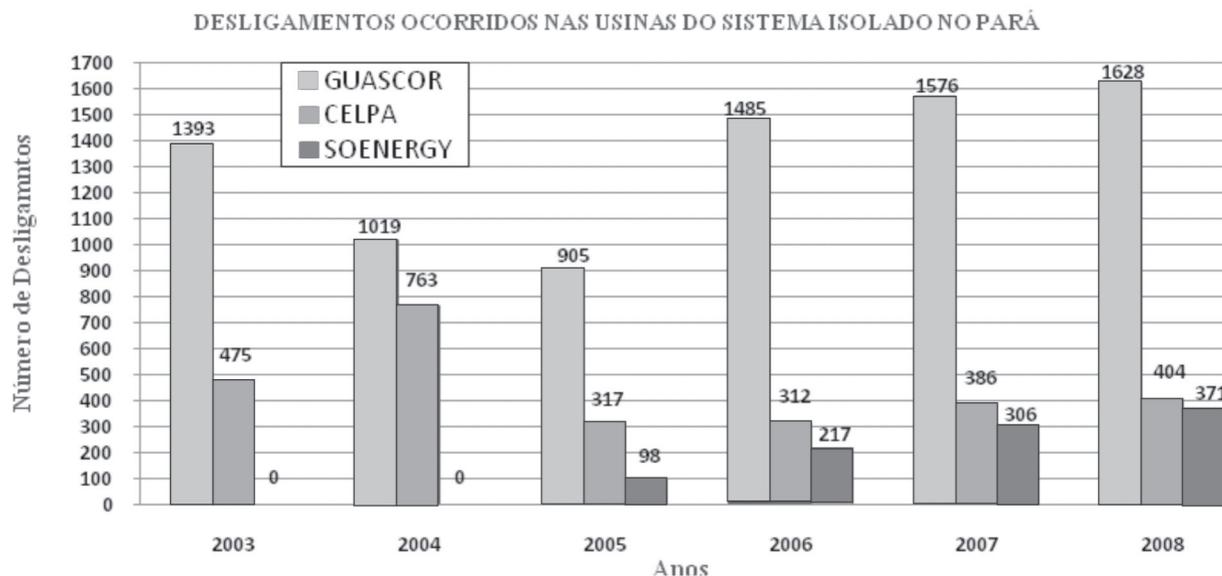
## 3 Aplicação do Ciclo de Rotinas na Região Norte do Brasil

A utilização do Ciclo de Rotinas nas 15 UTEs da concessionária do Pará iniciou no segundo semestre de 2002, com a participação da equipe de manutenção do Departamento de Manutenção do Sistema – DMS, da concessionária do Pará. As atividades de implantação do método iniciaram com o levantamento das condições operacionais de todas as usinas do Estado, divididas nas seguintes tarefas e atividades:

### Identificação e/ou Inspeção

Considerando-se que a geração de eletricidade nas localidades atendidas pela concessionária do Pará, em serviço público, era por 24:00 horas, uma das ocorrências identificadas como críticas, e que deveria ser tratada, era o número total de desligamentos nas usinas do sistema isolado, sendo esta a primeira necessidade a ser monitorada. Porém antes da sistematização dos elementos das usinas, Figura 1 (b), foi realizado um inventário geral de todos os equipamentos e procedimentos e normas existentes nas UTEs para a formação da base de conhecimento do software desenvolvido.

A Figura 2 apresenta os resultados do monitoramento dos desligamentos ocorridos nas UTEs do sistema isolado no período de 2003 a 2008, indicando em cada ano os valores das ocorrências por empresa geradora de energia.



**Figura 2:** Desligamentos ocorridos no sistema isolado do Estado do Pará no período de 2003 a 2008.

No monitoramento dos desligamentos, mostrado na Figura 2, foram registradas todas as interrupções com duração superior a três minutos, podendo ser total ou parcial, incluindo as intervenções em alimentadores, as manutenções programadas e os racionamentos nas localidades, etc. Através desta atividade foi possível acompanhar e classificar todos os desligamentos ocorridos nas usinas do Estado do Pará, sendo que estes eram repassados, diariamente, para o departamento de operação da concessionária, setor responsável pelo processamento das informações e também pelo repasse oficial das ações adotadas para se sanar as anomalias nas usinas, para os órgãos de fiscalização locais e para a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Além das questões referentes às ocorrências de desligamentos nas usinas, com a utilização das ferramentas gerenciais, foram identificadas ainda outras criticidades nas UTE com motores a diesel, como:

- Elevado consumo específico das unidades geradoras;
- Diversidade de elementos consumíveis (óleo lubrificante, filtros, óleo combustível, etc.);
- Falta de normas e procedimentos operacionais específicos para a geração de energia elétrica;
- Falta de padronização dos elementos e estruturas que compõe as usinas;
- Falta de treinamentos e reciclagem dos operadores das usinas e das equipes de manutenção das UTEs;

### **Análise e/ou Definição das ferramentas**

A ferramenta gerencial adotada pela concessionária, oficialmente, era o Sistema Integrado de Manutenção – SIM, software comercial de gerenciamento de manutenção de sistemas, que era usado para controle ordens de serviço (abertura e fechamento), e como banco de dados dos itens de manutenção. Contudo houve a necessidade de se adaptar as informações levantadas para que o SIM pudesse ser utilizado para monitoramento das anomalias. Mesmo assim houve a necessidade de realizar o monitoramento dos desligamentos através do método “Ciclo de Rotinas”.

A meta traçada para a implantação do “Ciclo de Rotinas” na concessionária foi à redução e controle dos desligamentos ocorridos nas UTEs, reduzindo em 5%, por ano, as intervenções nas usinas, ou seja, seria aceitável a ocorrência de até três desligamentos mensais, até o ano de 2007, considerando todos os tipos de ocorrências.

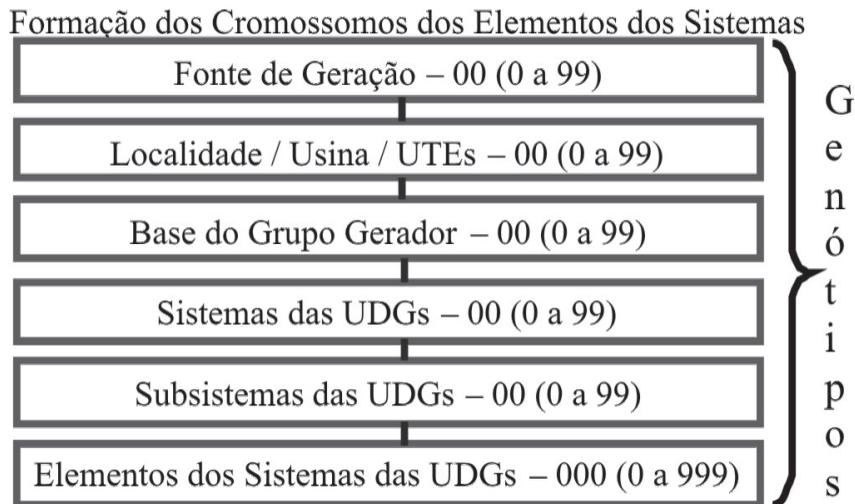
Além dos desligamentos das usinas da concessionária foram centrados esforços na organização, no monitoramento, na padronização de documentos, normas e procedimentos, além da realização de treinamentos e de reciclagem dos operadores e, principalmente, na redução de custos operacionais e de manutenção em até 3 % por ano.

### Sistematização e/ou Classificação

Com o inventário das características gerais das usinas, foram codificados e cadastrados no “Ciclo de Rotinas” todos os sistemas dos elementos das UTEs, com seus subsistemas, periféricos e acessórios, sendo que a divisão obedeceu à seguinte ordem: Sistemas auxiliares e gerais; Sistemas de força do motor; Sistemas do gerador; Sistemas do quadro de comandos; Sistemas da subestação da usina; Sistemas de estruturas civis e Sistemas de segurança.

Foram utilizados elementos de inteligência artificial (Algoritmo Genético) para a codificação operacional de todos os elementos dos subsistemas das usinas, ou seja, cada sistema foi tratado como um cromossomo (C), sendo que os seus elementos eram os genes, os quais receberam a codificação genética tipo não relacional (genótipo), conforme o esquema mostrado na Figura 3. Assim sendo era possível identificar e localizar cada elemento sistema de geração, de forma rápida e eficiente e sem duplicidades. Para cada código eram gerados códigos simplificados os quais eram pintados nas partes visíveis dos sistemas principais das unidades geradoras.

Um exemplo dessa codificação é: C = 01.01.02.01.02.023, que representa o tipo de geração de energia 01 (UTE a diesel), a localidade de geração codificada com o número 01 (Anajás), uma unidade geradora na base 02, um sistema da UDG codificado como 01 (motor), um subsistema de geração codificado como 02 (sistema de força) e um elemento de um subsistema de código 023 (pistão do motor). Para cada anomalia eram expostos os procedimentos para saná-la.



**Figure 3:** Formação dos cromossomos dos elementos usados no Ciclo de Rotinas. (Santos *et. al.*, 2009)

Assim como a codificação operacional dos sistemas, cada um dos elementos que compõe os subsistemas receberam também um valor de classificação inicial de criticidade  $C_e$ , a fim de facilitar o seu acompanhamento quando em operação, formando o banco de dados de materiais do método. Este valor foi ajustado conforme a obtenção da função de histórico de operação das UDGs, tendo o seu valor inicial variando entre 01 e 10, conforme mostrado na Tabela 2.

No método “Ciclo de Rotinas” todas as ocorrências que impediam o funcionamento normal dos sistemas das unidades geradoras eram registrados na base de conhecimento do software desenvolvido, Nele é possível se fazer um diagnóstico das condições operacionais das mesmas, incluindo o tempo de operação delas em relação ao plano de manutenção, fornecendo subsídios para a antecipação ou postergação da manutenção no equipamento.

**Tabela 2:** Classificação dos elementos críticos dos sistemas.

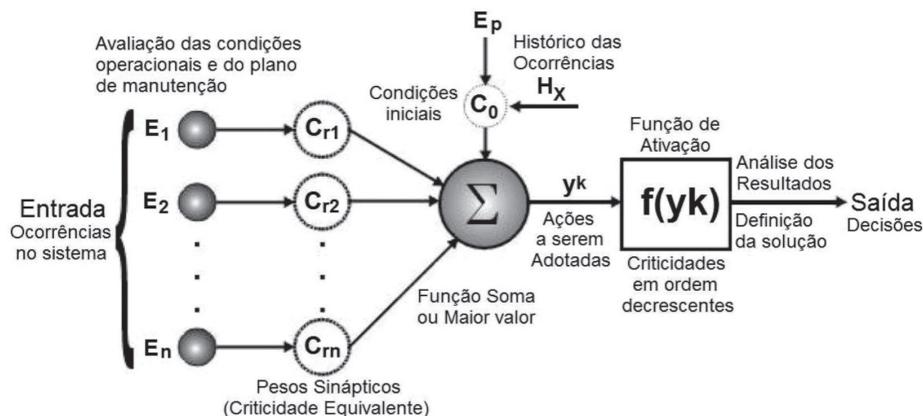
$C_E$	Descrição
10	Elemento muito crítico, o sistema para por um longo tempo (mais de um mês) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção corretiva ou programada para o seu restabelecimento;
9	Elemento muito crítico, o sistema para por um longo tempo (mais de duas semanas) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção corretiva ou programada para o seu restabelecimento;
8	Elemento muito crítico, o sistema para por um longo tempo (mais de uma semana) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção programada para o seu restabelecimento;
7	Elemento muito crítico, o sistema para por um longo tempo (mais de três dias) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção corretiva programada para o seu restabelecimento;
6	Elemento muito crítico, o sistema para por um médio tempo (mais de um dia) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção corretiva não programada para o seu restabelecimento;
5	Elemento crítico, o sistema para por médio tempo (mais de doze horas) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção corretiva não programada para o seu restabelecimento;
4	Elemento crítico, o sistema para por médio tempo (mais de quatro horas) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção corretiva não programada para o seu restabelecimento;
3	Elemento necessário, o sistema para por um pequeno tempo (mais de uma hora) se ele não estiver funcionando corretamente e depende de manutenção corretiva não programada para o seu restabelecimento
2	Elemento necessário, o sistema não para ou fica operando com restrição por alguns dias até que seja realizada manutenção corretiva programada com substituição de componente;
1	Elemento necessário, o sistema não para ou fica operando com restrição por algumas horas até que seja realizada a manutenção corretiva programada para a substituição de componente.

Fonte: Santos *et. al.*, 2009.

Na base de conhecimento foram introduzidos outros programas de acompanhamento das UDGs como: análises e controle da qualidade do óleo lubrificante e do combustível utilizado; análises dos gases de escape e de vibração (para os motores de grande porte), análise da qualidade da água utilizada nos sistemas de arrefecimento dos motores. Estes testes e análises tinham como objetivo acompanhar os possíveis desgastes de componentes dos sistemas.

Após as anomalias serem detectadas e notificadas, eram geradas, eletronicamente, as solicitações de manutenção – SMs, as quais eram analisadas e, posteriormente, transformadas em ordens de serviço – OSs. No entanto, os serviços só poderiam ser realizados após o planejamento das ações, a fim de impedir a execução de manutenções corretivas não programadas, pois estas representam alto custo de manutenção e operacional, salvo em casos de emergência.

Baseado no conhecimento de inteligência artificial foi desenvolvido um *perceptron* especialista (classificador binário) para a metodologia “Ciclo de Rotinas”, como mostrado no esquema da Figura 4. (Rosenblatt, 1958)



**Figure 4:** Modelo de *perceptron* proposto pela metodologia do Ciclo de rotinas para a tomada de decisão utilizando ferramentas de inteligência artificial híbrida.

O processo se inicia no momento que são identificadas as ocorrências no sistema de geração e são geradas as OSs. Neste momento são disponibilizadas para o usuário, no módulo de análises do software, em forma de diagramas de blocos as informações das condições iniciais de operação ( $C_0$ ), do plano de manutenção da UDG ( $E_p$ ), seguida por uma análise do histórico do sistema de geração ( $H_x$ ), existentes na base de conhecimento do programa.

O diagnóstico das ocorrências e as melhores sugestões para a solução das anomalias são expostos, para o operador do sistema, que analisa os resultados e define as ações a serem tomadas. Todas as escolhas feitas pelos responsáveis pela manutenção passam a fazer parte da base de conhecimento do software e, portanto, fica disponível para análise e comparação de outros casos (ocorrências) no sistema de geração.

Nesta fase, são utilizadas as rotinas da lógica Fuzzy, como o processo de *fuzzyficação* de base relacional, para determinar a criticidade dos equipamentos, com todos os elementos que compõem os sistemas e subsistemas das UDGs. Avaliando-se e/ou ajustando-se a criticidade inicial dos mesmos, como mostrado na Tabela 2.

O motor de inferência Fuzzy é baseado na técnica de Mamdani e visa à detecção dos componentes mais críticos das UTEs. Sendo que os resultados do processo são dispostos novamente para o operador, em ordem decrescente de criticidade. Um exemplo de inferência utilizada no método “Ciclo de Rotinas” tem a seguinte função lógica:

$Y_k = Se (E (E_n = \text{“é um elemento de um subsistema do sistema de geração de energia, onde tem havido casos de interrupção/desligamentos causadas por } E_n\text{”}); Realizar a comparação das condições de operação iniciais do elemento - } C_0\text{, considerando a função histórico das ocorrências - } H_x\text{ do mesmo e as criticidades equivalentes - } C_m\text{; “Então executar os procedimentos de manutenção específicos para solucionar a anomalia causada por } E_n\text{”}; E registrar a solução na base de conhecimento do Ciclo de Rotinas através da função } F(Y_k)\text{));$

Os resultados são as ações de *defuzzyficação* sob a forma da função de ativação Fuzzy  $f(Y_k)$ , como mostrado na Figura 4, para a execução de um conjunto de ações nos elementos das UDGs, a fim de assegurar a continuidade do serviço de fornecimento de eletricidade para a comunidade local no menor tempo possível.

Com base na função Fuzzy de eventos históricos ( $H_x$ ) que ocorreram nas unidades geradoras das UTEs, classificadas e agrupadas em categorias e, de acordo com a base de conhecimentos do software do “Ciclo de Rotinas”, é possível formar uma listagem básica de ocorrências para treinamento de redes neurais por categorias de eventos, visando o desenvolvimento de prognósticos do sistema de geração e adaptação de planos para a manutenção das UDGs.

## Parametrização e/ou Padronização

Foram realizados testes de comissionamento, onde foram parametrizadas e definidas as faixas operacionais de todas as UDGs e os seus limites de frequência, de fator de potência, de tensão e de corrente de geração e de distribuição.

Nesta mesma tarefa foi realizada a parametrização e/ou padronização dos seguintes itens:

- Tipos de informações e documentos a serem repassados para a equipe de manutenção da geração;
- Planos de manutenção da UDGs, definindo a realização da manutenção (por horas), por grupamento de máquinas de mesmo fabricante, além da classificação dos equipamentos pela potência instalada;
- Plano de manutenção de geradores elétricos, quadro de comandos e transformadores, com seus respectivos procedimentos de inspeções;
- Periodicidade de troca dos elementos consumíveis dos grupos geradores, visando à redução de custos.

É importante ressaltar que todas as alterações realizadas nos sistemas de geração das UTEs passavam por análises, pesquisas, testes de campo, etc., visando o planejamento das ações. Como, por exemplo, foram desenvolvidos os programas de acompanhamento de análises da qualidade da água do sistema de refrigeração e de lubrificantes usados nos motores das UDGs no qual foi possível estudar a extensão do uso da carga de óleo e a substituição dos filtros de água por aditivos para radiador, reduzindo os custos de manutenção e de operação, conforme mostrado na Tabela 3.

Na Tabela 3 foi realizada uma comparação adotando-se os valores unitários no período de 2002 a 2006 de cada elemento consumível, sendo que, para os cálculos, foi considerada uma operação média das UDGs de 08:00 horas diárias para os motores de pequeno porte, de 12:00 horas para os de médio porte e 16:00 horas para os de grande porte.

**Tabela 3:** Redução de custo dos elementos consumíveis das usinas.

ELEMENTOS CONSUMÍVEIS DAS USINAS (R\$ x 1.000,00)					
Elementos	2002		2006		Diferença
	Unidades	Custo Anual	Unidades	Custo Anual	
Filtros (de Ar, de combustível, de lubrificantes, de água, etc.).	7.827	2.404,96	5.485	1.257,75	1.147,21
Aditivo para radiador (l)	1.521	29,70	254	1,392	28,308
Óleo lubrificante (tambores)	658	614,70	278	312,42	302,28

Fonte: Santos *et. al.*, 2009.

Ainda como resultado dos processos de parametrização e padronização houve significativa redução do custo de manutenção nas revisões gerais e parciais no decorrer dos anos, conforme mostrado na Tabela 4.

**Tabela 4:** Custo médio da manutenção das unidades geradoras.

CUSTO MÉDIO DA MANUTENÇÃO DE UNIDADES GERADORAS (R\$ X 1.000,00)						
Unidades Geradoras	2002	2003	2004	2005	2006	2007/2008
Pequeno Porte	78,5	65,0	53,0	46,8	40,0	38,5
Médio Porte	210,	150,	130,0	120,0	90,0	86,2

Fonte: Santos *et. al.*, 2009.

A redução de custos mostrada na Tabela 4 se deveu a padronização das listagens de materiais e dos procedimentos utilizados nas revisões, juntamente com a terceirização de alguns dos serviços realizados. (Burton, *et. al.*, 2004)

### Planejamento, Normalização e Treinamento

No período de 2002 a 2004, com a organização do Departamento de Administração e Recursos Humanos da – DARH da concessionária do Pará foram realizados treinamentos e reciclagens, destinados à formação de pessoal para trabalhar com a operação e manutenção das usinas, ministrados por funcionários da própria empresa.

Paralelamente foram desenvolvidos e aprovados, pela diretoria técnica da empresa, algumas normas e procedimentos para a manutenção e operação das usinas. Destacam-se, em especial, as normas referentes às instruções técnicas de manutenção e de operação e as instruções de preservação do meio ambiente das usinas.

### Execução e/ou Otimização

A execução do planejamento da metodologia desenvolvida ocorreu no período de 2004 a 2005, quando efetivamente foi possível se concluir primeiro giro das tarefas e atividades do método.

No período de 2006 a 2008 as atividades foram concentradas nas ações de monitoramento e otimização dos elementos do sistema de geração, com a implantação nas UTE de equipamentos para o controle e monitoramento dos parâmetros operacionais, conforme a Resolução Normativa 310/05 ANEEL / Eletrobrás. (Eletrobrás, 2005)

### Monitoramento e/ou Controle

Segundo Santos *et. al.*, (2009) para se determinar a Criticidade de um Componente de um Sistema de Geração –  $C_{COMP}$  realiza-se a composição desta grandeza em relação a três condições operacionais: a Criticidade Operacional dos Equipamentos –  $C_{EQ}$ ; a Criticidade Equivalente no Tempo –  $C_{EQTEMPO}$  e a Criticidade do Elemento no Sistema –  $C_{ES}$ ;

A  $C_{EQ}$  visa relacionar os possíveis desvios da condição de funcionamento do equipamento na UDG, considerando e quantificando a importância do elemento para o sistema ao qual ele faz parte. O segundo termo da criticidade,  $C_{QTEMPO}$ , relaciona o nível de utilização do elemento dentro da programação de manutenção estipulado para o sistema, enfatizando a vida útil de cada elemento no mesmo e o terceiro termo busca mostrar a influência do mau funcionamento do elemento no sistema, partindo dos indicadores de produtividade e de disponibilidade utilizados na UTE.

Para Santos (2004), Lora, *et. al.*, (2004) e Conde (2007) o consumo específico do combustível expressa o desempenho ou eficiência operacional de uma usina, podendo o mesmo ser individual ou global. O consumo específico de uma unidade geradora –  $C_{ESP}$ , (l/kWh), é calculado pela relação entre o consumo de combustível diário ou mensal –  $C_C$ , (l), pela média da energia gerada pelo grupo gerador –  $E_G$ , (kWh), como mostrado nas Equações 1.

$$C_{ESP} = \frac{C_C}{E_G} \quad C_{ESPO} = \frac{C_{CO}}{P_N \cdot t_A} \quad (1)$$

Visando comparar o desempenho operacional de uma UDG utilizou-se, como referência as condições do consumo específico ótimo –  $C_{ESPO}$ , (l/kWh), que é a relação entre a quantidade de combustível consumido, para as condições de máximo rendimento, ou seja, o consumo de combustível ótimo –  $C_{CO}$ , (l), pela potência nominal do equipamento –  $P_N$ , (kW), multiplicado pelo tempo de avaliação –  $t_A$ , (h), para as condições locais de temperatura, umidade e pressão.

Outros parâmetros de avaliação do desempenho, em função da utilização dos equipamentos nas usinas, são o fator de carga médio ou de utilização e o fator de carga médio ótimo das UDGs que podem ser calculados pelas Equações 2:

$$F_{UTIL(i,j)} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{P_{EF(i,j)}}{P_{N(i)}} \right), \quad F_{UTILO(i,j)} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{P_{EFL(i,j)}}{P_{N(i)}} \right), \quad (2)$$

sendo:  $F_{UTIL}$ , o fator de utilização do grupo gerador  $i$ , no intervalo de tempo  $j$ ;  $P_{EF}$  é a potência efetiva da UDG  $i$ , no intervalo de tempo  $j$ , (kW), e  $P_N$  a potência nominal da UDG  $i$ , (kW);  $F_{UTILO}$ , o fator de carga ótimo ou de utilização do grupo gerador  $i$ , no intervalo de tempo  $j$  e  $P_{EFL}$  é a potência efetiva liberada da UDG  $i$ , no intervalo de tempo  $j$ , (kW).

No método desenvolveu-se o conceito de Valor Crítico Equivalente –  $V_{CE}$  de cada componente de uma unidade geradora, que mostra os desvios e a influência do mesmo no sistema, e é calculado pela Equação 3:

$$V_{CE} = \frac{\left( C_E^2 \cdot \sum_{i=1}^m C_{Si}^2 \right)}{\sum_{j=1}^n N_j}, \quad (3)$$

onde,  $N_j$  é a somatória de todos os índices de criticidades atribuídos a cada um dos elementos do sistema de geração;  $C_E$  é o número da criticidade de cada elemento, fornecido pela Tabela (2), e  $C_{Si}$  é a somatória das criticidades de todos os elementos do sistema ao qual o componente faz parte.

Reunindo as Equações de 1, 2 e 3, obtêm-se a Equação 4 que visa à determinação de um parâmetro global para o cálculo da criticidade operacional dos equipamentos. Podendo determinar quais os equipamentos de uma UTE ou de um conjunto de usinas que apresentam maior criticidade, em função do seu desempenho operacional:

$$C_{EQ} = \frac{\left( (2 \cdot V_{CE}^{1/2} + N_O^2) C_{ESP} \right)}{C_C \cdot F_{UTIL}}, \quad (4)$$

onde:  $N_O$  é o número total de ocorrências (desligamento, racionamentos, paradas da UDG, etc.) causadas pelos mesmos elementos do sistema, que comprometem a continuidade de atendimento da UTE, com duração maior de três minutos.

A criticidade equivalente no tempo –  $C_{EQTEMPO}$  é calculada pela Equação 5:

$$C_{EQTEMPO} = \frac{\left( \frac{h_{AO}}{V_{UE}} \right)^2 + RMDO^2}{T_{OPA}}, \quad (5)$$

sendo:  $h_{AO}$  as horas acumuladas de operação do equipamento, desde o seu último comissionamento,  $V_{UE}$  a estimativa de vida útil do equipamento,  $RMDO$  é o registro médio diário de operação de uma UDG, contado a partir do momento em que se aciona a UDG, até a sua parada, e  $T_{OPA}$  é o tempo de operação anual do equipamento, ambos em horas.

A criticidade dos elementos do sistema –  $C_{ES}$ , é calculada pela relação da Equação 6:

$$C_{ES} = N_{OS} \cdot \left( \frac{C_{ESP} \cdot F_{UTILO(i,j)} \cdot C_{CO}}{C_{CESPO} \cdot F_{UTIL(i,j)} \cdot C_C} \right), \quad (6)$$

onde:  $N_{OS}$  é o número de ocorrências por conjunto de subsistemas do sistema de geração, em números absolutos.

Alicerçado pelos conhecimentos da MCC é possível se calcular a disponibilidade dos equipamentos em termos de percentuais usando-se a Equação 7: (Conde, 2006 e Santos *et. al.*, 2009).

$$D(\%) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100, \quad (7)$$

sendo,  $D(\%)$  é a disponibilidade percentual do equipamento,  $MTBF$  é o tempo médio entre falhas,  $MTTR$  é o tempo médio para reparo no período de avaliação.

Segundo Santos *et. al.*, (2009) a composição da criticidade dos componentes é calculada pela Equação 8, sendo  $\sigma_s$  o desvio padrão das medidas:

$$C_{COMP} = C_{EQ} + C_{QTEMPO} + C_B + D(\%) \pm \sigma_s, \quad (8)$$

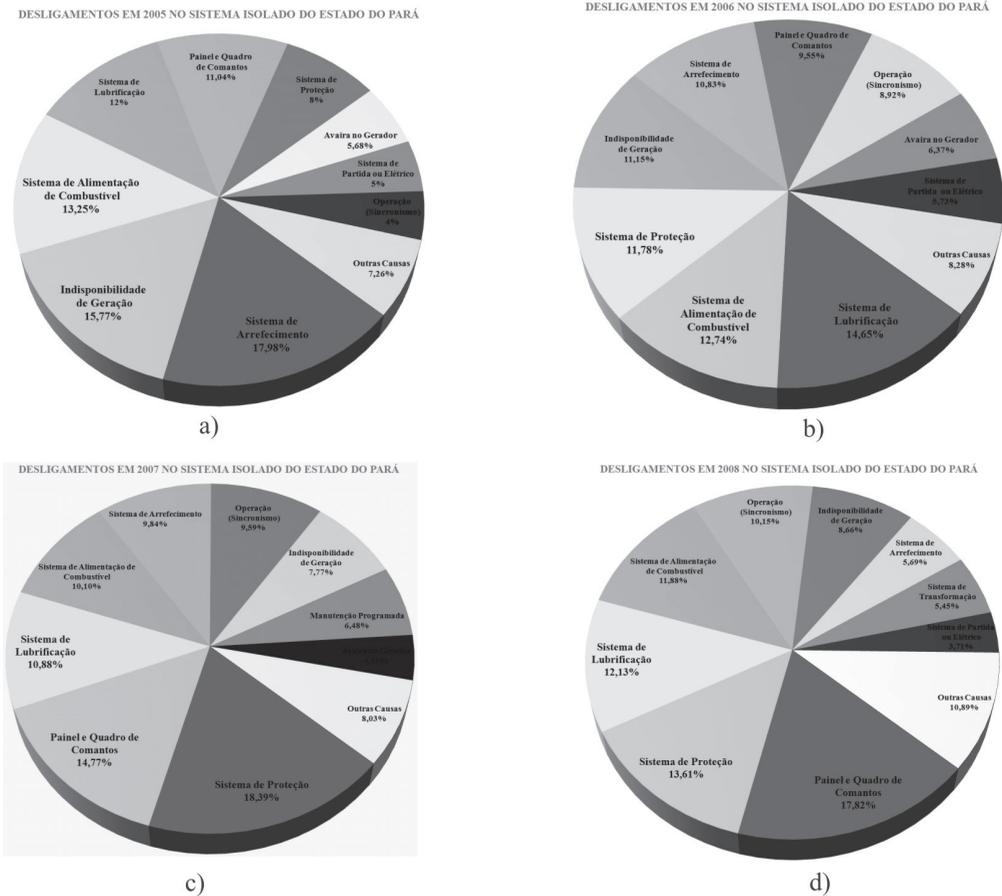
Através do equacionamento exposto acima, foi possível avaliar os componentes da UDGs, separadamente, determinando as criticidades de cada uma das UTEs. E, usando a base de conhecimento do software “Ciclo de Rotinas”, o plano de manutenção desenvolvido e a função histórico de ocorrências ( $H_x$ ), foi possível fornecer subsídios para a tomada de decisões gerenciais na manutenção, a respeito de quais as ações deveriam ser efetivadas para resolver as anomalias identificadas nos sistemas e subsistemas da UDGs de forma planejada.

Em 2007 a meta traçada para as usinas foi atingida com o controle de todas as falhas que ocorreram ao longo dos anos de 2003 a 2008, como pode ser visto nos gráficos das Figuras 2 e 5, que mostram os desligamentos classificados e em números absolutos, os seus tipos e o seu percentual crítico, em ordem decrescente no período de 2005 a 2008, respectivamente.

Durante o período de implantação do método de “Ciclo de rotinas” na concessionária do estado, todas as falhas que ocorreram nas UTEs foram estudadas, através de reuniões periódicas entre as equipes de engenharia e de manutenção mecânica e elétrica. Nestas reuniões eram apresentadas soluções para todas as deficiências, necessidades e/ou anomalias identificadas, as quais foram registradas na base de conhecimento do software desenvolvido.

Observou-se que, apesar da redução no número de desligamentos em 15%, a cada ano novos problemas ficavam evidentes, como mostrados nos gráficos da Figura 5, onde pode ser visto que, em 2005, Figura 5 (a), a maioria dos desligamentos foi devida as falhas no sistema de arrefecimento (superaquecimento); indisponibilidade de geração (por quebra de equipamentos) e falhas no sistema de alimentação de óleo combustível dos motores.

Em 2006, Figura 5 (b), a grande maioria das anomalias ocorreu devido a falhas no sistema de lubrificação; no sistema de alimentação (má qualidade do óleo combustível) e no sistema de proteção (queima de excitatriz estática).



**Figura 5:** Monitoramento dos desligamentos no sistema isolado em: (a) 2005; (b) 2006; (c) 2007 e (d) 2008.

Em 2007, Figura 5 (c), as anomalias migraram para desligamentos devidos às falhas no sistema de proteção (relés); a avaria nos componentes dos painéis e quadros de comandos (queima de fusíveis das excitatrizes estáticas); falhas no sistema de lubrificação dos motores, motivando a execução de inúmeras manutenções programadas.

Em 2008, Figura 5 (d), os desligamentos foram devidos as avarias nos componentes dos painéis e quadros de comandos (queima de fusíveis das excitatrizes estáticas); falhas no sistema de proteção (queima de válvulas solenoides) e no sistema de lubrificação (bombas de lubrificação).

Durante todo o período de monitoramento e controle do método, buscou-se determinar os componentes, os equipamentos e as usinas de maior índice de criticidade, ou seja, as UTE que causavam maior número de desligamentos no sistema de geração. Para cada condição crítica foram desenvolvidos diagnósticos e prognósticos operacionais para sanar tais anomalias, como os mostrados na Tabela 5, que expõe também os elementos das usinas mais críticos no período de 2005 a 2008.

**Tabela 5:** Diagnósticos e prognósticos das UDGs do sistema isolado.

	Usina	Código Genético	Elemento	Diagnóstico	Prognóstico / Ações a serem adotadas
2005	Melgaço – UDG 02	01.09.02.01.01.002	Radiador	Qualidade ruim da água de arrefecimento	Entupimento dos radiadores / Tratamento da água e substituição do filtro de água por aditivo para radiador
2006	Bagre – UDG 01	01.03.01.04.13.198	Excitatriz	Queima de fusíveis da excitatriz estática do quadro de comandos	Desenvolver estudos para ampliação da corrente de excitação / Implantação de novas excitatrizes estática nas usinas
2007	Cotijuba – UDG – 04	01.07.04.08.14.259	Operação (sincronismo)	Dificuldade de realizar o sincronismo das UDGs	Realização de treinamento de reciclagem para a equipe de operadores da UTE
2008	Jacareacanga – UDG – 03	01.08.03.01.03.060	Válvula Solenoide	Queima do equipamento	Atuação indevida do sistema de proteção / Substituição das solenoides por outras mais resistentes e confiáveis nas UDG

Fonte: SANTOS, *et. al.*, 2009.

Todas as anomalias mostradas na Tabela 5 foram sanadas, sendo que como um sistema especialista o “Ciclo de Rotinas”, forneceu os diagnósticos e prognósticos de todas as UDGs, indicando os pontos críticos e as ações de manutenção preventivas, preditivas e proativas a serem tomadas para a solução de cada uma delas.

### Avaliação e tratamento

Uma das avaliações do método “Ciclo de Rotinas” foi realizada em função da disponibilidade média das usinas da concessionária do Pará, em 2002 ela variava entre 40 a 80 %. Em 2008 a disponibilidade das usinas alcançou valores entre 75 a 98%, isso se deveu a filosofia de se manter nas UTEs as chamadas “reservas frias”, ou seja, em função da potência instalada e das configurações das UTEs, mantinha-se UDGs reservas, para que, caso se perdesse a maior máquina da planta, seria possível manter a geração de energia até que se processasse a recuperação da máquina avariada. Essas ações só foram possíveis devido a padronizações dos procedimentos, das normas e dos tempos médios da realização dos serviços de manutenção e de recuperação das máquinas.

O conhecimento dos elementos mais críticos das usinas, Tabela 5, juntamente com a padronização e normalização dos equipamentos e dos procedimentos operacionais, aliado a formação da base de conhecimento do método, propiciou a determinação dos equipamentos, instrumentos e etc., a terem seus contratos de seguro reavaliados e ajustados com valores menores para a empresa.

## 4 Conclusões

O método “Ciclo de Rotinas” implantado nas UTEs, que utilizam o biodiesel como combustível no Estado do Pará, apresentou-se eficaz, pois os objetivos e metas foram alcançados de forma satisfatória e eficiente. A metodologia aplicada permitiu: o monitoramento dos parâmetros de desempenho da geração de energia; a identificação das causas das anomalias; a redução dos custos operacionais em 20%, como mostrado nas Tabelas 3 e 4 e a diminuição do número de desligamentos em até 15%, por ano, no sistema de geração elétrica do Estado, como mostrado na Figura 2.

Contudo, existe a necessidade de direcionamento gerencial das atividades, evitando a tendência de crescimento do número de anomalias, isto é, baseado no método seis sigmas, é preciso se reformular as metas, a fim de manter os resultados alcançados, e melhorar, continuamente, o desempenho da geração de energia elétrica no Estado do Pará, ou seja, é necessário realizar novos “giros” no ciclo do método desenvolvido.

Ressalta-se que o método foi desenvolvido visando fornecer subsídios para a tomada de decisões gerenciais, pois com o “Ciclo de Rotinas” foi possível avaliar e otimizar a geração de energia da concessionária, a partir da elaboração de diagnósticos e prognósticos dos elementos mais críticos do sistema, como mostrado na Tabela 5.

A introdução de um sistema de inteligência artificial híbrido no método “Ciclo de Rotinas” tornou o software ainda mais poderoso no desenvolvimento de todas as suas atividades e tarefas, fazendo com que as tomadas de decisão, tanto na operação quanto na manutenção, fossem ainda mais precisas e eficientes e visando o menor custo global.

Os próximos passos deste estudo são: realizar a implantação da metodologia apresentada em outras fontes de geração de energia, como em usinas térmicas a vapor, a gás ou de ciclo combinado; promover o desenvolvimento da função Fuzzy para o relatório de ocorrências; proceder com a formação das funções de histórico de ocorrência para treinamento de redes neurais, a fim de simular as falhas nos sistemas de geração e partindo dos conhecimentos de parâmetros técnicos das UTE, realizar manutenções proativas nos vários elementos do sistema.

## Referências

- BURTON, James G.; ABBOTT, Patrick D. *Predictive maintenance for fossil fueled power boilers*. Barcelona: POWER-GEN EUROPE'04, 2004.
- CONDE, Cláudio L. R. *Análise de dados e definição de indicadores para a regulação de usinas termelétricas dos sistemas isolados*. 2006. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Pará, 2006.
- ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras. *Resolução Normativa N°. 163/05 ANEEL: Sistema de Coleta de Dados Operacionais – SCD: Especificação Técnica*. Rio de Janeiro, 2005.
- JELLEN, F. C.; BLACK, J. H. *Cost and optimization, engineering*. Auckland: McGraw-Hill, 1983.
- LORA, Electo E. S.; NASCIMENTO, Marco. A. R. *Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 1.
- MORAES, Paulo H. A. *Manutenção produtiva total: estudo de caso em uma empresa automobilística*. Taubaté: UNITAU, 2004.
- ROSENBLATT, Frank. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, Ithaca, NY, v. 65, n. 6, p. 386-408, 1958.
- SANTOS, Eraldo C. *Curso de operação e manutenção de unidades geradoras*. Belém, PA: DEMAG/CELPA. 2004. 171 p.
- SANTOS, Eraldo. C.; NASCIMENTO, M. A. R. Method of determination of critical components of power generation system. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 20., 2009, Gramado, RS. *Proceedings...* Gramado, RS, 2009. p. 5-8. COB09-06161.