

ANÁLISE DE CRITICIDADES E FALHAS NOS COMPONENTES DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Eraldo Cruz dos Santos, eraldo@unifei.edu.br¹

Marco Antônio Rosa do Nascimento, marcoantonio@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Resumo: O presente trabalho mostra os resultados da implantação de uma metodologia para a determinação dos componentes críticos e análise de falhas em sistemas de geração de energia elétrica. Como estudo de caso foi implantado o método chamado “Ciclo de Rotinas” em usinas termelétricas com motores a diesel – UTEs, onde foram identificados, analisados, sistematizados, classificados, normalizados e parametrizados, todos os componente dos sistemas e subsistemas de geração, formando uma base de conhecimento estruturada, a qual propiciou a realização de ajuste nos programas de manutenção das mesmas. Este estudo foi motivado pela necessidade de se identificar os pontos críticos existentes nas UTEs, caracterizando e quantificando as falhas operacionais mais comuns nas mesmas objetivando sugerir procedimentos para saná-las. Este método foi implantado em UTEs a diesel existentes nas regiões norte e centro-oeste do Brasil. Esta metodologia trata-se de um conjunto de atividades de gestão de sistemas de geração de energia mais abrangente chamada de “Ciclo de Rotinas para Melhoria de Sistemas e Processo de Geração de Energia”, que tem como objetivo o desenvolvimento e a implantação de uma sistemática de gerenciamento e planejamento das atividades de manutenção, operação, supervisão e diagnóstico das unidades geradoras de UTEs. Nesta metodologia são utilizadas ferramentas de inteligência artificial, como lógica Fuzzy; algoritmos genéticos e redes neurais; incluindo ainda cálculo de incertezas e de desvio padrão das grandezas, em um software chamado de “Ciclo de Rotinas”, com o objetivo de realizar o levantamento das condições operacionais das usinas, através de seus diagnósticos e os prognósticos, os quais facilitaram o controle, a supervisão e a fiscalização dos sistemas. Os resultados da implantação do “Ciclo de Rotinas” trouxeram como conseqüências, o aumento da confiabilidade operacional das unidades geradoras em até 40 %, com significativa redução dos custos globais de operação e de manutenção, em até 20 %, e redução do número de desligamentos e ocorrências de 15 %, ao longo do tempo.

Palavras-chave: Geração de Energia; Sistemas Críticos; Falhas de Manutenção e Operação; Gerenciamento da Manutenção; Inteligência Artificial;

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2010), o sistema isolado da região norte, nordeste e centro-oeste do Brasil, ainda hoje é composto por inúmeras usinas termelétricas – UTEs, as quais fornecem energia para vários municípios em forma de serviço público. Estas usinas são gerenciadas pelas concessionárias dos seus respectivos estados, existindo algumas empresas que operam como Produtores Independente de Energia – PIE, todas essas empresas e recebem subsídios no combustível utilizado para a geração de energia através da Conta de Consumo de Combustível – CCC, controlada pela Eletrobrás. (Eletrobrás, 2010)

Os sistemas isolados das regiões norte, nordeste e centro-oeste têm em operação um pouco mais de quinhentas UTEs, distribuídas nas mais variadas localidades, não existindo critérios e padronizações, quanto às instalações, os equipamentos, os procedimentos de operação e de manutenção, o controle e supervisão do consumo de combustível, índices de acompanhamento do desempenho das usinas, entre outros. (ANEEL, 2010)

É notório que o número de falhas no atendimento de energia de usinas, às localidades, em sistemas isolados é alto, superando os 20 % (ANEEL, 2010), assim como é alta também as perdas nos processos de distribuição, armazenamento e consumo de combustível, acima de 18 % (Eletrobrás, 2010). A grande questão é como determinar as falhas ou os pontos mais críticos dos sistemas de geração a fim de minimizar tais falhas? E mais, como reduzir os custos operacionais e de manutenção das UTEs, aumentando a confiabilidade operacional dos sistemas de geração, reduzindo o custo da geração e, conseqüentemente, o custo final da energia gerada?

Neste artigo serão mostrados os resultados da implantação da metodologia “Ciclo de Rotinas”, onde foi realizado o levantamento das condições operacionais das usinas termelétricas do sistema isolado do Estado do Pará, através do desenvolvimento de diagnósticos e os prognósticos, os quais propiciaram o controle, a supervisão, a fiscalização e a determinação dos pontos críticos de cada uma das UTEs, cujo estudo de caso foi nas unidades geradoras – UDG, com motores a diesel, no período de 2002 a 2008.

2. CICLO DE ROTINAS PARA MELHORIA DE SISTEMAS E PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Conforme Santos, *et. al.*, (2009) o método “Ciclo de Rotinas” apresenta uma sistemática gerencial para obter se as todas as informações operacionais de sistemas de geração de energia elétrica fazendo uso de ferramentas de inteligência artificial, agregando outros métodos de gestão e administrativos, como: Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC, os métodos de administração de sistemas e processos, como: 5S, Manutenção Produtiva Total – TPM, Seis Sigmas, etc., além de engenharia de confiabilidade.



Figura 1. Tela inicial do software “Ciclo de Rotinas”.

O método “Ciclo de Rotinas” tem como objetivo geral o desenvolvimento e a implantação de uma metodologia sistêmica de planejamento das atividades de manutenção, monitoramento e supervisão, identificando os pontos críticos e as falhas em UDGs, visando à realização dos diagnósticos e dos prognósticos que propiciarão o controle, a supervisão e a melhoria das condições operacionais das UTEs e, conseqüentemente, a redução dos custos operacionais.

De acordo com as Figuras (1), 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 Ciclo de Rotinas

Tarefas/Atividades	Descrições
Identificação e/ou inspeção	Identificar as necessidades, deficiências e/ou ocorrências no processo, problemas a serem corrigidos, os tipos de falhas freqüentes, os componentes dos sistemas e subsistemas que apresentam níveis críticos de desgaste, falhas nas condições ambientais, etc.
Análises e/ou definição das ferramentas	Realizar uma análise das necessidades para verificar todos os aspectos envolvidos solução das necessidades identificadas e definir as ferramentas gerenciais a serem utilizadas no sistema de geração a fim de sanar as anomalias.
Sistematização e/ou classificação	Aplicando inteligência artificial identificar, classificar e sistematizar sistemas e subsistemas da UTEs de forma que seja possível identificar a função de todos os elementos dos sistemas.
Parametrização e/ou Padronização	Levantar as condições e os parâmetros operacionais dos equipamentos que compõe um sistema, padronizando os elementos de consumo dos mesmos, buscando a redução dos custos.
Planejamento, normalização e treinamento	Configurar e detalhar o planejamento a ser executado para atingir os objetivos e metas traçadas. São elaborados os cronogramas físicos e financeiros, as normas e os procedimentos operacionais para realização de treinamentos e reciclagens no sistema de geração de energia.
Execução e/ou otimização	Objetivando executar o planejamento desenvolvido de forma a executá-lo com eficiência e eficácia. Posteriormente busca-se as formas de melhorar o planejamento desenvolvido.
Monitoramento e/ou controle	Verificar se a execução/otimização foi feita de forma eficiente e eficaz no planejamento, ou se as atividades tendem a atingir os objetivos e metas estabelecidas anteriormente.
Avaliação e/ou tratamento	Avaliar os sistemas, fazendo o tratamento dos riscos dos processos, simulando as possíveis perdas de UDGs e os danos que possam ocorrer no sistema de geração, com objetivo de facilitar a elaboração de contratos de seguro de equipamentos críticos.

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

No método “Ciclo de Rotinas” todas as ocorrências que impedem o funcionamento normal dos sistemas das unidades geradoras são registrados na base de conhecimento do software desenvolvido. Nele é possível se fazer um diagnóstico das condições operacionais das unidades geradoras, incluindo o tempo de operação das UDGs em relação ao plano de manutenção, fornecendo subsídios para os responsáveis para a antecipação ou postergação das intervenções nas unidades geradoras.

Imediatamente após a detecção e comunicação das anomalias são abertas solicitações de manutenção e, posteriormente, ordens de serviço de manutenção, sendo que todo e qualquer serviço só poderão ser executados após um planejamento prévio, impedindo a execução de manutenção corretiva não programada, devido à mesma apresentar alto custo de manutenção e operacional, com exceção 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 (2). (Rosenblatt, 1958). O processo se inicia no momento que ocorre uma anomalia no sistema, automaticamente são geradas as ordens de serviço – OS, onde são expostas as informações das condições normais de operação e do plano de manutenção da UDG, seguida por uma análise da UTE. As comparações das condições são feitas com relação ao teste de recepção ou comissionamento dos equipamentos existentes na base de conhecimento do programa.

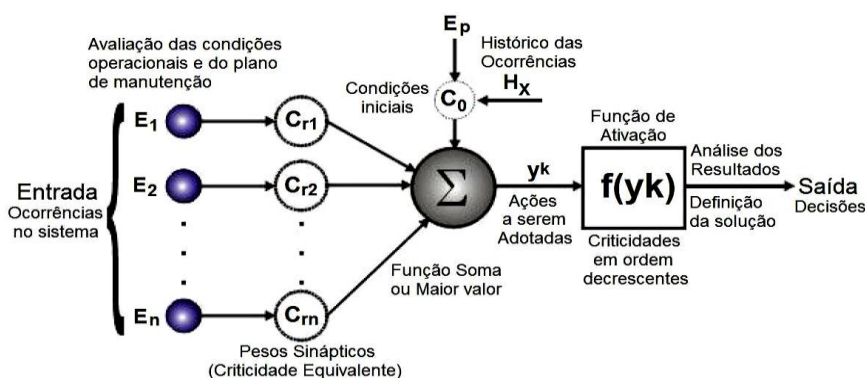


Figura 2. Modelo de perceptron proposto pela metodologia do Ciclo de rotinas para a tomada de decisão utilizando ferramentas de inteligência artificial híbrida.

Conforme mostrado no esquema da Figura (2), durante a abertura da solicitação de manutenção ou da ordem de serviço, o software desenvolvido, conduz o operador para uma investigação nas condições padrões do equipamento em análise, seguida de uma análise na função Fuzzy de histórico de ocorrências no sistema de geração.

O diagnóstico da ocorrência e as melhores sugestões para a solução das anomalias são mostrados para o operador do sistema, que analisa os resultados e define as ações a serem tomadas. As escolhas feitas pela pessoa responsável pela manutenção farão parte da base de conhecimento do programa e, portanto, serão disponibilizadas para outros casos.

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.

A inferência Fuzzy, baseada na técnica de Mamdani, visa à detecção dos componentes mais críticos das UTEs. Sendo que os resultados o processo são dispostos, para o operador, em ordem decrescente de criticidade. Um exemplo de inferência utilizada no método “Ciclo de Rotinas”, mostrado na Figura (2), apresenta a seguinte lógica:

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

Os resultados são as ações de defuzzyficação sob a forma da função de ativação Fuzzy $f(Y_k)$, como mostrado na Figura (2), para a implementação de um conjunto de ações de manutenção, operacionais e administrativas nos elementos da geração de energia elétrica, 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, agrupados em categorias e de acordo com a base de conhecimentos do software do “Ciclo de Rotinas”, é possível formar uma listagem básica para treinamento de redes neurais para cada categoria de eventos, visando o desenvolvimento de prognósticos do sistema de geração e adaptação de planos para a manutenção das unidades geradoras. Tabela (6)

3. APLICAÇÃO DO CICLO DE ROTINAS NA REGIÃO NORTE DO BRASIL

O método “Ciclo de Rotinas” foi implantado nas 18 UTEs da concessionária do Pará, com início das atividades em 2002, onde foram monitoradas 73 UDGs dos mais variados portes e de diversos fabricantes, sendo que para o levantamento de todas as informações técnicas foram desenvolvidas as seguintes tarefas e atividades:

3.1. Identificação e/ou inspeção

Considerando-se que a geração de energia elétrica nas localidades atendidas pela concessionária do Pará, em serviço público, é 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.

Além das questões referentes aos desligamentos, com a utilização das ferramentas gerenciais foram identificados ainda outros pontos críticos nas UTEs a diesel, como:

- Elevado consumo específico das unidades geradoras;
- Diversidade de elementos consumíveis;
- Falta de normas e procedimentos operacionais específicos para a geração de energia elétrica;
- Falta de treinamento dos operadores e da equipe de manutenção;

Segundo Santos, *et. al.*, (2009) a Figura (3) apresenta os resultados do acompanhamento dos desligamentos ocorridos nas UTEs do sistema isolado no período de 2003 a 2008 destacando a participação das empresas geradoras. Este monitoramento foi realizado em todas as usinas do sistema isolado do Pará, as próprias da concessionária (17 usinas), e as usinas de empresas terceirizadas (23 usinas), distribuídas pelo Estado. (Santos, 2004)

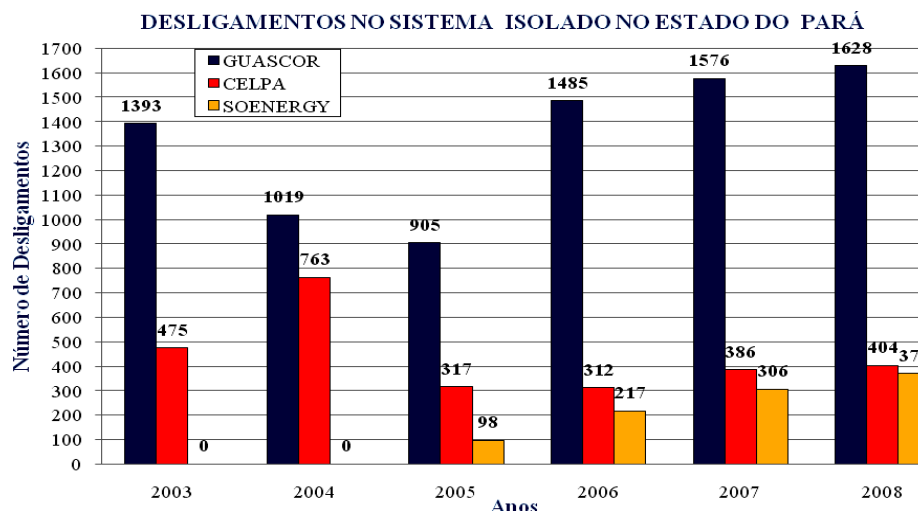


Figura 3. Desligamentos ocorridos no sistema isolado do Estado do Pará no período de 2003 a 2008.

A Figura (3) mostra que a implantação do método “Ciclo de Rotinas” nas usinas da concessionária, em relação ao controle dos desligamentos, reverteu à tendência de crescimento acentuado destas ocorrências, reduzindo e estabilizando estes problemas a partir de 2005, ou seja, após o primeiro giro das atividades do método, enquanto que o monitoramento das ocorrências de desligamentos das empresas terceirizadas apresentou uma tendência de forte crescimento no mesmo período de estudo.

Além da identificação desta criticidade era necessário se identificar quais os componentes e/ou elementos das usinas eram os responsáveis pelos desligamentos. Para que esta atividade pudesse ser desenvolvida foi necessário se realizar um inventário geral dos estoques de materiais, dos equipamentos e dos procedimentos e normas aplicados nas usinas, a fim de cadastrá-los em bancos de dados relacionais do software desenvolvido, desta forma foi possível se iniciar a formação da base de conhecimento, conforme o perceptron mostrado na Figura (2).

Conjuntamente ao monitoramento dos desligamentos das usinas da concessionária, foram concentrados esforços na organização, monitoramento, padronização de documentos, normas e procedimentos e, principalmente na redução de custos operacionais e de manutenção da geração de energia elétrica.

3.2. Análise e/ou definição das ferramentas

A meta traçada, inicialmente, para a implantação do método “Ciclo de Rotinas” nas usinas da concessionária, foi à redução e controle dos desligamentos ocorridos nas UTEs, reduzindo, em números absolutos, as ocorrências para valores médios abaixo de 03 (três) ocorrências mensais por usina, até 2007, pois por se tratar de um sistema dinâmico era aceitável ocorrer interrupções em forma de desligamentos programados, para manutenções, revisões, inspeções, etc., proativamente, sendo que todas as ocorrências de desligamentos foram registradas e monitoradas.

Mesmo a concessionária dispondo de um software comercial para controle da manutenção nas usinas, foi observado que muitos dos acompanhamentos de ocorrências eram feitos através de planilhas eletrônicas ou por banco de dados paralelos, ambos desenvolvidos por funcionários da própria empresa.

Por se tratar de um software desenvolvido em uma plataforma controlada pela empresa foi possível se inserir no “Ciclo de Rotinas” todas as planilhas e bancos de dados utilizados pela empresa, onde foi possível se acompanhar a tendência do comportamento das anomalias, através de gráficos e tabelas desenvolvidas no próprio software.

3.3. Sistematização e/ou classificação

A partir das informações do inventário realizado nas usinas da concessionária do Pará, formou-se um grande banco de dados, cujos elementos foram codificados e cadastrados na base de conhecimento do software “Ciclo de Rotinas”, incluindo seus subsistemas, periféricos e acessórios, sendo que a divisão obedeceu à seguinte ordem: Sistemas auxiliares e gerais; Sistemas do motor; Sistemas do gerador; Sistemas do quadro de comandos; Sistemas da subestação da usina; Sistemas de estruturas civis, Sistemas de segurança, componentes externos, etc.

Ainda foi necessário se proceder com a classificação das unidades geradoras, em função das potências nominais (P_N) do motor e potências instaladas (P_I) do alternador (gerador elétrico), como mostrado na Tabela (2).

Tabela 2. Classificação das unidades geradoras em função das potências.

Equipamentos	Motor	Gerador ou Alternador Elétrico
Classificação	Potência Nominal (hp)	Potência Instalada (kW)
Pequeno Porte	$550 \leq P_n$	$350 \leq P_I$
Médio Porte	$550 < P_n \leq 1400$	$350 < P_I \leq 1000$
Grande Porte	$1400 < P_n$	$1000 < P_I$

Fonte: Santos (2004).

A classificação, mostrada na Tabela (2), facilitou o desenvolvimento de procedimentos e normas de operação e de manutenção para as UDGs e, conseqüentemente, a elaboração de treinamentos e reciclagem do pessoal envolvido com a geração de energia. Estes treinamentos e reciclagens passaram a ser planejados e executados pela própria empresa.

Outra classificação adotada foi para a codificação operacional dos elementos dos sistemas de geração, onde foi utilizado elementos de inteligência artificial 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 comparados aos genes, os quais receberam a codificação genética (genótipo) do tipo não relacional, de forma que fosse possível identificá-lo no sistema de geração, de forma rápida e eficiente e sem duplicidades, como mostrado na Tabela (6).

Houve a necessidade de se sistematizar os planos de manutenção das unidades geradoras, definindo a realização da manutenção por classificação do equipamento pelo porte, Tabela (2), por horas de operação e por grupamento de máquinas de mesmo fabricante, conforme mostrado na Tabela (3), onde se observa o plano de manutenção aplicado.

Tabela 3. Plano de manutenção das unidades geradoras de todas as usinas da concessionária.

UDGs	Comissionamento (C0)	Periódica (C1)	Intervalar (C2)	Revisão Parcial (C3p)	Revisão Geral (C3g)
Pequeno Porte	12.000	500	3.000	6.000	12.000
Médio Porte	20.000	500	2.000	10.000	20.000
Grande Porte	24.000	500	3.000	12.000	24.000

Fonte: Santos (2004).

Foram desenvolvidos procedimentos operacionais e de manutenção para realização de cada um dos tipos de manutenção, mostrados na Tabela (3), onde se passou a controlar a listagem básica de materiais a serem aplicados, os tempos de atendimento e os de realização dos serviços. Nesta atividade era possível simular os custos envolvidos na manutenção, a fim de avaliar qual o local apresentava menor custo para realização dos serviços, se nas usinas, ou na oficina do departamento de manutenção. Durante as simulações eram considerados aspectos como: custo da listagem de materiais; transporte dos materiais e equipamentos até o a UTE; custo da mão de obra (homem x hora); deslocamentos, diárias, hospedagens da equipe de manutenção; infra-estrutura do local para realização dos serviços, outros.

Fazendo parte dos planos de manutenção foram criados os planos de manutenção para geradores elétricos, quadro de comandos e transformadores, com seus respectivos procedimentos de inspeções.

3.4. Parametrização e/ou padronização

Identificadas as necessidades das usinas era necessário se obter os parâmetros, ou os limites operacionais para a operação e manutenção das unidades geradoras, de todas as usinas da concessionária do Pará. Desta forma foram realizados testes de comissionamento nas UDGs, conforme as classificações mostradas na Tabela (2).

Segundo Santos (2004) a curva característica de consumo específico de uma unidade geradora tem como finalidade definir a faixa (campo) de operação ótima do grupo gerador e é obtida através de testes de comissionamento conforme as normas NBR 6376, NBR 8422 e NBR 5477. A Figura (4) mostra um exemplo de curva de consumo específico para uma unidade geradora de médio porte de uma das localidades da concessionária do Pará. (Santos, 2004)

Dos testes de comissionamento realizados nos grupos geradores das usinas termelétricas foi possível se definir os parâmetros operacionais das UDGs, em função do porte e da potência nominal, sendo que estas informações foram colocadas na base de conhecimento do software desenvolvido, as quais eram as referências operacionais para a elaboração de diagnósticos e prognósticos operacionais.

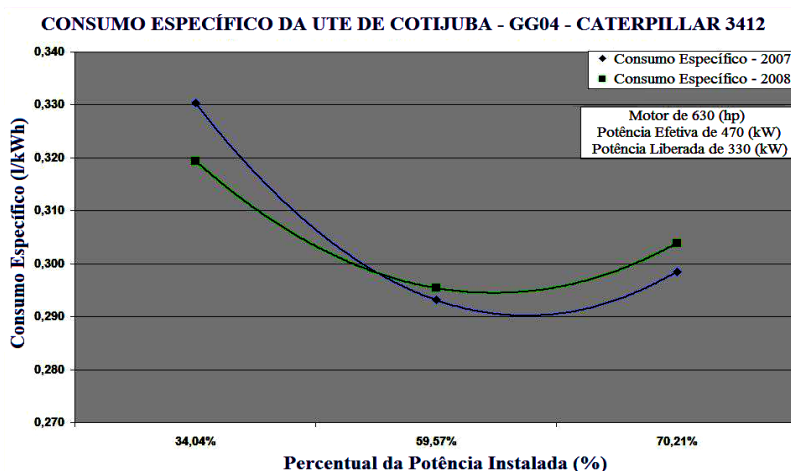


Figura 4. Curva de consumo específico de uma UDG de médio porte da UTE de Cotijuba.

Na Figura (4) percebe-se que houve um aumento do consumo específico da unidade geradora da UTE de Cotijuba, em ensaios consecutivos entre duas revisões gerais. Esta variação foi devido ao regime de operação, a modulação de carga, a degradação de alguns componentes do motor, entre outros fatores, além da elevada vida útil da UDG. Através destes fatores foi possível simular a relação custo benefício das revisões, reduzindo os custos destas operações.

Com a padronização dos procedimentos dos ensaios de comissionamento foi possível se avaliar o desempenho operacional de todos os grupos geradores da concessionária, através do monitoramento do seu consumo específico e acompanhar o comportamento operacional pelas faixas de consumo específico de combustível em um determinado tempo. As faixas de consumo específico em função da potência nominal dos motores estão expostas na Tabela (4).

Tabela 4. Faixa de consumo específico das unidades geradoras em função do porte das máquinas.

Classificação	Potência Nominal (hp)	Consumo Específico (l/kWh)
Pequeno Porte	$550 \leq P_n$	0,330 – 0,360
Médio Porte	$550 < P_n \leq 1400$	0,300 – 0,330
Grande Porte	$1400 < P_n$	0,270 – 0,300

Fonte: Santos (2004).

Com as faixas operacionais de consumo específico das unidades geradoras, Tabela (4), foi criada uma sistemática de monitoramento global para cada usina. Através desta atividade foi possível se detectar quais os equipamentos que operavam fora das condições estipuladas e se investigar quais as causas desse comportamento.

Visando a redução de custos operacionais foi estudada a extensão da periodicidade de troca dos elementos consumíveis das UDGs. Este estudo foi motivado pelas identificações de grande diversidade de elementos consumíveis, com diferentes periodicidades de troca. Ao final do estudo foram padronizados os elementos filtrantes de alguns tipos de motores. O desenvolvimento deste estudo ocorreu no período de 2002 a 2006, conforme mostrado na Tabela (5).

Tabela 5. Alteração na periodicidade de troca dos elementos consumíveis das usinas termelétrica.

Periodicidade de uso dos elementos consumíveis nos motores	2002	2006
Filtros		
Água (h)	300	500
Ar (h)	500	1000
Óleo lubrificante (h) (principal, <i>by pass</i> , e secundário)	250 / 300	500
Óleo combustível (h) da linha de alimentação de óleo / do corpo do motor	300	500 / 1000
Aditivos para radiador (h)	Sem uso	6.000
Carga de óleo lubrificante (h)	250	500
Tipo de óleo combustível (diesel)	Marítimo	Tipo B / Biodiesel B2
Correias de acionamento do ventilador (h)	1.000	6.000

Fonte: Ciclo de Rotinas (2006).

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, foi desenvolvido o programa de acompanhamento de análises da qualidade da água do sistema de refrigeração e de óleos lubrificantes usados nos motores das UDGs no qual foi possível estudar a extensão do uso da carga de lubrificante e a substituição dos filtros de água por aditivos para radiador, reduzindo os custos de manutenção e de operação, conforme mostrado na Tabela (5).

3.5. Planejamento, normalização e treinamento

Para a implantação do método “Ciclo de Rotinas” foi necessário se desenvolver novas, ou atualizar as várias normas, além de alguns procedimentos de manutenção e operação existentes na empresa, haja vista que, durante o inventário realizado, foi constatado que vários operadores das usinas afirmaram desconhecer tais documentos, chegando ao ponto de muitos não lembrarem mais dos treinamentos, que eram realizados somente no momento da contratação de novos funcionários.

Para sanar este quadro foi planejado, juntamente com o departamento de administração e recursos humanos da concessionária do Pará, no período de 2002 a 2004, 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 desenvolvidas novas, atualizadas e aprovadas, pela diretoria técnica concessionária, algumas normas e procedimentos para a manutenção e operação das usinas, em especial das normas referentes às instruções técnicas de manutenção e de operação e as instruções de preservação do meio ambiente das usinas.

3.6. Execução e/ou otimização

A execução do planejamento do método “Ciclo de Rotinas” ocorreu em duas fases: uma onde foi desenvolvida as cinco primeiras atividades e tarefas do método, mostrado na Figura (1) e descritos na Tabela (1), ou seja, a fase de identificação, de análise, de sistematização, de parametrização e de planejamento, que foi realizada no período de 2002 a 2004 e outra que envolveu as atividades restantes do “Ciclo de Rotinas”, isto é as fases de treinamento, de execução, de monitoramento, de controle e de avaliação, desenvolvida no período de 2004 a 2005, quando efetivamente foi possível se concluir primeiro giro das tarefas e atividades do método. De 2006 a 2008 as atividades foram concentradas nas ações de monitoramento, de otimização e de tratamento das necessidades dos elementos do sistema de geração.

3.7. Monitoramento e/ou controle

Após a realização de treinamentos com todos os operadores e com a equipe de manutenção, foi desenvolvida no software uma rotina de acompanhamento das operações diárias das usinas através das curvas de carga construídas para cada UTE, como mostrado no exemplo da Figura (5), onde se vê a tela do software “Ciclo de Rotinas” onde se realiza o monitoramento da operação através da curva de carga da localidade de Anajás em 2008. O acompanhamento da operação era diário e levava em consideração as características das unidades geradoras. O software apresentava como resultado, para o usuário, as melhores configurações de operação de máquinas para cada horário do dia, em função da demanda a ser atendida, visando o consumo específico ótimo da usina, assim como o maior fator de utilização da UTE.

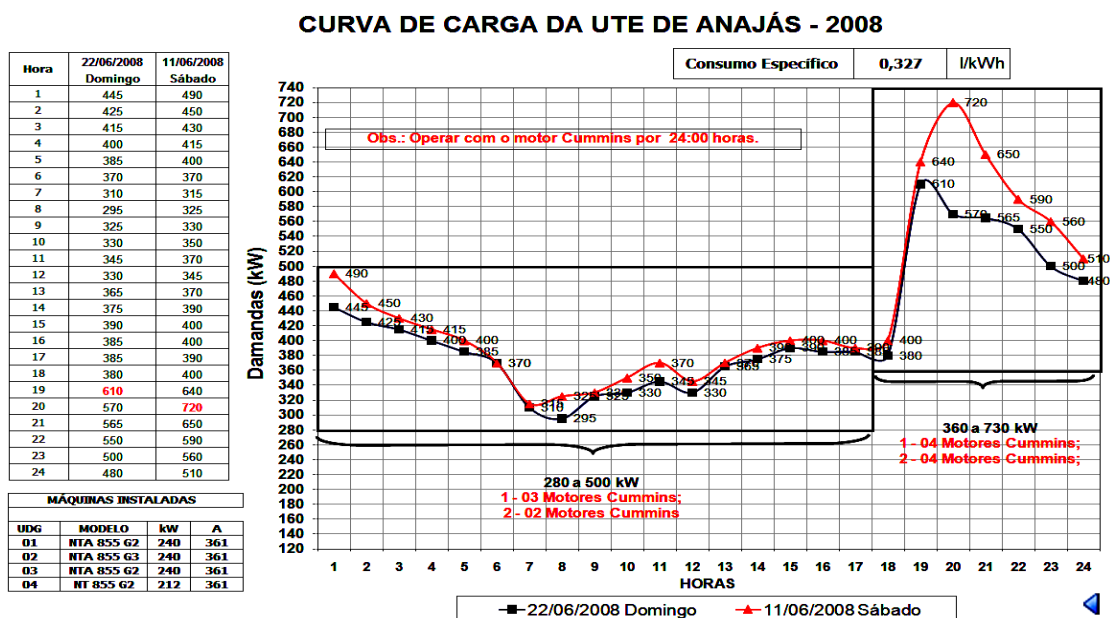


Figura 5. Monitoramento das curvas de carga para a UTE de Anajás em 2008.

Através das análises nas curvas de cargas das usinas, como mostrado no exemplo da Figura (5), foi possível se alterar o regime de operação de algumas UDGs, pois antes a operação era feita com rotatividade de máquinas a cada oito horas, passando para um regime operação de vinte e quatro horas, a fim aumentar a confiabilidade operacional das máquinas e reduzir o número de avarias nos elementos do sistema de partida dos motores.

Após a identificação dos elementos mais críticos de cada usina, como mostrado na Tabela (6), onde pode ser visto as maiores criticidades das UTEs, no período de 2005 a 2008, juntamente com seus códigos genéticos e os nomes dos componentes, além dos diagnósticos e prognósticos e ações sugeridas para se sanar cada uma das ocorrências.

Tabela 6. Diagnósticos e prognósticos dos elementos críticos das usinas do Estado do Pará.

	Usina	Código Genético do Elemento	Componente do sistema	Diagnóstico	Prognóstico / Ação Adotada
2005	Chaves	01.06.02.01.01.003	Bomba D'água	Qualidade da água de arrefecimento ruim (uso da água do rio).	Continuará havendo corrosão dos componentes do sistema de arrefecimento dos motores / Realização de testes físico-químicos da qualidade da água para se definir tipo de tratamento a ser utilizado.
	Jacareacanga	01.08.01.01.03.060	Válvula Solenóide	Queima da válvula solenóide do motor	Queima por deficiência na alimentação do sistema de corrente contínua da usina / Realização de manutenção preventiva no banco de baterias da usina
	Bagre	01.03.01.01.01.002	Radiador	Qualidade da água de arrefecimento ruim (uso da água do rio).	Retirada do motor de operação por superaquecimento do mesmo por entupimento das galerias do radiador / Estudar e substituição dos filtros de água por fluido para radiador
2006	Bagre	01.03.03.04.13.198	Excitatriz	Queima dos fusíveis da excitatriz	Existência de correntes acima e/ou abaixo da faixa nominal da excitatriz do quadro de comandos / Desenvolvimento de estudos para ampliar as proteções elétricas e a faixa de amperagem do equipamento
	Melgaço	01.09.03.01.03.050	Tubulação de óleo Combustível	Entupimento das tubulações por sujeira e microorganismos	Ocorrência de desligamentos por falta de combustível e danos nos componentes do sistema de alimentação do motor / Investigação sobre a qualidade do combustível entregue e armazenado nas usinas (teste de laboratório)
	Vila Mandi	01.14.01.04.13.221	Sensor de Pressão de Óleo	UDG sai de operação por sobrecarga	Atuação correta do sistema de proteção da UDG, porém as diversas saídas causam queima em outros componentes / Realização de monitoramento das condições operacionais e reforço das proteções.
2007	Cotijuba	01.07.04.08.14.259	Falha da Operação	Operadores com dificuldade de realizar as operações de manobras e sincronismo da UTE	Necessidade de treinamentos aos novos operadores e de reciclagem aos operadores antigos da usina / Realização de treinamentos e acompanhamento dos coordenadores da manutenção elétrica e mecânica
	Vila Mandi	01.14.03.05.13.222	Sensor de sobrevelocidade	As UDG saem de operação por atuação do sistema de proteção por sobrecarga	Aumento das saídas da UTE em função de um grande consumidor não registrado (serraria) na localidade / Utilização de duas UDGs para atender a carga, as quais passariam a operar com metade de sua capacidade nominal
	Bagre	01.03.02.04.13.198	Excitatriz	Perda de excitação da UDG	Foi verificada falha operacional nas manobras de sincronismo das UDGs / Realização de treinamentos e reciclagem para os operadores da UTE, sendo realizada a revisão geral dos quadros de comandos.
2008	Vila Mandi	01.14.01.04.13.221	Sensor de Pressão de Óleo	Saída do motor por sobrecarga	Crescimento inesperado da carga das localidades / Operar com as três UDGs em certos horários do dia, conforme a curva de carga, a fim de evitar desligamentos da UTE.
	Jacareacanga	01.08.03.01.03.060	Válvula Solenóide	Operação indevida da válvula solenóide	Operação da usina retirava o equipamento do automático e operavam as UDGs, ou seja, UDGs operavam sem proteção / Desenvolvimento de novo procedimento operacional e treinamento dos operadores.
	Bagre	01.03.01.04.13.198	Excitatriz	Queima dos fusíveis da excitatriz do quadro de comandos	Deficiência no sistema de corrente contínua da usina / Realização de manutenção com substituição de todas as baterias do banco de baterias da usina e desenvolvimento de procedimento operacional.

Fonte: Ciclo de Rotinas, 2008.

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: Criticidade Operacional dos Equipamentos – C_{EQ} ; Criticidade equivalente no tempo – $C_{EQTEMPO}$ e 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 o 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 item busca mostrar a influência do mau funcionamento do elemento no sistema, partindo dos indicadores de produtividade e disponibilidade do sistema de geração. A composição da criticidade dos componentes é calculada pela Equação (1), sendo σ_s o desvio padrão das medidas:

$$C_{COMP} = C_{EQ} + C_{QTEMPO} + C_{ES} + D(\%) \pm \sigma_s, \quad (1)$$

Com a aplicação da Eq. (1), foi possível avaliar as UDGs separadamente, determinando as criticidades de cada uma e, usando a base de conhecimento, o plano de manutenção desenvolvido e a função histórico $f(Y_k)$, decidir sobre quais as ações a serem tomadas para resolver as anomalias nos sistemas de forma planejada, conforme a Tabela (6).

3.8. Avaliação e tratamento

Uma das avaliações do método “Ciclo de Rotinas” foi realizada em função da disponibilidade média das usinas da concessionária do Pará que, em 2002 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, mantiveram-se UDGs reserva, para que, caso se perdesse a maior máquina da UTE, seria possível manter a geração de energia até que se processasse a recuperação da máquina avariada.

No tratamento das anomalias observou-se que, apesar da tendência de aumento do número de desligamentos das usinas da concessionária, Figura (3), a cada ano novos problemas ficava evidentes, como mostrados nos gráficos das Figuras (6a) e (6b), que mostram os desligamentos das usinas do sistema isolado do Pará no período de 2007 e 2008.

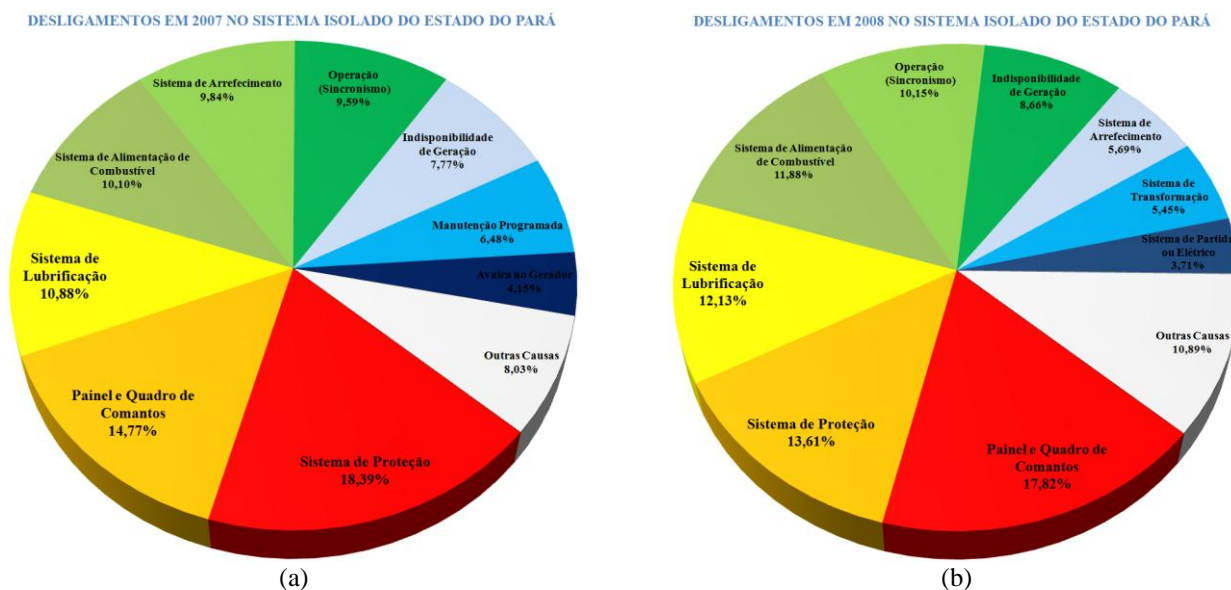


Figura 6. Monitoramento dos desligamentos no sistema isolado em: (a) 2007 e (b) 2008.

Em 2007, Figura (6a), as anomalias de desligamentos foram devidas às falhas no sistema de proteção; avarias nos componentes dos painéis e quadros de comandos; falhas no sistema de lubrificação dos motores, com execução de inúmeras manutenções programadas. Em 2008, Figura (6b), os desligamentos foram devidos às avarias nos componentes dos painéis e quadros de comandos; falhas no sistema de proteção e no sistema de lubrificação.

Ressalta-se que os resultados obtidos na Tabela (6) e nos gráficos da Figura (6a) e (6b) foram obtidos a partir de criteriosa investigação das reais causas dos desligamentos, sendo necessária a comunicação direta com a equipe de operação de cada uma das usinas da concessionária, a fim de evitar desvios de avaliação das causas.

4. CONCLUSÃO

A implantação do método “Ciclo de Rotinas” nas usinas da concessionária, mostrou-se eficiente, pois as metas e objetivos determinados foram alcançados antes do período estipulado, com redução do número de desligamentos das usinas em 15 %, Figura (3), e custos operacionais acima de 20%. Estes resultados só foram possíveis em função da rigidez no desenvolvimento sequenciado das tarefas e atividades do método, as quais, apesar de um longo tempo, foram necessárias para a implantação do método no departamento de manutenção da concessionária.

A através da realização dos inventários e o desenvolvimento de procedimentos e normas, além das análises nas curvas de carga, Figura (5), de consumo específico das UDGs, Figura (4), juntamente com formação da função de histórico de ocorrência [$f(Y_k)$], a classificação das ocorrências de desligamentos em grupos, Figuras (6a) e (6b) e com a determinação dos pontos críticos de cada usina, Tabela (6), foi possível se elaborar e simular um conjunto de diagnósticos para todas as possíveis anomalias que viessem a ocorrer nas UTEs a fim de saná-las proativamente.

Por se tratar de um sistema especialista o software do método “Ciclo de Rotinas”, através das simulações e elaboração dos diagnósticos e prognósticos, forneceu as soluções apropriadas para cada anomalia que viesse a ocorrer nas usinas, indicando as melhores soluções para operador do sistema, que analisava os resultados e definia as ações a serem tomadas. Todas as escolhas realizadas pelo responsável pela manutenção passaram a fazer parte da base de conhecimento do programa e, conseqüentemente, auxiliavam na solução de outros tipos de anomalias.

Os próximos passos deste trabalho é a implementação dessa metodologia “Ciclo de Rotinas” em outras fontes de geração de energia, tais como: usinas termelétricas a vapor, gás ou ciclo combinado. Acredita-se que com a implantação do método seja possível se executar o treinamento de redes neurais para simular o comportamento das falhas nos sistemas de geração, a partir do conhecimento das características e parâmetros técnicos e térmicos individualizados para cada sistema de geração, o que propiciará a realização de diagnósticos e prognósticos de manutenções, de conservações, chegando até ao desenvolvimento de procedimentos para a hibernação dos componentes e elementos do sistema de geração das UTEs.

5. AGRADECIMENTOS

A CAPES e a Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá – FAPEPE, pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, www.aneel.gov.br, acessado em 25/03/2010.
- ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S. A., www.eletronbras.gov.br, acessado em 25/03/2010.
- Conde, Cláudio. L. R., – Análise de dados e definição de indicadores para a regulação de usinas termelétricas dos sistemas isolados, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Belém – Pará, 2006.
- Rosenblatt, Frank – *The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain*, laboratório aeronáutico de Cornell, *Psychological Review*, vol. 65, N° 6, 1958, pp. 386 – 408.
- Santos, Eraldo C., – Curso de Operação e Manutenção de Unidades Geradoras – Departamento de Manutenção da Geração – DEMAG / Engenharia, Centrais Elétricas do Pará S. A. – CELPA, Belém – PA, 2004.
- Santos, Eraldo. C.; Nascimento, M. A. R., – *Method of Determination of Critical Components of Power Generation System*, COBEM2009, the 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado – RS, 2009.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

ANALYSIS OF THE CRITICALITY AND FAILURES IN COMPONENTS OF THE ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEMS

Eraldo Cruz dos Santos, eraldo@unifei.edu.br¹

Marco Antônio Rosa do Nascimento, marcoantonio@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Resumo: *This paper shows the results of the implementation of a methodology for the determination of the critical components and the failure analysis in systems for generating electricity. The case study method was entitled “Cycle of Routines” in thermoelectric power plants diesel engine – TPP, where they were identified, analyzed, systematized, classified, standardized and parametrized the systems and subsystems of generation, forming the basis for structured knowledge, which allowed the completion of adjustments in programs to maintain them. This study was motivated by the need to identify the TPP critical points, characterizing and quantifying the most common operational faults while suggesting procedures to solve them. This methodol was implemented in current diesel TPPs in the north and midwest region of Brazil. This methodology is a set of management activities of power generation system more comprehensive, called “Cycle of Routines for Process Systems Improvement and Power Generation”, which aims at the development and implementation of a systematic management and planning of activities, maintenance operation, and the monitoring and diagnosis of the TPP generating units. This methodology uses artificial intelligence elements such as Fuzzy logic, genetic algorithms and neural networks. These elements were implemented in the software “Cycle of Routines”, to analyze the operational conditions of gensets TPPs, through their diagnosis and prognosis, which will facilitate the control and supervision of the monitoring systems. The results of the implementation of the “Cycle of Routines” brought as a consequence, increasing the operational reliability of the generating units by 40 %, with significant reduction of overall costs of operation and maintenance, up to 20 % and reducing the number of outages and occurrences of 15 % over time.*

Keywords: *Power Generation; Critical Systems, Fault Maintenance and Operation, Maintenance Management, Artificial Intelligence.*