

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

OSVALDO JOSÉ DE SOUZA

SISTEMA INTELIGENTE PARA ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE PERTUBAÇÃO EM  
USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CURITIBA

2019

OSVALDO JOSÉ DE SOUZA

SISTEMA INTELIGENTE PARA DIAGNÓSTICO DE PERTURBAÇÕES EM USINAS  
DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração em Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com a Faculdade Cidade Verde, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Coorientador: M.Sc. Fabrizio Nicolai Mancini

CURITIBA

2019

S729s

Souza, Osvaldo José de.

Sistema inteligente para análise e diagnóstico de perturbação em usinas de geração de energia elétrica / Osvaldo José de Souza. – Curitiba, 2019.

85 p. il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki.

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto Lactec – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2019.

Inclui Referências bibliográficas.

1. Raciocínio baseado em casos. 2. Desligamento automático. 3. Geração de energia I. Aoki, Alexandre Rasi. II. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto Lactec – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia. III. Título.

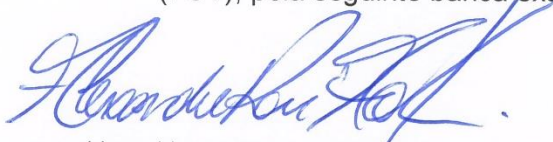
CDD 621.31

## TERMO DE APROVAÇÃO

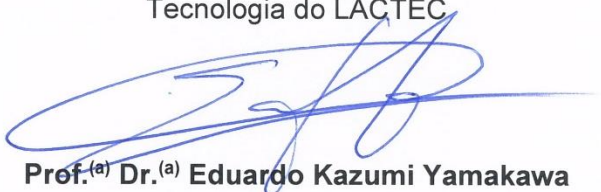
**OSVALDO JOSÉ DE SOUZA**

### **SISTEMA INTELIGENTE PARA ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE PERTURBAÇÕES EM USINAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com a Faculdade Cidade Verde (FCV), pela seguinte banca examinadora:



**ORIENTADOR(A): Prof.<sup>(a)</sup> Dr.<sup>(a)</sup> Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki**  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)/Mestrado Profissional em Desenvolvimento de  
Tecnologia do LACTEC



**Prof.<sup>(a)</sup> Dr.<sup>(a)</sup> Eduardo Kazumi Yamakawa**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof.<sup>(a)</sup> Dr.<sup>(a)</sup> Lúcio de Medeiros**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof.<sup>(a)</sup> Dr.<sup>(a)</sup> Milton Pires Ramos**  
GRAM Pesquisa, Consultoria e Treinamento Ltda

Curitiba, 30 de agosto de 2019.

## RESUMO

Nas usinas de geração de energia elétrica a atividade de manutenção exige conhecimento multidisciplinar e é realizada por pessoas com experiência na área de atuação. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é o agente nacional responsável pela normatização do sistema elétrico brasileiro, define índices que devem ser praticados pelos agentes locais. O setor elétrico aponta para a necessidade de se melhorar os procedimentos e a realização das manutenções, conforme demonstram os relatórios anuais da ANEEL. Os especialistas no setor se aposentam, levam consigo o conhecimento acumulado e deixam os sucessores desguarnecidos da informação necessária para tratar, de forma eficaz, as ocorrências em equipamentos ou instalações de geração de energia. Por não haver metodologia de repasse das técnicas e dos métodos de manutenção, os novos empregados enfrentam dificuldades para solucionar defeitos que ocorrem nas usinas de geração de energia. Como as iniciativas de inovação tecnológica focam a modernização e não a manutenção dos equipamentos foi necessário compreender o método e as técnicas de solução empregadas na manutenção, as quais, na maioria das vezes, ficam registradas apenas na memória do empregado ou consultor. Essa dissertação objetiva desenvolver um sistema inteligente para o armazenamento do conhecimento e do histórico de desligamentos automáticos, cuja metodologia se baseie em casos reais, visando a melhoria do desempenho da equipe de manutenção e diminuição do tempo para sanar o defeito ocorrido. A metodologia utilizada para recuperação de casos de perturbação foi o Raciocínio Baseado em Casos (RBC). O levantamento de casos de ocorrências em unidades geradoras em usinas hidrelétricas demonstra que a abordagem de criação de um sistema inteligente para recuperar casos semelhantes é funcional e pode ser aplicada para auxiliar as equipes de manutenção, pois a partir de aspectos dos casos informados, este sistema identifica na base de conhecimento se há caso similar, as possíveis causas e os procedimentos que foram empregados para a solução do defeito. A aplicação desta técnica possibilita aumentar a base de conhecimento à medida que ocorra perturbação, inclusive em outras usinas com o mesmo tipo de equipamento. Foi possível comprovar a aplicabilidade dessa metodologia através da criação de um banco de casos, onde foi possível recuperar casos similares a uma nova perturbação inserida nesse sistema.

Palavras-chave: Raciocínio Baseado em Caso. Desligamento Automático. Usina de Geração de Energia.

## ABSTRACT

In power generation plants the maintenance activity requires multidisciplinary knowledge and is performed by people with experience in the area. The National Electric Energy Agency (ANEEL), which is the national agent responsible for the regulation of the Brazilian electric system, defines indices that should be practiced by local agents. The electricity sector points the necessity to improve the procedures and the maintenance, as shown in ANEEL's annual reports. Industry experts retire, take their accumulated knowledge with them, and leave successors lacking in information they need to effectively handle occurrences in power generation equipment or facilities. Because there is no methodology for transferring maintenance techniques and methods, new employees face difficulties in solving defects that occur in power plants. As technological innovation initiatives focus on modernization rather than the maintenance, it was necessary to understand the method and solution techniques employed in maintenance, which, in most cases, are recorded only in the memory of the employee or consultant. This dissertation aims to develop a method for storing knowledge and history of automatic shutdowns, whose methodology is based on real cases. And create a storage and query tool for these cases, which improves the performance of maintenance staff and decreases the time to remedy the defect. The methodology used to recover from disturbance cases was Case Based Reasoning (RBC). The survey of cases of occurrences in generating units in hydroelectric plants demonstrates that the approach of creating an intelligent system to recover similar cases is functional and can be applied to assist maintenance teams, because from aspects of the reported cases, this system identifies in the knowledge base if there is a similar case, the possible causes and the procedures that were employed to solve the defect. The application of this technique makes it possible to increase the knowledge base as disturbance occurs, including in other plants with the same type of equipment. It was possible to prove and effectiveness of this methodology through the creation of a case database, where it was possible to recover similar cases to a new disturbance inserted in this system.

Key-words: Case-based Reasoning. Automatic Shutdown. Power Generation Plan.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CICLO DO RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS .....	18
FIGURA 2 – ELEMENTOS BÁSICOS DA REDE DE PETRI.....	34
FIGURA 3 - VISÃO GERAL DO MODELO RBC .....	34
FIGURA 4 - ARQUITETURA DO COMPONENTE DE RACIOCÍNIO .....	35
FIGURA 5 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE RECUPERAÇÃO DE CASOS .....	36
FIGURA 6 - CICLO DO RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS .....	37
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA MONTAGEM DE UM BANCO DE CASOS .....	44
FIGURA 7 – FLUXO DA MONTAGEM DO MYCBR.....	45
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA MONTAGEM ESTRUTURAÇÃO MYCBR.....	47
FIGURA 10 - SHELL COM OS ATRIBUTOS .....	48
FIGURA 11 - CORTE TÍPICO DE UMA UNIDADE GERADORA COM TURBINA KAPLAN.....	49
FIGURA 12 - DIAGRAMA DE TRANSIÇÕES .....	50
FIGURA 13 – UNIFILAR DE PROTEÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO.....	52
FIGURA 14 - MATRIZ DE TRIP – PROTEÇÕES DE UNIDADE GERADORA .....	54
FIGURA 15 – ATRIBUTOS PARA A PESQUISA DE CASO .....	56
FIGURA 16 – ATRIBUTOS DA INSTÂNCIA EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS .....	58
FIGURA 17 – ATRIBUTOS DA INSTANCIA EQUIPAMENTOS SECUNDÁRIOS ...	61
FIGURA 18 – FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO.....	62
FIGURA 19 – SINALIZAÇÕES QUE INDICAM DESLIGAMENTO AUTOMÁTICO DE UG.....	63
FIGURA 20 – CASOS DE PERTURBAÇÕES COM UNIDADES GERADORAS DE UHE.....	64
FIGURA 21 – SIMILARIDADE COM PESO 1 PARA OS ATRIBUTOS .....	67
FIGURA 22 – SIMILARIDADE COM PESOS CONFORME ESPECIALISTA.....	68
FIGURA 23 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO NO SISTEMA DE EXCITAÇÃO .....	69
FIGURA 24 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO DA COMPORTA DA TOMADA D'ÁGUA – PROBLEMA HIDRÁULICO.....	70

FIGURA 25 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO DA COMPORTA DA TOMADA D'ÁGUA – PROBLEMA MECÂNICO.....	71
FIGURA 26 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO NO SERVIÇO AUXILIAR .....	72



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PESQUISA DOS PESOS INDICADOS POR ESPECIALISTAS DE CADA INSTÂNCIA .....	65
TABELA 2 – EXEMPLO DE VALORES DE REFERÊNCIA DE ALGUMAS USINAS DO SETOR ELÉTRICO.....	82
TABELA 3 – UNIVERSO ESTATÍSTICO DE 2014 A 2016 – UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS.....	83
TABELA 4 – DURAÇÃO MÉDIA DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS NOS ANOS DE 2014 A 2016 .....	84
TABELA 5 – FREQUÊNCIA DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS NOS ANOS DE 2014 A 2016.....	84
TABELA 6 – TAXA DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS NOS ANOS DE 2014 A 2016.....	85

## LITAS DE QUADROS

QUADRO 1 – PALAVRA CHAVE CONFORME EIXO DE PESQUISA .....	31
QUADRO 2 – COMBINAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE PARA PESQUISA NA LITERATURA CIENTÍFICA .....	31
QUADRO 3 - ANÁLISE DOS ARTIGOS REFERENTES AO RBC .....	32
QUADRO 4 - EXEMPLO DA PLANILHA ENVIADA AO OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA.....	42
QUADRO 5 - FUNÇÕES DE PROTEÇÃO.....	53
QUADRO 6 – PESQUISA DE PESOS .....	66

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ANSI - *American National Standards Institute*  
CNOS – Centro Nacional de Operação do Sistema  
COL – Centro de Operação Local  
COS – Centro de Operação do Sistema Elétrico  
COSR – Centro de Operação do Sistema Regional  
IA – Inteligência Artificial  
MC – Manutenção Corretiva  
MF – Manutenção Forçada  
MFFP – manutenção Forçada por Falha na Partida  
MFO – Manutenção Forçada por outros  
MFP – Manutenção Forçada por Proteção  
MP – Manutenção Preventiva  
MPA - Manutenção Preventiva Aperiódica  
MPAD - Manutenção Preventiva Aperiódica por Defeito  
MPAIE - Manutenção Preventiva Aperiódica por Inspeção / Ensaio  
MPAO - Manutenção Preventiva Aperiódica por Outros  
MPO – Manuais de Procedimentos Operativos  
MPP – Manutenção Preventiva Periódica  
MPPG - Manutenção Preventiva Periódica Geral  
MR – Manutenção Rotineira  
MyCBR – Aplicativo de Raciocínio Baseado e Caso  
O&M – Operação e Manutenção  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico  
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento  
PDCF – Programa Diário de Carga e Frequência  
PDFc – Programa Diário de Defluências Consolidado  
PDP - Programa Diário de Produção  
PDT - Programa Diário de Transmissão  
PID – Controle Proporcional, Integral e Derivativo  
RBC – Raciocínio Baseados em Casos  
SDSC – Sistema Digital Supervisão e Controle

SIN – Sistema Interligado Nacional

SIPER – Sistema Informação de Perturbações

TA – Tomada D`água

TRIP – Desligamento automático de Unidade Geradora

UG – Unidade Geradora

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	CONTEXTO .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA .....	14
1.3	OBJETIVOS .....	15
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	16
2	RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS .....	18
2.1	RECUPERAÇÃO DE CASOS .....	19
2.2	REUTILIZAÇÃO DE CASOS .....	19
2.3	REVISÃO DA SOLUÇÃO .....	20
2.4	RETENÇÃO DA SOLUÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CASOS .....	20
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	21
3	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE USINAS DE ENERGIA ELÉTRICA .....	22
3.1	CONCEITOS .....	22
3.2	OPERAÇÃO DE USINAS DE ENERGIA ELÉTRICA .....	23
3.3	MANUTENÇÃO DE USINAS DE ENERGIA ELÉTRICA .....	25
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	29
4	REVISÃO DE LITERATURA .....	31
4.1	PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO .....	31
4.2	ANÁLISE DA LITERATURA .....	33
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	38
5	MATERIAIS E MÉTODO .....	40
5.1	MATERIAIS .....	40
5.1.1	MyCBR .....	40
5.2	MÉTODO .....	43
5.2.1	Delimitação de dados para estruturação do MyCBR .....	44
5.2.2	Estruturação do MyCBR .....	46
5.2.2.1	Seleção e tratamento de dados .....	46
5.2.2.2	Estruturação do sistema de recuperação de casos .....	55
6	TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
6.1	SELEÇÃO E TRATAMENTO PRELIMINAR DOS DADOS .....	57
6.2	REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO .....	59
6.3	BASE DE CASOS .....	64

6.4	ANÁLISE DA SIMILARIDADE ENTRE CASOS.....	65
6.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	72
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	74
	REFERÊNCIAS.....	78
	BIBLIOGRAFIA ADICIONAL CONSULTADA.....	80
	ANEXO 1 – INDICADORES DE MANUTENÇÃO.....	81
	ANEXO 2 – ESTATÍSTICAS DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS .....	83

# 1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo visa contextualizar o atual cenário da manutenção eletromecânica de equipamentos do setor de energia elétrica do Brasil, apresentar os estudos realizados para elaborar esta dissertação, e apresentar a necessidade técnica e acadêmica desse estudo. Posteriormente serão apresentados os objetivos e a estrutura da dissertação.

## 1.1 CONTEXTO

As empresas enfrentam desafios para atuar com o dinamismo que o mercado global requer diante da evolução tecnológica e da competitividade que há entre as organizações. Para esse enfrentamento, as empresas procuram manter o foco no ramo de atividade, realizar melhoria contínua nos processos, observar as inovações tecnológicas e investir no conhecimento dos profissionais. Exemplo desta melhoria contínua de processos e de tecnologia é a modernização, imposta pelas usinas hidrelétricas brasileiras, dos equipamentos eletromecânicos instalados nas décadas dos anos 70 e 80.

Porém, diante da escala crescente de equipamentos com tecnologias inovadoras, as empresas passaram a enfrentar dificuldades para encontrar empregados com o perfil adequado para atuar nesse cenário inovador, que agrega a necessidade de conhecimento específico dos processos de geração de energia com o conhecimento em informática e computação, que são a base da concepção dos novos equipamentos.

Desta forma, esse cenário tecnológico inovador, aliado à concorrência do mercado de trabalho e à regulação dos mercados de energia, ampliou a necessidade das empresas do setor elétrico capacitarem seus empregados para atender a demanda de acordo com os critérios de qualidade, confiabilidade e disponibilidade exigidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esta capacitação é necessária porque os conhecimentos adquiridos durante a vida profissional de uma pessoa é algo extremamente importante para a organização, pois são estas pessoas que elevam o nível de especialização de uma empresa.

Assim, torna-se necessário e vital para a continuidade operacional de uma concessionária do setor elétrico prezar por estes critérios (pelo conhecimento e a capacitação de seus empregados) em todas as suas ações, inclusive na construção e manutenção dos equipamentos da usina de geração de energia elétrica. (SANTOS, 2012).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Quando ocorre um defeito em equipamento eletromecânico de uma usina de geração de energia vinculada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), isto é chamado de perturbação no setor elétrico. A análise do ocorrido fica a cargo de alguns empregados com experiência e conhecimento dos equipamentos, dos processos e da instalação, os quais são denominados engenheiros analistas, no setor elétrico.

A análise de perturbação deve ser executada com a maior brevidade possível no setor elétrico, pois o tempo de interrupção na geração de energia elétrica de uma instalação pode causar grande transtorno ao sistema interligado de geração e transmissão de energia elétrica e, devido a este aspecto, as análises são realizadas sem metodologia ou procedimento.

Uma ferramenta utilizada pelos engenheiros analistas para monitorar e interceder no funcionamento dos equipamentos eletromecânicos é o sistema de supervisão e controle instalados nas usinas de geração de energia. Estes sistemas são de vital importância para a operação da usina em tempo real, pois permitem ao operador da instalação alterar grandezas elétricas e monitorar grandezas mecânicas. Aspectos que o auxiliam na operação das Unidades Geradoras e também na identificação prévia de determinados defeitos (MANCINI, 2016).

O engenheiro analista utiliza o sistema de supervisão como base de informação nos casos de perturbação, porque estes dispõem de um historiador de eventos por meio do qual é possível retirar informações para iniciar a análise do ocorrido com os equipamentos eletromecânicos. Contudo, é necessário que o engenheiro analista formate, filtre e interprete as informações retiradas do sistema de supervisão, para a possível identificação do defeito.

A análise eficaz da perturbação, isto é, dos defeitos ocorridos em equipamentos eletromecânicos, permite corrigir o defeito da forma mais breve possível e evitar ocorrência similar. Além de servir como base de conhecimento para



treinar técnicos e analistas sobre a forma de intervir nas futuras manutenções no setor.

Por outro lado, a variedade de equipamentos que compõem uma usina hidrelétrica ou uma subestação, aliada às informações inter-relacionadas de vários sistemas de aquisição de dados, pode gerar a simultaneidade de incontáveis alarmes durante uma ocorrência, sendo que esse evento é conhecido entre os desenvolvedores de sistemas como avalanche de alarmes, o que submete os engenheiros analistas a informações incompletas e incompreensíveis. Além disso, nestes casos, pode ocorrer perda de eventos e falha na datação destes eventos, que dificultam a identificação da causa raiz do defeito (MANCINI, 2016).

Segundo Antunes (2011), grande parte do problema causado pela avalanche de alarmes é resolvida por meio de uma triagem eficaz dos alarmes e sinalizações de proteção, que desconsidera todas as informações que não colaboram para a compreensão dos eventos. Faz-se uma análise dos eventos classificando-os por meio de bases de relacionamento, facilitando a visualização, organização e filtragem dos alarmes que são realmente necessários para o diagnóstico da ocorrência.

Com isso, a análise e diagnóstico de perturbações em usinas de geração de energia, se mostra cada vez mais imprescindível ao Setor Elétrico Brasileiro, devido ao novo perfil generalista dos profissionais que integram o setor, em detrimento dos profissionais especialistas que estão cada vez mais raros.

Assim, a elaboração de um sistema inteligente que consiga armazenar o conhecimento dos especialistas existentes e recuperar as informações quando necessário, torna-se cada vez mais imprescindível para o desempenho competitivo das empresas que atuam no setor elétrico. Ademais, a elaboração de uma metodologia para análise de perturbação em equipamento eletromecânico irá facilitar a determinação da causa raiz do defeito e possibilitar a identificação eficaz dos motivos da perturbação.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver uma metodologia para adquirir e armazenar o conhecimento de especialistas em análise e diagnóstico de perturbação em equipamento eletromecânico de usina de geração de energia elétrica.

Para se obter de forma integral o resultado geral proposto, pretende-se obter de forma conjunta os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a técnica de inteligência artificial denominada Raciocínio Baseado em Casos;
- Avaliar técnicas para aquisição e reuso de conhecimento de especialista em diagnosticar perturbações;
- Desenvolver um banco de casos de diagnóstico de perturbações em usina hidrelétrica; e
- Testar a metodologia de análise e diagnóstico de perturbação em ocorrência de usina hidrelétrica.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, sendo o capítulo atual composto pela introdução, na qual se apresentam o contexto em que o trabalho foi produzido e a necessidade das empresas em investirem na retenção do conhecimento de seus empregados. Seguida da justificativa, na qual se demonstra a necessidade de se estudar uma metodologia de realização de análise e diagnóstico de perturbação em equipamento eletromecânico, e dos objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo versa sobre a procura da solução de problemas para reter o conhecimento por meio de casos anteriores e o uso da teoria de Raciocínio Baseado em Casos. Aponta-se, ainda, pesquisas baseadas nessa teoria em várias áreas de trabalho distintas. Indica-se como realizar os cálculos de similaridade entre casos e como se recuperar estes cálculos para o uso em novos casos.

No terceiro capítulo se abordam as atividades executadas pelas áreas de operação e de manutenção de uma usina de geração de energia e se apresentam os principais índices de controle utilizados pela ANEEL. Se demonstram os princípios da manutenção e da operação de usinas hidrelétricas e se descrevem os desafios referentes aos desempenhos auditados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e os tipos de manutenção utilizados nesse setor.

No quarto capítulo se analisam vários artigos de uso da metodologia de Raciocínio Baseado em Casos, em várias áreas de trabalho, demonstrando-se a aplicabilidade do método e o ganho com a sua utilização.

No quinto capítulo se apresentam os materiais e métodos; indica-se como o raciocínio baseado em casos é aplicado para a construção de uma ferramenta de armazenamento de casos e a posterior consulta; apresentam-se as vantagens e desvantagens e indica-se como a base de casos estruturados foi construída e como se adequou o MYCBR.

No sexto capítulo se apresentam os resultados da construção do sistema, desde a escolha dos documentos, o tratamento dos dados, a construção de um modelo de conhecimento, os ajustes do cálculo de similaridade, a alimentação da base de casos e os pesos para determinar a similaridade. Realiza-se uma análise dos resultados, com a visualização de toda a construção do sistema e o teste de similaridade.

Por fim, no sétimo capítulo se apresentam a conclusão e os trabalhos futuros, embasados nos resultados e em outras necessidades do setor, e a possibilidade de se aplicar os sistemas inteligentes para a solução de problemas que envolvam a retenção de conhecimento e, desta forma, promover-se a retenção da experiência acumulada por empresas a partir do capital humano envolvido, notadamente dos especialistas e consultores da área.

## 2 RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS

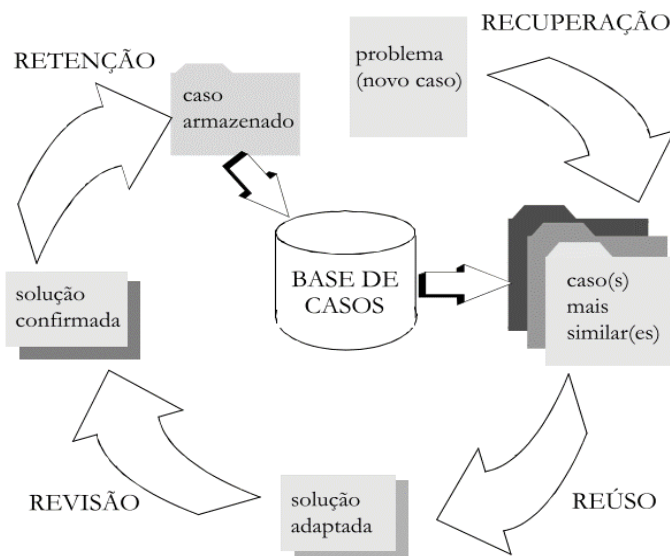
A utilização do conhecimento a partir de experiências adquiridas por pessoas ou por meio de acontecimentos é empregada por pesquisadores da Universidade de Yale, o grupo de Schank, desde os anos 80, onde as primeiras aplicações baseadas nesse modelo foram criadas. Até então, os conhecimentos adquiridos por distintos tipos de profissionais eram repassados dentro das próprias famílias ou para aprendizes, por meio de instruções ou da prática.

Outra forma de disseminação do conhecimento é por meio do armazenamento dessas experiências para posterior consulta destas informações, sendo que alguns estudiosos desenvolvem métodos para utilizar esses conhecimentos.

O método utilizado nesse trabalho é o Raciocínio Baseado em Casos (RBC), que teve origem nos trabalhos de Schank e Abelson (1977). O mesmo Schank (1993) conceitua RBC como método de soluções de problemas utilizando experiências passadas.

O método RBC evoluiu com o tempo chegando à determinação de elementos básicos para a sua construção, conforme o ciclo de RBC, demonstrado na figura 1.

FIGURA 1 - CICLO DO RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS



FONTE: Von Wangenheim (2003)

Como demonstrado no ciclo da figura 1, os elementos básicos do RBC são:

- Recuperação de casos similares a um problema atual;
- Reutilização desses casos para solução de um problema atual;
- Revisão do problema atual para o inserir na base de casos; e
- Retenção do conhecimento e armazenamento de casos passados, para que se possa montar um banco de casos.

Desta forma, demonstra-se a importância de se organizar adequadamente o conhecimento de forma a facilitar a implementação de casos em um banco de dados, o qual deve ser projetado em conjunto pelo engenheiro especialista na área de conhecimento e o especialista na criação de bases de conhecimento.

## 2.1 RECUPERAÇÃO DE CASOS

Para Martins (2003) a definição de recuperação de casos é um processo no qual uma experiência passada - “caso” - é recuperado da memória. Segundo Wangenheim (2003) o objetivo da recuperação de casos é encontrar uma experiência ou várias, na base de casos, que auxiliem a solucionar um problema atual.

Existem várias técnicas para realizar a recuperação de casos, tais como: Rede de Petri, Programação em blocos e Inteligência Artificial. A escolha do método que será utilizado para recuperação de casos deve levar em conta a representação do caso, a estrutura da base de casos e a similaridade do caso.

Quando ocorre a recuperação de alguns casos é realizada a seleção do caso mais consistente em relação ao problema atual; isto é, o caso que melhor satisfaça a consulta.

## 2.2 REUTILIZAÇÃO DE CASOS

Um caso é reutilizado quando sua característica se assemelhe com o problema atual e a solução adotada no caso antigo possa auxiliar na solução do novo caso, mesmo que haja a necessidade de se adaptar a solução.

Segundo Riesbeck (1989), o processo de recuperação de casos inicia com a descrição do problema atual e finaliza quando um melhor caso for encontrado em

uma base de casos, sendo que o sistema deve procurar o caso mais similar ao novo problema.

A recuperação de casos está fortemente ligada a indexação realizada na biblioteca de casos, pois assim, a recuperação do caso será mais precisa e eficiente. Os índices devem apontar quais características do caso devem ser comparadas, determinando assim o caso que pode ser útil para chegar a uma solução. Isto implica em inserir índices nos casos, no momento de sua inclusão na base de casos, para que mais tarde eles possam ser recuperados. Em suma, indexação é a definição de índices para os casos, para que seja possível a recuperação quando necessário.

### 2.3 REVISÃO DA SOLUÇÃO

A revisão da solução, também chamada de adaptação de casos, possibilita a identificação de soluções não corretas e permite o aprendizado e a correção do sistema. A interação entre o engenheiro de conhecimento da área e o usuário, consiste na alteração da solução encontrada de um caso semelhante, para promover a solução correta de um novo problema, a qual deverá ser inserida como novo caso pelo usuário.

Este passo é essencial para o aprendizado e para a consistência do banco de casos. Critérios para a revisão podem ser adotados para que a reutilização do caso fique mais compreensível para o usuário da solução adotada.

A verificação da solução é realizada durante sua aplicação na prática, embora possa ser substituída por uma simulação, conforme Wangenheim (2003).

A adaptação de casos pode ser em seus parâmetros, nos pesos de índices ou até na substituição de um caso; porém ela deve atender a solução encontrada para resolver o problema atual.

### 2.4 RETENÇÃO DA SOLUÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CASOS

Após a recuperação e a adaptação de um conhecimento, deve-se reter este caso e criar um banco de casos para consultas futuras; isto é, para quando ocorrer novos problemas.

A retenção de casos para Wangenheim (2003) é o momento no qual há o processo de incorporação do conhecimento útil de uma nova solução, que permita a atualização e a extensão da base de conhecimento.

A retenção de casos considera alguns aspectos como: seleção adequada da informação, seleção da estrutura que será utilizada para o armazenamento do conhecimento e a seleção da estrutura de índices para recuperação de casos.

Para Martins (2003) a retenção da solução é vista como memória de dados e é o processo que permite o armazenamento de uma solução nova e o recálculo dos índices de forma a possibilitar a utilização como um novo caso, demandando ajustes de estrutura, organização da memória e verificação da integridade do banco de casos.

Para o armazenamento desses casos pode-se utilizar várias ferramentas computacionais, por meio das quais se criará um banco de casos contendo toda a experiência adquirida em um determinado período.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O uso da metodologia de RBC e a sua aplicação em ambientes industriais são embasados por teorias cognitivas: no processo de lembrar, como fenômeno na resolução de problemas, uma vez que o processo de reutilizar casos passados corresponde a uma forma frequente e poderosa do raciocínio humano.

A utilização da metodologia RBC em ambientes industriais não requer modelagem científica do domínio do conhecimento, identifica características básicas para descrever o caso, gerencia grandes volumes de informação e não necessita que os usuários entendam a metodologia RBC.

A implementação da metodologia RBC em ambientes industriais, pode ser aplicada com a limitação de utilização das etapas de inserção de novos casos e da reutilização de casos. Sendo necessária a participação do analista de conhecimento do RBC somente para a implantação inicial. Depois o conhecimento armazenado se torna a matéria prima para a solução de novos problemas.

### 3 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE USINAS DE ENERGIA ELÉTRICA

#### 3.1 CONCEITOS

A operação de usina hidrelétrica consiste em supervisionar, controlar e executar a operação da instalação e isto é conhecido como Operação da instalação. Já a Operação do sistema é outro conceito, que consiste em normatizar, planejar e programar a distribuição da produção de energia elétrica de uma área. E ainda, o conceito de Rede Básica é utilizado para explicar como o sistema nacional é operado e consiste do conjunto de instalações operadas pelo ONS, que são as usinas de geração de energia elétrica, as subestações de transmissão, as linhas de transmissão e as subestações de distribuição.

A manutenção de usina hidrelétrica, além de utilizar os conceitos do procedimento de redes do ONS, também utiliza os conceitos das normas referentes a cada equipamento utilizado na instalação e as definições do manual do fabricante do equipamento.

As principais definições utilizadas na gestão da manutenção dos equipamentos instalados em uma usina hidrelétrica são:

- **Manutenção Forçada (MF)** – é o serviço que decorre de desligamento forçado, executado em equipamento para restabelecer a condição satisfatória de operação.
- **Manutenção Rotineira (MR)** – é o serviço cotidiano de inspeção, limpeza de filtro e outros, realizados sem a indisponibilização do equipamento, o qual pode ser executado com o apoio do operador, com periodicidade definida e de acordo com a necessidade da instalação.
- **Manutenção Preventiva (MP)** - é a atividade de manutenção para controle, conservação e restauração de um equipamento ou instalação, para prevenir possíveis anormalidades que possam acarretar a indisponibilidade do mesmo.
- **Manutenção Corretiva (MC)** - serviço, programado ou não, executado em equipamento ou linha de transmissão, para corrigir falha ou defeito e restabelecer a condição satisfatória de operação do mesmo.



- **Manutenção Preditiva** – é a atividade de inspeção, controle e ensaio realizada em um equipamento ou instalação, sem indisponibilidade operativa, para se estabelecer o período ideal de intervenção da manutenção.
- **Monitoramento** – é a obtenção de informação relativa a um equipamento ou instalação, sem indisponibilidade operativa, em um dado instante ou período, visando acompanhar o estado atual e a tendência de deterioração.

Essa dissertação tratará das manutenções forçadas e corretivas, os demais tipos de manutenção não serão abordados.

## 3.2 OPERAÇÃO DE USINAS DE ENERGIA ELÉTRICA

A operação de usina de geração de energia elétrica conectada à rede básica é estruturada em atividades de pré-operação, operação em tempo real e pós-operação, que visam garantir a otimização, a confiabilidade, a segurança e a integridade das instalações.

A operação de instalação conectada à rede básica é de inteira responsabilidade do agente que possui a concessão de operação e manutenção da instalação.

### 3.2.1 Pré-Operação

A pré-operação de uma usina hidrelétrica consiste em elaborar um programa diário de operação, no qual se consolidam as condições elétrica, energética e hidráulica e as ações a serem desenvolvidas em tempo real. É um processo básico composto pelas seguintes ações:

- Analisar em conjunto com o ONS a solicitação de intervenção em equipamento instalado na usina;
- Definir as ações que devem ser tomadas em tempo real por meio das diretrizes e condições operacionais do sistema; e
- Validar o processamento operacional do dia anterior.

### 3.2.2 Operação em Tempo Real

Compõem-se das atividades básicas de coordenação, supervisão, controle, comando e execução da operação instantânea da instalação, as quais são exercidas pelo agente em conformidade com a gestão de atividade técnica do ONS. Os conceitos dessas atividades básicas são:

- Coordenação da operação - consiste na organização e estabelecimento das ações de supervisão e controle da operação;
- Supervisão da operação - consiste na observação da condição atual do sistema e acompanhamento das ações de controle, comando e execução da operação;
- Controle da operação - são as ações efetuadas pelo agente de operação para monitorar grandeza ou estado de equipamento e linha de transmissão e para adotar medida para obtenção do valor ou estado desejado.
- Comando da operação - Consiste em ordens emanadas da equipe de operação do Agente, para o acionamento local, remoto ou por telecomando, dos equipamentos de manobra ou dos dispositivos de controle;
- Execução da operação - é o acionamento local, remoto ou por telecomando, dos equipamentos de manobra ou dos dispositivos de controle.

### 3.2.3 Pós-Operação

É o tratamento de dados, análise, avaliação, estatística e registro dos resultados da operação, para retroalimentar os processos operativos e divulgar a operação realizada pelo agente. As atividades da pós-operação se estruturam em torno de três núcleos básicos:

- Atividades de acompanhamento da operação do sistema e dos processos operativos, desenvolvidas no curto prazo, para divulgar o resultado da operação e efetuar a triagem do que deve ser objeto de análise;

- Atividades de análise da operação, que consiste na avaliação aprofundada das informações sobre ocorrências e não conformidades detectadas na fase de acompanhamento e que resulta em relatórios técnicos pertinentes. Faz parte também deste conjunto de atividades, a gestão das recomendações geradas nestes relatórios; e
- Atividades de tratamento estatístico do resultado da operação do sistema e dos processos operativos e administração de bancos de dados para geração dos relatórios estatísticos demandados.

### 3.3 MANUTENÇÃO DE USINAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Manutenção é composta de toda atividade que se realiza por meio de processo direto ou indireto, em um equipamento ou instalação, com a finalidade de lhe assegurar condição de cumprir com segurança e eficiência a função para a qual foi fabricado ou construído, levando-se em consideração as condições operativa, econômica e ambiental.

A missão da manutenção é evitar que a instalação ou equipamento se torne ineficaz para o desempenho da função requerida, em outras palavras, é garantir a disponibilidade, a continuidade operacional e a atualização tecnológica dos equipamentos e instalações, para assegurar os programas de produção no nível requerido de qualidade, segurança e custo.

O papel da manutenção de uma usina de geração de energia elétrica é garantir que os ativos da empresa cumpram os compromissos de comercialização de energia e de segurança operacional estabelecidos nos contratos de concessão da usina e definidos pelos procedimentos de rede do ONS.

#### 3.3.1 Engenharia de Manutenção

As empresas do setor elétrico mantêm uma área de engenharia para o planejamento estratégico, que tem como função definir as diretrizes de manutenção, elaborar normas, desenvolver projetos em todas as áreas de atuação da manutenção da usina de geração de energia elétrica.

As áreas de atuação da manutenção em uma usina hidrelétrica abrangem as seguintes atividades: manutenção elétrica, mecânica e civil; conservação; segurança

estrutural da barragem; modernização; desenvolvimento de projetos e materiais para a melhoria de desempenho e produtividade da instalação; comissionamento e recepção de equipamento e sistema eletromecânico e digital; ensaio operacional; medição, proteção; comando, controle e automação; e segurança patrimonial dos equipamentos e instalações do sistema de potência da geração, órgãos de descarga, equipamentos, sistemas auxiliares e eclusas em operação.

A engenharia de manutenção também atua no controle estatístico de desempenho dos equipamentos locados na instalação e que se baseia nos índices de produtividade do ONS descritos na seção 3.3.4.

Outra atividade realizada pela engenharia de manutenção é a análise de falha que ocorre com o equipamento instalado na usina de geração de energia elétrica, que é o ponto crucial para o desenvolvimento da pesquisa desta dissertação.

A manutenção local realiza a gestão dos recursos humanos, administrativos, bens móveis e imóveis, econômico-financeiros, segurança patrimonial e informática no âmbito da unidade de produção; e elabora o planejamento de curto prazo das manutenções preventivas dos equipamentos instalados na usina.

A manutenção de unidade geradora compreende a manutenção rotineira, a manutenção preventiva e a manutenção corretiva. Estas atividades baseiam-se em instruções de manutenção, que norteiam a equipe de manutenção local sobre como e quais equipamentos devem ser mantidos e quais as verificações e ensaios devem ser realizados, bem como na experiência da equipe para verificar o perfeito funcionamento do equipamento. Essas manutenções são descritas seção 3.1 desse capítulo.

A engenharia de manutenção é responsável pela gestão dos indicadores de manutenção, a qual é divulgada para as equipes de manutenção local, para auxiliar a tomada de decisão quanto ao planejamento da manutenção, sempre comprometida com a produtividade, confiabilidade e economicidade (ANEXO 1).

### 3.3.2 Controle dos Desligamentos Forçados

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) publica anualmente o relatório estatístico de desligamentos forçados e de desempenho das proteções das funções de transmissão e geração do sistema elétrico brasileiro, utilizando a base de

dados de perturbações obtida a partir do Sistema Integrado de Perturbações (SIPER).

Os principais objetivos do relatório são registrar os desligamentos forçados dos transformadores, barramentos, componentes de compensação reativa e unidades geradoras do sistema elétrico brasileiro; diagnosticar os problemas encontrados; e propor medidas corretivas necessárias a fim de melhorar seu desempenho. O relatório também subsidia as áreas de manutenção, operação, engenharia e planejamento das empresas.

O desligamento forçado se caracteriza pelo ato de retirada de serviço de um componente, em condição não programada, resultante de falha ou de desligamento de emergência. O desligamento forçado impõe que o equipamento seja desligado de forma automática ou manual, para evitar risco à integridade física de pessoa ou do meio ambiente, dano ao equipamento ou outras consequências ao sistema elétrico.

O relatório emitido pelo ONS segue a seguinte metodologia de classificação estatística do desligamento forçado:

a) O desligamento pode ser classificado em três tipos:

- **Automático** - ocorre quando a abertura do disjuntor é comandada automaticamente por atuação (correta ou não) de proteção/SEP (Sistema Especial de Proteção) ou por acidentalidade provocada por falha humana ou anormalidade em fiação ou sistema de comando e controle.
- **Manual** - caracteriza-se pela abertura do disjuntor a partir de comando não programado do operador. Enquadram-se nestes casos manobras de emergência (abertura desejável), acidental ou incorreta.
- **Fictício** - é o desligamento cadastrado para viabilizar o registro de atuação acidental ou a recusa de atuação de proteção de equipamento que não tenha sofrido desligamento forçado, mas, que este tipo de ação tenha provocado o desligamento forçado de outros componentes.

b) A causa de desligamento forçado de componente pode ter quatro origens diferentes, quais sejam:

- **Interna** - quando a causa se relaciona com as partes principais do componente em análise, em geral energizadas, incluindo seus

equipamentos terminais (Ex.: isolador, o lado primário de transformador de instrumento, estator, mancal, eixo de um gerador, disjuntor, seccionador e outros).

- **Secundária** - quando a causa se relaciona com os equipamentos secundários, complementares ou auxiliares do componente em análise (Ex.: fiação, proteção, controle, comando, serviço auxiliar, sistema de ventilação e resfriamento e outros). Enquadra-se também neste tipo de classificação o desligamento do componente em análise, por atuação incorreta de seu sistema de proteção quando submetido a falha externa, dado que a anormalidade, neste caso, encontra-se na parte secundária do componente em análise.
- **Externa** - quando ocorre: (i) Atuação correta da proteção do componente em análise provocada por falha externa (atuação como proteção de retaguarda) ou por sobrecarga causada por desligamento de outro componente específico; (ii) Desligamento do componente em análise por atuação direta da proteção de outro componente; (iii) Desligamento por configuração; (iv) Desligamento por atuação de SEP, quando o insumo para esta atuação tenha sido o status operativo de um ou mais componentes específicos.
- **Operacional** - quando a causa se relaciona com naturezas elétricas sistêmicas (oscilação, sobretensão, sobrefrequência e outros).

c) A localização tem a finalidade de identificar o local da causa do desligamento. Em caso de desligamento com origem interna ou secundária, a localização representa a parte específica de um componente desligado. Se o desligamento for de origem externa, a localização deve referenciar o tipo de componente externo. Por fim, a localização a ser classificada para um desligamento com origem operacional deve indicar qual o sistema de potência está associado à causa.

d) A causa do desligamento a ser classificada deve estar diretamente relacionada à localização e à ação tomada para a correção da anormalidade.

- e) A natureza da causa do desligamento forçado está diretamente relacionada com o restabelecimento do componente e pode ser de dois tipos: permanente e fugitiva. A natureza da causa permanente é caracterizada pela necessidade de intervenção da manutenção (correção, reparo ou substituição) para o restabelecimento do componente. A natureza da causa fugitiva é caracterizada pelo restabelecimento automático ou imediatamente após a realização de manobra, sem correção, reparo ou substituição por parte da manutenção.
- f) A natureza elétrica a ser classificada, seja para desligamento forçado ou tentativa de restabelecimento, está sempre relacionada com a proteção atuada.
- g) O restabelecimento do componente pode ser classificado em quatro tipos, a saber:
- **Automático** - quando o esquema de religamento automático de linha de transmissão atua de forma satisfatória.
  - **Manual** - quando o componente é restabelecido por comando manual.
  - **Indisponível** - quando o componente foi entregue à equipe de manutenção.
  - **Conveniência operativa** - quando o componente sofre desligamento forçado e, após a sua liberação para o retorno à operação, permaneça desligado por conveniência operativa.

Esta metodologia também é utilizada nas experiências de localização de falta nas perturbações e na confecção do sistema inteligente. Estatísticas de desligamentos forçados são apresentadas no Anexo 2.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O conhecimento sobre os métodos de operação e manutenção dos equipamentos da rede básica do Sistema Elétrico Brasileiro permite a compreensão do elevado e complexo tema da gestão dos ativos deste setor. No entanto, os

especialistas controlam os processos com critério e eficiência conforme evidenciado pelas baixas taxas apresentadas nas tabelas 3 a 5.

Na operação do sistema elétrico e na operação local de uma usina hidrelétrica existe controle sobre os processos de operação e de liberação de cada equipamento para manutenção. Porém, a análise do resultado insatisfatório das variáveis que compõem os indicadores de falha, tais como o tempo em que o equipamento fica desligado e a quantidade de desligamentos forçados do setor, demonstra a dificuldade de se identificar a causa do desligamento.

A manutenção dos equipamentos de uma usina de geração de energia contempla diversos fatores, desde o tipo de manutenção até a manutenção específica do equipamento avariado. Este aspecto fez surgir diversas metodologias de controle, procedimentos de manutenção e relatórios estatísticos, para mitigar as ocorrências indesejáveis no setor.

A metodologia utilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico para registrar as ocorrências, os indicadores e as causas dos desligamentos será amplamente utilizada no método de Raciocínio Baseado em Casos, para configurar o banco de casos e experiências do sistema inteligente que será desenvolvido nesta dissertação. Sistema este cuja finalidade é auxiliar os especialistas e os técnicos de manutenção a encontrar a falha de um equipamento da forma mais breve possível e com a eficácia requerida pelo setor.

Desta forma, com este recurso se pretende obter uma metodologia de análise de perturbação de equipamento, que auxilie a equipe de manutenção a diminuir o tempo e a frequência de desligamento forçado.



## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Este capítulo apresenta o estado da arte das publicações relevantes de artigos científicos sobre o tema de Raciocínio Baseado em Casos - RBC. O processo de seleção de artigos para formar o portfólio bibliográfico se baseia em Ensslin et al. (2010).

A primeira etapa deste processo consistiu em definir os eixos de pesquisa e as palavras chave que compõem a base bruta de dados. Escolheram-se dois eixos de pesquisa: casos de defeitos e RBC. O primeiro eixo se relaciona com a problemática e o segundo eixo com a abordagem para solução do problema. A pesquisa na literatura científica foi realizada por meio da combinação de palavras-chave estabelecidas para cada eixo. O quadro 1 mostra as palavras-chave da primeira fase da construção do portfólio bibliográfico, e o quadro 2 apresenta a combinação das palavras-chave.

QUADRO 1 – PALAVRA CHAVE CONFORME EIXO DE PESQUISA

Palavra chave	Eixo 1 – Casos de defeitos	Palavra chave	Eixo 2 – Raciocínio Baseado em Casos
a	Ocorrências no Sistema de potência	x	Reuso do Conhecimento
b	Ocorrência Industrial	y	Inteligência Artificial

FONTE: O Autor (2018)

QUADRO 2 – COMBINAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE PARA PESQUISA NA LITERATURA CIENTÍFICA

Pesquisa	Combinação de palavras chaves
1	a + x
2	a + y
3	b + x
4	b + y

FONTE: O Autor (2018)

A segunda etapa do processo definiu o banco bruto de artigos. A pesquisa dos artigos científicos foi feita pelo Google Acadêmico, uma ferramenta que recupera e analisa citações acadêmicas.

O resultado das quatro pesquisas foram 2.438 arquivos obtidos a partir de livros, teses e artigos de eventos e revistas publicados no período de 2000 a 2018. A terceira etapa do processo testou a aderência das palavras-chave a determinado artigo resultante da pesquisa. A quarta etapa do processo consistiu na retirada dos artigos redundantes; ou seja, se excluir do banco bruto de artigos os artigos repetidos. O que resultou em 980 arquivos. A quinta etapa consistiu em se excluir os artigos cujo título não contém a combinação das palavras chaves. Nesta etapa foram excluídos 92 documentos sendo duas teses, 28 artigos de revistas e 62 artigos de eventos. A sexta etapa do processo se resumiu na leitura do resumo do artigo e seleção dos que estão alinhados com o tema de pesquisa da dissertação (pré-leitura). Esta etapa resultou em oito artigos que falam sobre a utilização do método do raciocínio baseado em casos. O Quadro 3 mostra a relação dos periódicos com a combinação das palavras-chave dos artigos encontrados pelo método de pesquisa baseado em Ensslin et al. (2010).

QUADRO 3 - ANÁLISE DOS ARTIGOS REFERENTES AO RBC

<b>Título</b>	<b>ano</b>	<b>a+x</b>	<b>a+y</b>	<b>b+x</b>	<b>b+y</b>
Inteligência artificial: Uma aplicação em uma indústria de processo contínuo	2002				✓
Sistema de raciocínio baseado em casos com Rede Petri para diagnóstico de falha do motor de indução	2004			✓	
Proposta de um modelo RBC para Construção de um Sistema de apoio ao Diagnóstico Médico	2005			✓	
Uma abordagem de raciocínio baseada em casos para diagnóstico de falhas de transformadores de potência usando dados de análise de gases dissolvidos	2009	✓			
Uma Visão geral de metodologias para desenvolvimento de sistema baseados em conhecimento	2009			✓	
Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão com técnica de raciocínio baseado em casos	2014			✓	
Um modelo de diagnóstico de Falha Inteligente para equipamentos de Potência Baseado em RBC	2014		✓		
Case-Based Reasoning for the Design of Start-Stop Logic of Hydroelectric Power Stations	2018		✓		

FONTE: Autor (2018)

A partir dos artigos selecionados da Tabela 8, analisou-se de forma detalhada a parte introdutória e a conclusão dos trabalhos para se identificar os que possuem fatos e resultados aplicáveis ao tema pesquisado. Selecionaram-se oito artigos com estudo de aplicação para uma análise crítica.

#### 4.2 ANÁLISE DA LITERATURA

Sellitto (2002) descreve uma aplicação de sistemas especialistas, da metodologia do CBR - "Raciocínio baseado em casos" e da lógica de controle *Fuzzy* e de uso na indústria de processo contínuo. Estas técnicas são discutidas no âmbito do campo de conhecimento da Inteligência Artificial, associadas ao processo de controle de produção contínua das empresas.

Nesse artigo, a relevância para o trabalho foi a estruturação de um banco de dados a partir dos conhecimentos, regras e padrões que foram definidos, bem como, a conclusão do autor, que é favorável à criação de metodologias para auxiliar a tomada de decisão para minimizar os efeitos da ocorrência de problema em uma produção de ciclo contínuo.

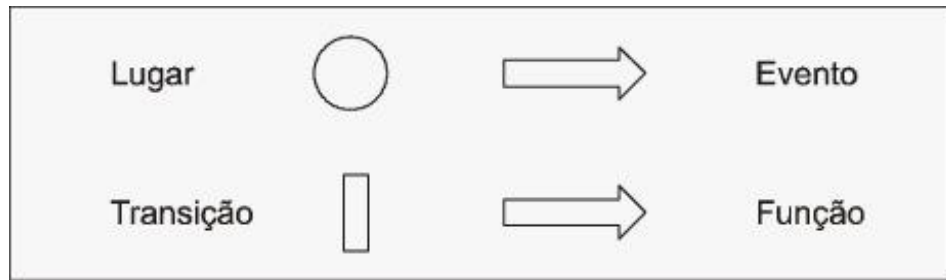
Bo-Suk Yanga (2004) descreve a dificuldade de se detectar falha em motor de indução. Os fatos apresentados na referência que contribuíram para o desenvolvimento do presente trabalho de dissertação foram as dificuldades na adição, exclusão ou atualização de casos.

A detecção antecipada de falha permite que a manutenção se programe para realizar a manutenção preventiva e impeça um período prolongado de inatividade do equipamento causado por falha inesperada.

Detectou-se nesse artigo que somente a utilização do método RBC não é o suficiente para se adicionar, excluir ou alterar casos e, desta forma, o método só é utilizado para se recuperar casos. Tanto é que para sanar esta deficiência o autor utilizou outra ferramenta que é a rede de Petri.

A rede de Petri (Figura 2) é uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática para expressar o sistema de eventos discretos segundo Peterson (1981). A Rede de Petri clássica permite a modelagem de estado, evento, condição, sincronização, paralelismo, escolha e iteração (Quaglioni et al., 2000).

FIGURA 2 – ELEMENTOS BÁSICOS DA REDE DE PETRI

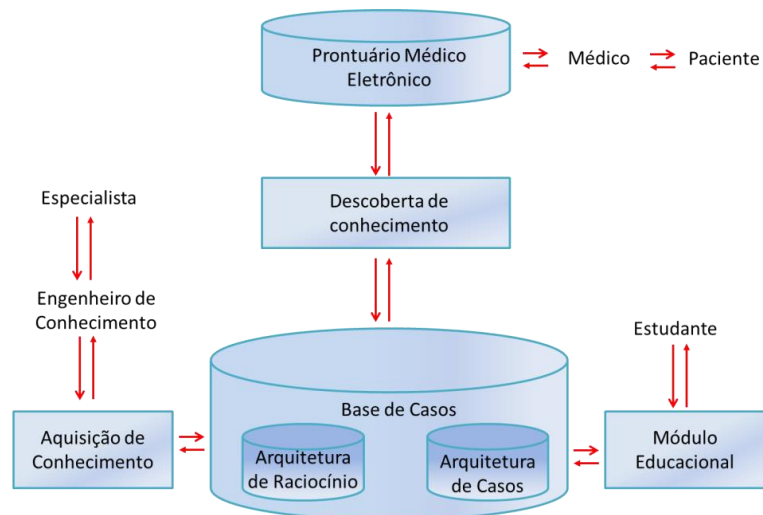


FONTE: Moraes (2010).

Os resultados nos testes realizados com a junção do RBC e as redes Petri foram considerados satisfatórios onde foi possível recuperar casos da base de casos e também adicionar novos casos, alterar casos existentes e excluir casos repetidos. O sistema foi utilizado com sucesso em diagnóstico de falha de motor elétrico.

Carvalho (2005) propõe um sistema baseado em conhecimento, que simula um consultório virtual via Web. O modelo de RBC utilizado para a elaboração deste projeto contemplou as etapas básicas da conceituação teórica do RBC, conforme figura 3.

FIGURA 3 - VISÃO GERAL DO MODELO RBC

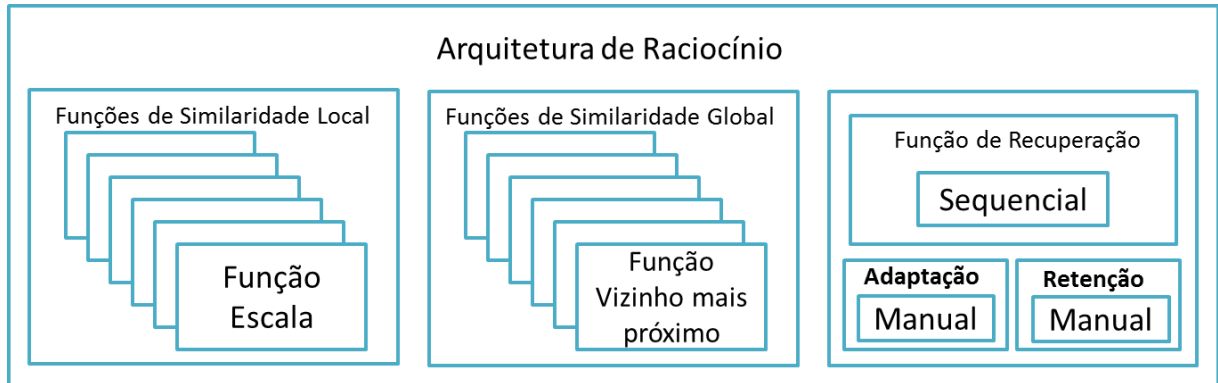


FONTE: Adaptado CARVALHO (2005)

No projeto se determinaram funções de similaridade para ser possível recuperar casos semelhantes ao caso sob análise no qual o especialista médico realize o diagnóstico de um paciente.

No projeto há medidas de similaridade sequencial que recuperam vários casos semelhantes ordenados por graus de atributos pelo especialista e que trazem inúmeros casos similares (Figura 4).

FIGURA 4 - ARQUITETURA DO COMPONENTE DE RACIOCÍNIO

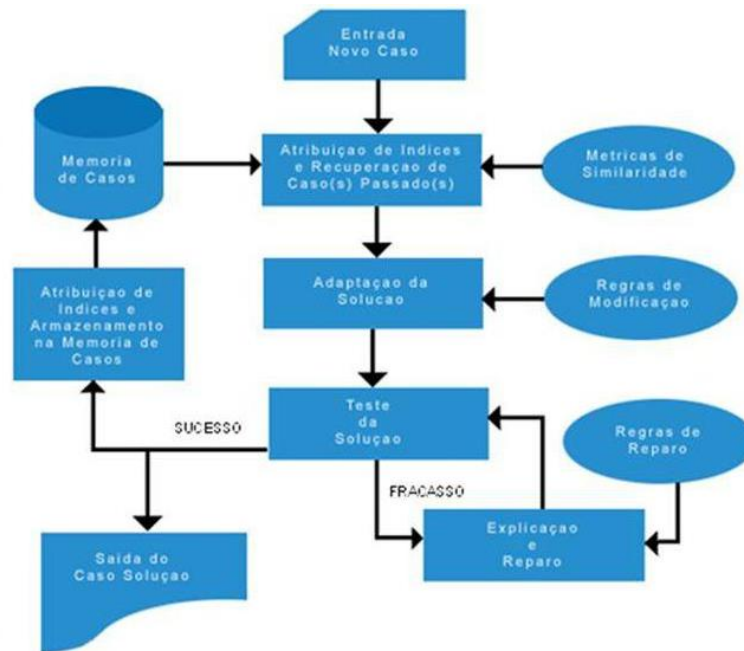


FONTE: Adaptado CARVALHO (2005)

Qian (2009) se refere a diagnósticos de falha em transformadores de potência, nesse artigo foi utilizado um caso sintético no banco de dados do sistema para ser a referência na comparação com novos casos, com características construtivas, análise de gás e análise de óleo do transformador. O sistema foi baseado em inteligência artificial que utiliza diferentes técnicas para recuperar os dados dos casos nos quais o sintoma de cada caso é semelhante ao do transformador avariado. A conclusão do diagnóstico da falha do transformador se dá por meio da semelhança com os casos recuperados do sistema e os resultados demonstram que o método é confiável e prático para se diagnosticar falha do transformador.

Esse artigo demonstra uma estrutura interessante para se recuperar casos, a qual está simplificada no diagrama da Figura 5.

FIGURA 5 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE RECUPERAÇÃO DE CASOS



FONTE: Adaptado de Qian (2009)

Pacheco (2009) compara várias metodologias utilizadas para o desenvolvimento de sistemas com a utilização do RBC – Raciocínio Baseado em casos; isto é, sistemas baseados em conhecimentos específicos de engenheiros especialistas.

O objetivo desse artigo foi apresentar uma visão geral das principais metodologias para o desenvolvimento de sistemas, que se baseiam em conhecimento existente na literatura.

Os principais requisitos para o desenvolvimento deste tipo de sistemas são: facilidade de compreensão; visibilidade; facilidade de suporte; aceitabilidade; confiabilidade; robustez; facilidade de manutenção e rapidez. Para Knublauch (2002), além destes requisitos é necessário incluir a flexibilidade decorrente desses sistemas serem, de forma geral, tecnologias experimentais.

Urnau (2014) descreve o desenvolvimento de um sistema para apoio à tomada de decisão, que contempla temas que abordam o conhecimento, as estratégias utilizadas nas empresas e o uso da técnica de raciocínio baseado em casos.

As etapas que envolvem o ciclo do sistema de raciocínio baseado em casos compreendem o processo de recuperação, que consiste em realizar uma busca na

memória de casos; a reutilização, que é caracterizada pela adaptação da solução armazenada em um caso recuperado; a revisão, que surge como uma oportunidade para aprender a partir da falha e; a retenção, que visa selecionar qual informação é relevante (Figura 6).

FIGURA 6 - CICLO DO RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS



FONTE: Adaptado de Wangenheim e Wangenheim (2003).

O sistema efetua uma busca na base de casos, a partir de um novo problema, e recupera um conjunto de casos similares que possam atender à solução do problema em questão. Os casos recuperados são avaliados para posterior utilização e/ou armazenamento na base de dados.

Valor da similaridade - a definição do valor de similaridade tem um papel importante nos sistemas de RBC, pois a similaridade é o raciocínio que dá suporte ao sistema. A similaridade pode ser definida também como utilidade; sendo que o caso recuperado que apresentar maior similaridade, provavelmente será útil para solucionar um problema atual.

Indexação - Para que seja possível encontrar caso similar na base de casos para um problema qualquer, é preciso definir quais atributos são necessários para realizar a comparação entre um caso armazenado e a situação do problema atual (caso atual).

Recuperação de casos - O processo de recuperação dos casos utiliza a métrica do vizinho mais próximo na qual, para cada atributo é possível se obter um resultado de medida da distância entre o novo problema e os casos já registrados; o que possibilita, ainda, que cada atributo possua um peso diferenciado, o que determina a importância do atributo para o resultado.

Gang Ma (2014) apresenta um estudo de manutenção de equipamentos utilizados na rede distribuição de energia elétrica. Esse artigo propõe um novo modelo de diagnóstico de falha, que pode ser utilizado por empregado menos especializado, porém com conhecimento geral do equipamento utilizado da distribuição de energia elétrica. Utilizaram-se alguns métodos para se diagnosticar o estado dos equipamentos dos sistemas de distribuição de energia elétrica: (i) RBC – Raciocínio Baseados em casos; e (ii) SVM – Análise de Regressão. Contudo o método RBC foi o que proporcionou o melhor resultado em termos de precisão, facilidade de uso e entendimento do funcionamento do sistema. Além de ser aplicável a qualquer modelo de equipamento utilizado em rede de distribuição de energia elétrica, desde que se defina os requisitos e os atributos para análise.

MANCINI (2018) utiliza a modelagem RBC para identificar os projetos start-stop de centrais elétricas com turbinas Francis com lógicas de partidas e paradas das unidades geradoras, criando um banco de casos dos projetos utilizados os documentos dos fabricantes. O artigo demonstra a utilização do MyCBR para a criação do banco de casos e os cálculos de similaridades.

#### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A pesquisa realizada sobre o RBC – Raciocínio Baseado em Casos, aliada à leitura e a análise dos artigos, conceitos e princípios para se elaborar sistema baseado em conhecimento, evidenciou que é necessário o estudo mais aprofundado em métodos para a recuperação do conhecimento e também o estudo sobre qual a melhor ferramenta a ser utilizada para a elaboração de um sistema inteligente que utilize o conhecimento no tema sugerido.

A pesquisa para comprovar a eficácia do modelo RBC para auxiliar na determinação da causa de perturbação em usinas de geração de energia, se iniciou com o levantamento de casos (perturbações) em usinas hidrelétricas, que são ocorrências ocasionadas pelo longo tempo em operação destas instalações.

Também se verificou a necessidade da utilização de aplicativos existentes para possibilitar a identificação de similaridade entre os casos. E ainda, a análise dos artigos descritos nesse capítulo evidenciou a necessidade de se analisar com cuidado o desenvolvimento de outros tópicos, tais como o peso de atributos e a



indexação de campos, para possibilitar a execução adequada do projeto desta dissertação, cujo o objetivo principal é a elaboração de um método para análise de perturbações em usinas de geração de energia.

## 5 MATERIAIS E MÉTODO

Na pesquisa os materiais e métodos para a aplicação do conhecimento relativo às perturbações ocorridas em Usinas Hidrelétricas empregam o método do Raciocínio Baseado em Casos, para o qual se utilizou o aplicativo MyCBR possibilitando a seleção de soluções com base na similaridade de casos, além de indexar e atribuir pesos aos atributos e filtros da pesquisa.

Para adequar este método como ferramenta a ser utilizada por empregados de manutenção de usina, usou-se um banco de dados existente do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, que contém as perturbações ocorridas em unidades geradoras de uma usina hidrelétrica do sudeste brasileiro. Estas informações estão em um banco de dados SQL de um sistema denominado Solicitação de Informações de Perturbação – SIPER, o qual contém as causas e informações complementares relacionadas à solução da falha.

### 5.1 MATERIAIS

#### 5.1.1 MyCBR

O material utilizado para realizar a apresentação do conhecimento baseado em casos foi o Shell<sup>1</sup> MyCBR, o qual é uma ferramenta que permite o trabalho com um elevado nível de complexidade, sendo que o projeto é organizado em níveis definidos em uma área de edição para a construção do sistema inteligente na qual se detalham os atributos, valores, pesos e as similaridades. O MyCBR contém outros ambientes tais como o gerenciamento de casos e a recuperação de casos.

Para se utilizar a metodologia do raciocínio baseado em casos, em conjunto com a ferramenta MyCBR, é necessário realizar um levantamento de necessidades que permita ao usuário do aplicativo inserir um novo caso sem perder os detalhes do conhecimento. E, também, definir pesos para partes do caso, o que possibilitará que se determine o nível de similaridade entre os casos anteriores e o caso sob análise.

---

<sup>1</sup> Interface utilizada para criação da base de casos onde se define o grau de similaridade entre eles.

### 5.1.2 Dados para os casos de perturbação

Para a construção do sistema utilizou-se uma ferramenta do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, conhecida como SIPER – Solicitação de Informações de Perturbação, que contém as informações relevantes que os agentes fornecem ao ONS, por meio de um formulário específico, sobre as ocorrências em suas instalações.

A informação de perturbação ocorrida em instalação de geração de energia elétrica é enviada ao ONS conforme determinado no submódulo 25 do procedimento de rede, onde o mesmo realiza uma avaliação sistêmica do ocorrido. Entretanto vale ressaltar a necessidade de complementar as informações da ocorrência na manutenção da usina.

As informações são compostas de dois grupos de dados: o primeiro grupo contém as informações técnicas da perturbação por meio das quais se demonstrou o que, onde e quando ocorreu a falha e o segundo grupo contém as informações sobre a causa da perturbação, que demonstram o porquê e como ocorreu a falha.

As informações técnicas são compostas dos seguintes atributos: equipamento principal e secundário, função de proteção, sinalizações e datas. Estas informações foram retiradas dos sistemas de supervisão e controle das usinas ou dos relés de proteção digital que fornecem a função de proteção que atuou, a data e hora do ocorrido e, também, a oscilografia da perturbação para o caso de defeito elétrico. Já no caso de defeito mecânico, as informações são retiradas do sistema de supervisão ou de sistemas locais com sensores e indicadores, tais como, os sensores de fluxo, nível e temperatura, e outras medidas mecânicas.

A planilha do sistema de informações de perturbações enviada ao ONS, na qual se inserem os dados da perturbação, contém alguns critérios para o cadastro da ocorrência que subsidiam o especialista na análise da possível causa da perturbação (Quadro 4).

A identificação do tipo da ocorrência é um dos critérios que demonstra a origem da falha, que pode ser: elétrica, mecânica ou hidráulica e norteia o analista sobre quais documentos devem ser estudados para se encontrar a causa raiz da perturbação, outra informação é em qual equipamento se originou a falha, isto é o local de origem da perturbação, que é onde inicia-se a procura da causa da falha.

Essa informação clara e assertiva irá auxiliar o especialista de manutenção na identificação da causa do defeito.

QUADRO 4 - EXEMPLO DA PLANILHA ENVIADA AO OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA.

**Solicitação de Informação de perturbações.**

Perturbação SIPER nº 2010/2014
--------------------------------

<b><u>Dados da Perturbação</u></b>					-	-
<b>Data e hora da ocorrência:</b>	04/03/2014 19:27					
<b>Equipamento de Origem:</b>	UG-01					
<b>Geração interrompida:</b>	97 MW					
<b>Informação AGENTE:</b>						
<b>Descrição da Perturbação</b>						
<b>Origem:</b>	Interna - Desligamento por atuação de proteção					
<b>Causa:</b>	Terra Rotor					
<b>Tipo Defeito</b>	Mecânico	( )	Elétrico	x		
<b>Tipo Desligamento</b>	Automático	x	Manual	( )		
<b>Fases Envolvidas:</b>	Trifásico					
<b>Localização da Falta:</b>	Painel de Controle do Regulador de Tensão					
<b>Funções de Proteção:</b>	64R (Tensão) Estado-1 e 64R (Corrente) Estado-2					
<b>Modelos dos Relés:</b>	ABB REG 670 - Num Série B-1052043 e B-1052045					
<b>Atuações:</b>	( )	Incorreta	( )	Correta	x	
<b>Causa:</b>	Acidentais Baixa Isolação no Transformador Auxiliar de Sincronismo de Disparo do RT					
<b>Informações sobre anormalidades observadas:</b>	Painel com Acúmulo de Poeira, Capacitor dos Snubbers com Vazamento.					
<b>Providências tomadas:</b>	Efetuado Limpeza, Substituído Trafo Auxiliar e Snubbers					
<b>Prazo para conclusão das providências:</b>	07/03/2014					
<b>Dados complementares para esclarecimento da perturbação:</b>						

FONTE: Adaptado ONS (2014)

Também se informam dados como: equipamento, data, horário e potência rejeitada, que servirão como dados estatísticos em relatórios gerenciais. As informações inseridas no banco de dados desenvolvido nesta pesquisa se referem a perturbações ocorridas em uma usina hidrelétrica do sudeste brasileiro, no período de 2014 a 2018, no qual se cadastraram mais de 20 casos.

Uma dificuldade encontrada com relação aos dados é a relativa falta de padrão da base documental, haja vista que foram formulados em épocas diversas e por equipes distintas; sem contar que foram elaborados com programas de informática com recursos diferentes. Assim, para a construção de cada um dos casos e de suas soluções, os dados e toda a documentação devem ser objeto de análise e estudo, conforme se demonstra no item 5.1.3, inclusive sobre como foi realizada a reestruturação da base de casos.

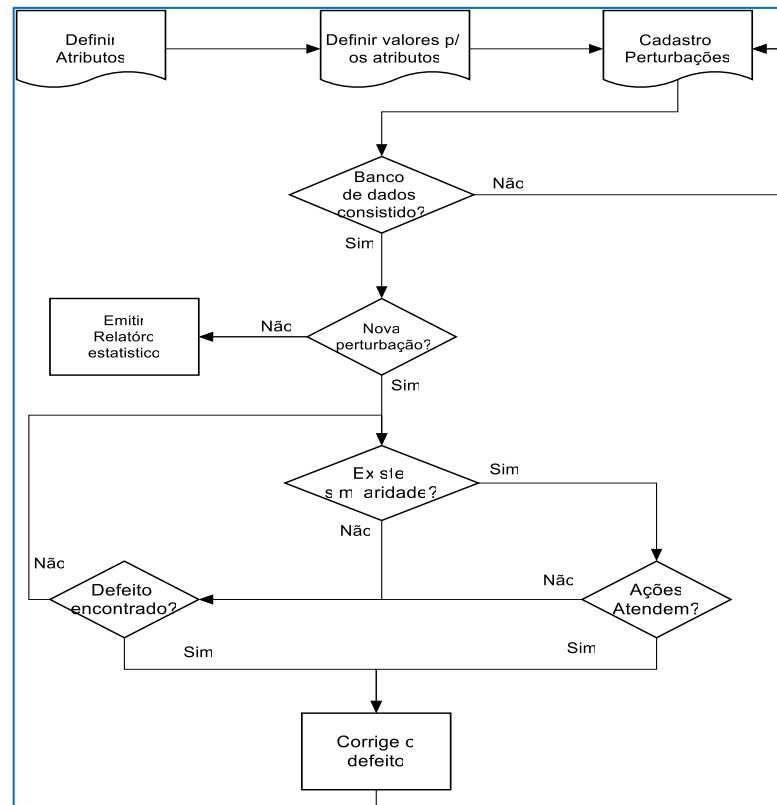
### 5.1.3 Documentação de fabricantes

Para a realização das etapas de elaboração do banco de casos do MyCBR foi necessário a consulta em manuais e catálogos dos fabricantes dos equipamentos instalados em usinas de geração de energia. Nesse caso foi consultado o manual do regulador de velocidade da turbina Kaplan e do regulador de tensão do gerador, bem como o manual e a ordem de ajuste das proteções elétricas do gerador e transformador elevador, outro documento consultado foi o manual de operação da usina.

## 5.2 MÉTODO

Para a criação de um banco de casos foi realizado um fluxograma (Figura 8) para entrada de informações de novos casos e arquivamento dessas informações.

FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA MONTAGEM DE UM BANCO DE CASOS



FONTE: O Autor (2019).

Depois de definidos os atributos que farão parte do banco de casos é necessário verificar se um novo caso não é idêntico a outro existente no banco de casos, com isso realiza-se uma rápida consulta no próprio banco e se verifica a similaridade com casos já cadastrados, caso já exista algum caso idêntico não é necessário o arquivamento deste caso. Se a perturbação não existe no banco de casos a mesma será cadastrada e utilizada para futuras pesquisas.

Nessa situação será analisado casos semelhantes que poderão auxiliar na manutenção do equipamento danificado.

### 5.2.1 Delimitação de dados para estruturação do MyCBR

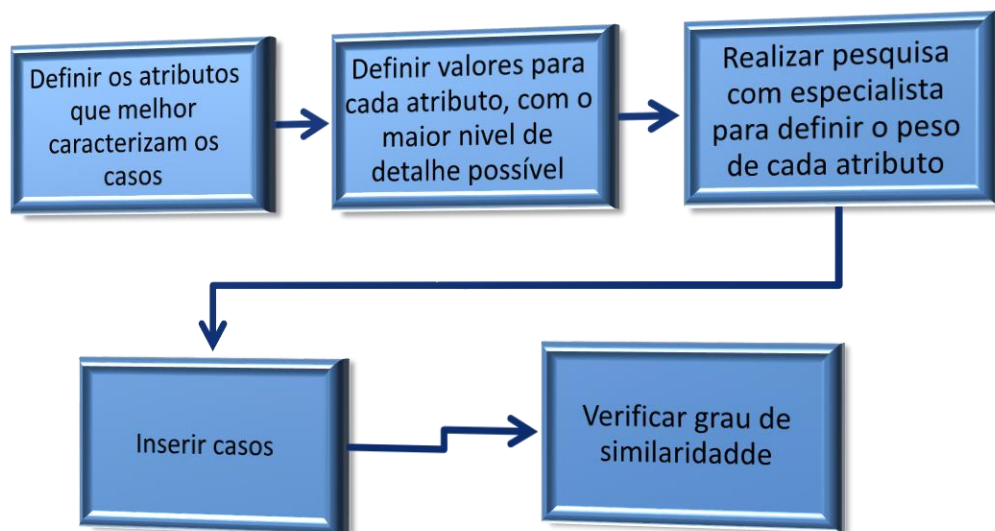
Para estruturar o MyCBR com as informações contidas na planilha enviada ao ONS foi necessário delimitar o tipo de informações que seria utilizada no sistema proposto, com base no tipo de turbina hidráulica e proteção.

A aplicação do MyCBR na metodologia RBC é possível devido ao aplicativo ser direcionado para a definição de atributos dos casos, tais como: onde, quando,

como e porque ocorreu o caso. E, ainda, para outra informação que seja relevante ao caso. É necessário detalhar ao máximo cada atributo, tipo de variável e atribuir valor, e até subvalores, que representem melhor o caso. Após se estruturar a base de casos, definem-se os pesos de cada atributo o que pode ser obtido por meio de pesquisa junto aos especialistas do assunto da base de casos. Assim se inicia a etapa de inserção dos casos, propriamente dita, os quais poderão ser obtidos a partir de um banco de dados ou do próprio conhecimento dos especialistas.

Após a criação de um modelo de conhecimento baseado nas informações retiradas do banco de dados do SIPER onde se determina atributos que irão representar um caso, se deve realizar a definição de pesos aos atributos através do conhecimento de especialistas e assim inserir casos para identificação da similaridade entre eles, esse fluxo é demonstrado na figura 7.

FIGURA 8 – FLUXO DA MONTAGEM DO MYCBR



FONTE: O Autor (2019).

Primeiramente foi necessário especificar o tipo de turbina com a qual se iria trabalhar e, no caso, foi escolhida a turbina Kaplan devido à complexidade no modo de controle que possibilita o estudo de um sistema de proteção mecânico mais completo, o qual enriqueceu o estudo.

Também foi necessário definir qual relé de proteção digital seria utilizado, pois, apesar das literaturas conterem vasta documentação sobre as proteções elétricas e a base ser definida na norma ANSI, cada fabricante detalha as funções de proteção conforme seus especialistas, desta forma foi necessário utilizar os manuais de fabricantes.

No caso da turbina Kaplan, que é um equipamento que permite o controle da angulação de suas pás, com isso aumentando a performance e o seu rendimento, para melhor entendimento do equipamento foi utilizado o manual do fabricante ALSTOM e no caso dos relés de proteção utilizou o manual do fabricante ABB. Necessitou-se, também, estudar a formatação dos alarmes e eventos do manual do sistema de supervisão e controle e adequá-la às limitações do MyCBR.

### 5.2.2 Estruturação do MyCBR

Para a estruturação do MyCBR, ou seja, a construção do RBC para gerar um método para diagnosticar as causas do desligamento automático de unidade geradora nas centrais hidrelétricas, realizaram-se de forma sistemática as seguintes atividades: seleção e tratamento de dados e a estruturação do sistema de recuperação de casos.

Com a recuperação dos casos e as similaridades encontradas entre eles é possível o especialista tomar uma decisão assertiva para o encontro da solução do problema.

#### 5.2.2.1 Seleção e tratamento de dados

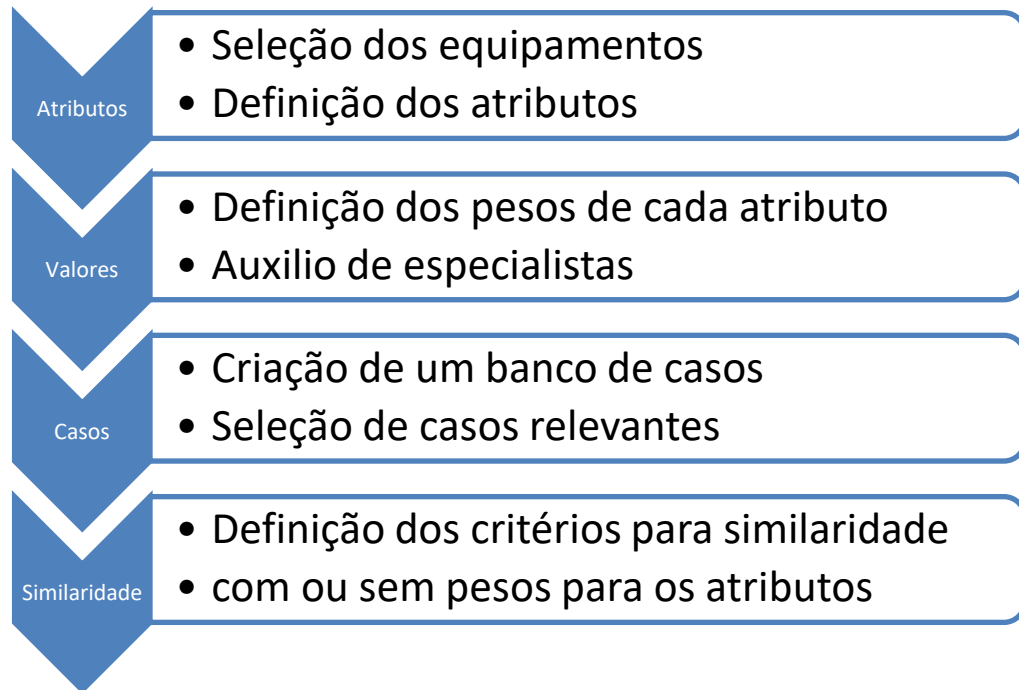
A seleção e tratamento de dados visa preparar a documentação a se utilizar no *Shell*, considerando-se eventuais inconsistências decorrentes das múltiplas formas de representação dos dados e a ausência de uma padronização ocorridas em especial no SIPER (e em outros documentos que possam ser consultados para a construção dos casos, conforme já pontuado, em decorrência da ausência de padronização e da mudança de softwares), é apresentada na figura 9, contendo os seguintes passos:

- Definição de atributos
- Definição de pesos aos atributos



- Cadastro de casos
- Consistir o banco de casos
- Verificar a similaridade de caso no banco de casos

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA MONTAGEM ESTRUTURAÇÃO MYCBR



FONTE: O Autor (2019)

Na definição dos atributos é necessário um conhecimento profundo dos equipamentos existentes na instalação, com isso pode-se identificar a melhor maneira de formatar o modelo para a criação de um banco de casos.

Para definição de pesos para os atributos, além de conhecer os equipamentos é necessário saber profundamente o funcionamento de cada um deles, isto permitirá ao especialista definir quais são os atributos que definirão a similaridade dos casos. Já para criação dos casos, como mencionado anteriormente se utilizou um banco de dados SIPER.

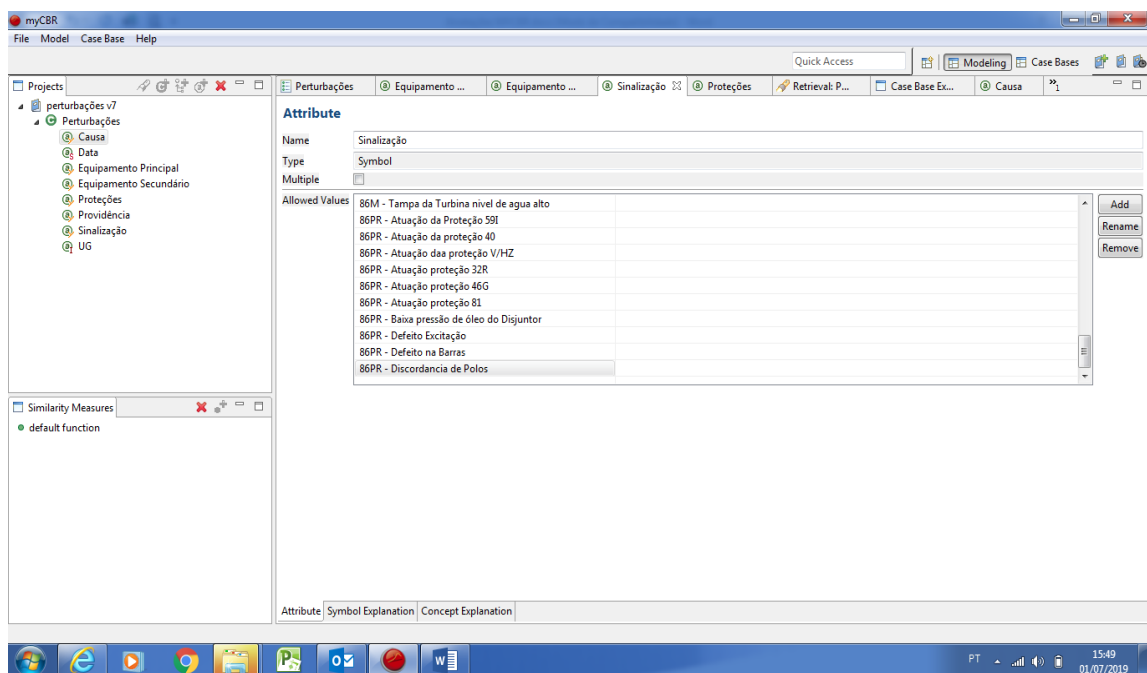
Nessa pesquisa foi utilizado dois métodos para o cálculo da similaridade, o primeiro foi a atribuição de pesos para os atributos conforme definido por especialista e o segundo foi deixando os pesos iguais para todos os atributos.

A estruturação do sistema para se recuperar casos similares é uma etapa importante, devido à necessidade de se organizar o conhecimento de forma que possa se aplicar a técnica selecionada. Desta forma, a adequação do conhecimento

às técnicas de computação utilizadas no MyCBR é o maior desafio do sistema proposto.

Com isso, a base de casos foi construída com base na planilha do SIPER, a qual dispõe de quatro atributos principais para o cadastro da perturbação que são: equipamento principal, equipamento secundário, proteção e sinalização que são apresentados na figura 10 junto com os demais atributos.

FIGURA 10 - SHELL COM OS ATRIBUTOS



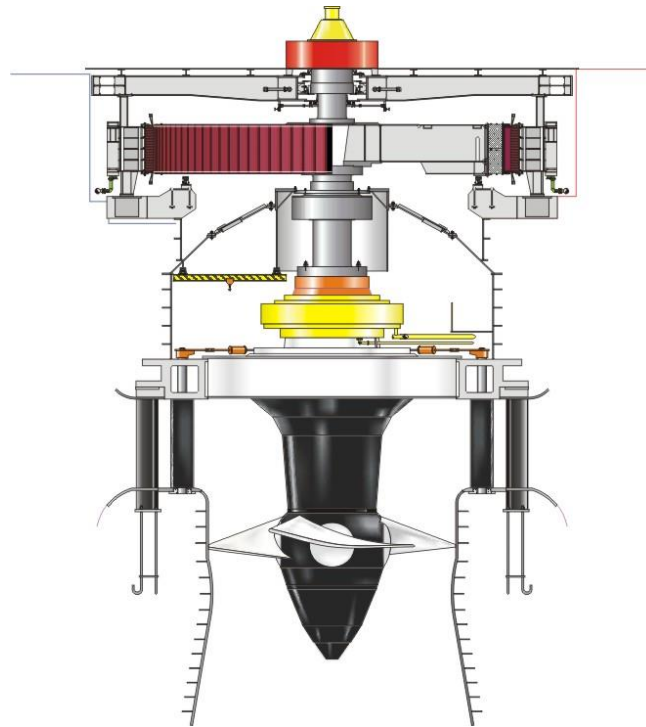
FONTE: O autor (2019)

Conforme descrito, a definição dos equipamentos principais, os quais determinam a essência da função geração de energia elétrica, quais sejam: turbina, gerador, transformador, regulador de tensão, regulador de velocidade, disjuntor, seccionadora, comporta, quadro de alimentação CA e quadro de alimentação CC.

A definição dos equipamentos secundários, os quais tem a função de verificar a estabilidade e realizar medições que identifiquem o funcionamento da unidade geradora, cujos valores são: sensor, indicador, medidor, válvula, registro, acumulador, tiristor, relé e contator.

O tipo de equipamento que compõem uma unidade geradora depende do projeto de cada usina. A figura 11 demonstra os equipamentos de uma unidade geradora com projeto de turbina do tipo Kaplan.

FIGURA 11 - CORTE TÍPICO DE UMA UNIDADE GERADORA COM TURBINA KAPLAN.



FONTE: Adaptada Manual de operação da Usina Porto Primavera (1998)

O projeto de uma unidade geradora com turbina Kaplan envolve vários equipamentos, pois a característica marcante dessa turbina é poder trabalhar com baixas quedas de água, isto é, essa turbina pode trabalhar com pequenos desníveis de água com relação ao nível de montante e o nível de jusante da usina. A unidade geradora com turbina Kaplan pode ser projetada de duas formas a primeira com pás da roda Kaplan fixa e a segunda com pás da roda Kaplan móveis, essa opção também necessitará de malhas de controle PID – Proporcional, Integral e Derivativo. Outro ponto a ressaltar é a necessidade de mancais para suportar toda a massa e manter a verticalidade do conjunto turbina, eixo e gerador.

Pode-se verificar na figura 11 que o projeto do conjunto turbina gerador é concebido na vertical, assim necessitando de mais esforços no projeto civil para a instalação desse equipamento.

Para a definição das proteções elétricas, hidráulicas e mecânicas da unidade geradora, presente no atributo Sinalização do MyCBR, consultaram-se especialistas no assunto, o código ANSI e os manuais dos fabricantes, pois as perturbações ocorridas em Unidades Geradoras de usinas hidrelétricas tem um amplo espectro de origem, tal como: as de origem elétrica, que podem ser ocasionadas por curto-circuito, sobrecarga, baixa isolação e outros; as de origem mecânica que podem ser

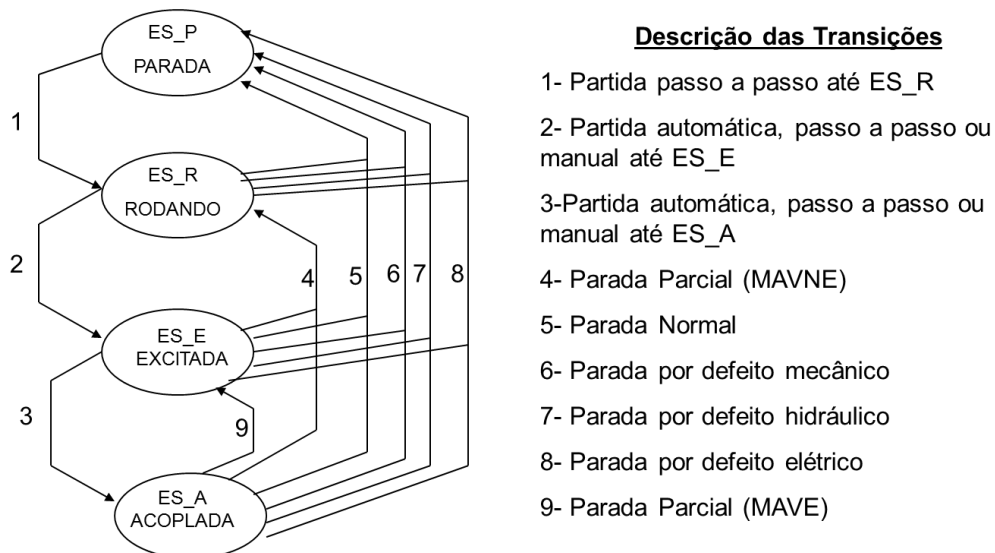
ocasionadas por falta de lubrificação, desgaste de peça e outros; e também as de origem hidráulica, que se iniciam em falha em vedação, desgaste de selo e outros.

Para compreender melhor os problemas e como foi realizada a seleção e tratamento das informações é importante conhecer melhor o funcionamento das máquinas rotativas no que se refere a proteções. As usinas hidrelétricas possuem máquinas rotativas para geração de energia, com programas de computação instalados em seus painéis de controle que dispõem de lógica de partida e lógica de parada da unidade geradora que podem auxiliar na descoberta da causa de uma perturbação.

Esse conhecimento é de grande importância para a elaboração do valores dos atributos Proteção e Sinalização, pois eles irão identificar quais são os principais tipos de desligamentos automáticos e sinalizações de defeitos, sendo que na montagem do modelo definiu-se em três principais tipos que são: defeito mecânico identificado por 86M, defeito elétrico com 86E e por fim o defeito hidráulico representado por 86H.

E estas lógicas se baseiam em diagramas de transição, conforme se demonstra na Figura 12.

FIGURA 12 - DIAGRAMA DE TRANSIÇÕES



FONTE: Adaptada Manual de operação da UHE Primavera (1998)

Este diagrama integra o conhecimento do profissional de manutenção e permite que se determine o tipo de defeito e as etapas de partida e parada da Unidade Geradora - UG.

A transição 1 representa a sequência na qual a UG sai da condição denominada de Estado Estável Parado (ES\_P) e vai para outra transição estável na qual todas as partes mecânicas já foram acionadas e testadas e que é denominada de Estado Estável Rodando (ES\_R).

A transição 2 representa a sequência na qual a UG sai da condição ES\_R para outra condição estável na qual se verificou a velocidade e todas as grandezas relacionadas ao regulador de tensão, até o acionamento do disjuntor de campo. Este Estado é conhecido como Estado Estável Excitado (ES\_E).

A transição 3 se refere ao sincronismo da UG, no qual se verifica a frequência e a tensão da UG e depois se aciona o disjuntor de grupo. Este Estado é conhecido como Estado Estável Acoplado (ES\_A).

A transição 4 se refere às condições requeridas para a UG sair do estado ES\_A e chegar ao estado ES\_R. De forma geral estas condições caracterizam defeitos elétricos na UG que não causam interferência na parte mecânica, tal como a falha no regulador de tensão.

A transição 5 é a parada normal da UG, na qual se verificam todas as sequências até se chegar ao estado ES\_P.

A transição 9, se refere ao desligamento do disjuntor de grupo desde ao Estado ES\_A até ao Estado ES\_E. Esta transição é causada por defeito em equipamento externo a UG, tais como a Linha de Transmissão ou problemas com a frequência do Sistema Interligado Nacional - SIN.

As transições 6, 7 e 8, referem-se aos defeitos (TRIP) que desligam a UG automaticamente e constituem o principal aspecto de construção dos valores utilizados no atributo Proteção. O que identifica cada tipo de defeito é a lógica implantada no painel de controle, por meio da qual se determina quais funções de proteção irão acionar os relés de bloqueio que são divididos em três tipos conforme as transições: o relé de bloqueio 86M, que corresponde a defeito mecânico; o relé de bloqueio 86E, que corresponde ao defeito elétrico e; o relé de bloqueio 86H, que corresponde ao defeito hidráulico. Cada relé de bloqueio aciona sua própria transição cuja sequência de eventos vai desde a unidade geradora ligada ao sistema elétrico de potência, passando pela retirada de potência da UG, pelo desligamento do disjuntor principal, desligamento da excitação da UG e realização dos demais passos, até se chegar ao Estado ES\_P, conforme a origem do defeito.

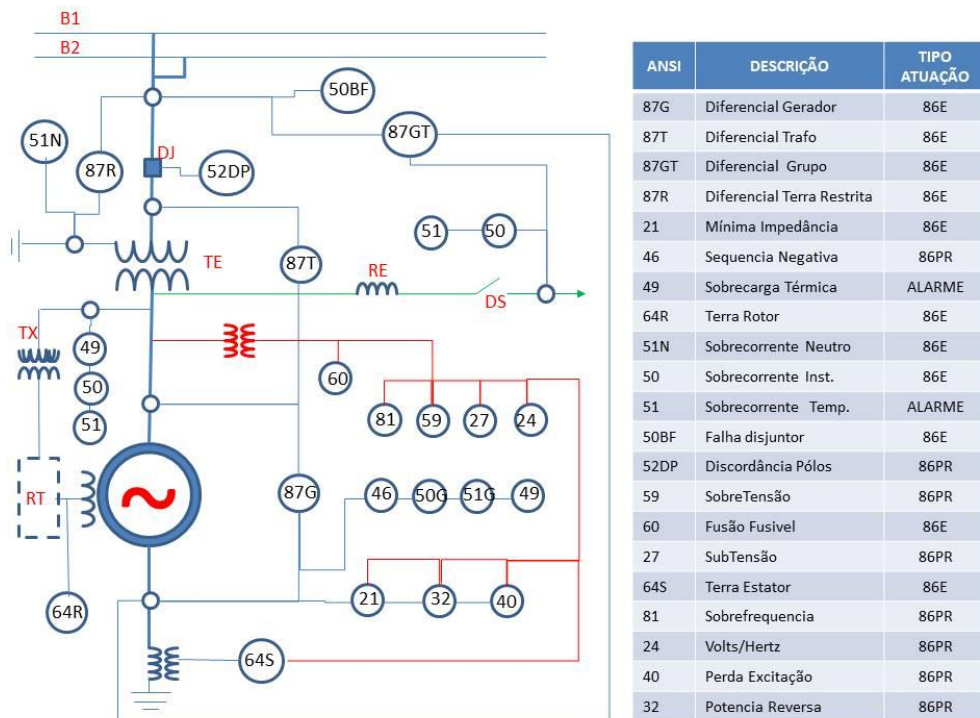
No caso de defeito de origem mecânica (transição 6), o regulador de velocidade fecha lentamente o distribuidor da turbina e depois inicia a frenagem da unidade geradora até atingir a velocidade de rotação zero.

No caso de defeito com origem elétrica (transição 8), a sequência de desligamento se altera em relação ao tempo de fechamento do distribuidor, que é mais rápido, e o tempo para a unidade geradora chegar a velocidade zero é menor para tentar diminuir o impacto em caso de problema no gerador.

Para o defeito com origem hidráulica (transição 7), o fechamento do distribuidor é idêntico ao da transição 6, causada por defeito por origem mecânica; porém, o que difere as duas situações é que neste caso ocorre o fechamento da comporta de emergência para evitar a sobrevelocidade do conjunto turbina gerador, que pode causar maior dano às partes mecânicas da unidade geradora.

As funções de proteção elétrica de uma unidade geradora são outra parte importante que é necessário ser coletada para se identificar o motivo do desligamento de uma UG. Para se estruturar o Shell do MyCBR, pesquisou-se as funções de proteção de uma unidade geradora com turbina Kaplan que se demonstram na Figura 13.

FIGURA 13 – UNIFILAR DE PROTEÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO.



FONTE: Adaptado do Ajuste de Proteção da UHE Primavera (2008)

Também foi utilizada a tabela ANSI para se estruturar o Shell. Com esses documentos se estruturou os valores do atributo proteção, os quais se demonstra no Quadro 5.

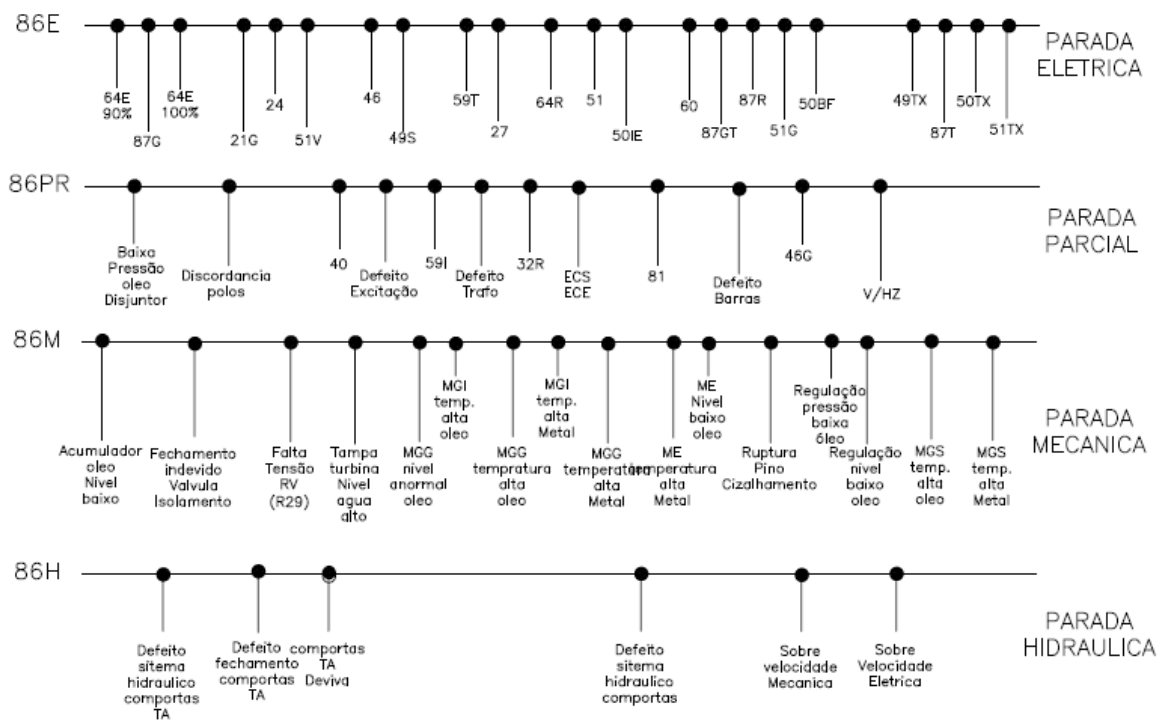
QUADRO 5 - FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

ANSI	(IEC61850)	PROTEÇÃO
87G	(GENPDIF)	Diferencial de Gerador
87T	(T2WPDIF)	Diferencial de Transformador
87GT	(T2WPDIF)	Diferencial do Grupo
87R	(REFPDIF)	Diferencial do Transformador de Terra Restrita
21	(ZMHPDIS)	Distância MHO
21	(ZDMRDIR)	Impedância Direcional MHO
46	(NSPTOC)	Sequência Negativa
49	(TRPTTR)	Sobrecarga Térmica
49TEX	(TRPTTR)	Sobrecarga do Trafo de Excitação
64R	(CVGAPC)	Terra Rotor
50/27	(CVGAPC)	Energização Inadvertida do Gerador
51N	(EF4PTOC)	Sobrecorrente de Neutro do Gerador
51	(OC4PTOC)	Sobrecorrente de Fase do Gerador
51TEX	(OC4PTOC)	Sobrecorrente de Fase do Trafo de Excitação
51NSA	(EF4PTOC)	Sobrecorrente de Neutro do Serviço Auxiliar
51	(OC4PTOC)	Sobrecorrente de Fase do Serviço Auxiliar
50BF	(CCBRF)	Falha de Disjuntor
51V	(CVGAPC)	Sobrecorrente com Restrição de Tensão
51G	(EF4PTOC)	Sobrecorrente de Terra do Transformador
52PD	(CCRPLD)	Discordância de Polos
59	(OV2PTOV)	Sobretensão
60	(SDDRFUF)	Fusão Fusível
27	(UV2PTUV)	Subtensão
64S	(STEFPHIZ)	Terra Estator 95% e 100%
81	(SAPTOF)	Sobrefrequência
81	(SAPTUF)	Subfrequência
24	(OEXPVPH)	Voltz/Hertz
40	(LEXPDIS)	Perda de Excitação
32	(GOPPDOP)	Potência Reversa

FONTE: Adaptado do Ajuste de Proteção da UHE Primavera (2008)

O quarto atributo proteção foi construído com base nos seguintes documentos: a relação das funções de proteção elétrica do relé digital instalado na UG e a lista de alarmes criada na confecção do sistema de supervisão e controle das unidades geradoras. A partir daí, selecionou-se somente os defeitos mecânicos e hidráulicos que acarretam desligamento automático da UG. Este estudo possibilitou a criação de uma matriz de TRIP ou matriz de desligamento automático, a qual demonstra a função de proteção elétrica, mecânica ou hidráulica relacionada ao respectivo relé de bloqueio, conforme se demonstra na Figura 14.

FIGURA 14 - MATRIZ DE TRIP – PROTEÇÕES DE UNIDADE GERADORA



FONTE: Adaptado do Ajuste de Proteção da UHE Primavera (2008)

O atributo “UG” indica a Unidade Geradora onde ocorreu a perturbação e o atributo “Data” informa quando foi a ocorrência. Esses dois atributos são utilizados para compor relatórios e identificar repetições de defeitos na mesma UG.

Já o atributo “Causa” que tem a função de identificar o motivo da perturbação e o atributo “Providências” que informa as medidas tomadas para a correção da perturbação, não foram tratados nessa pesquisa.



O Shell no MyCBR ficou com a configuração demonstrada na figura 10, em relação aos valores do atributo denominado 'sinalização'. Atributo este que foi configurado conforme a matriz de TRIP confeccionada durante a pesquisa das funções de proteção elétrica e mecânica/hidráulica de uma unidade geradora com turbina Kaplan e conjugação entre o distribuidor e as pás da turbina, conhecida como pás Kaplan.

Após o levantamento de todos os equipamentos que integram a unidade geradora da usina, as funções de proteção e as sinalizações do banco de dados de casos de perturbação também deve conter informações sobre:

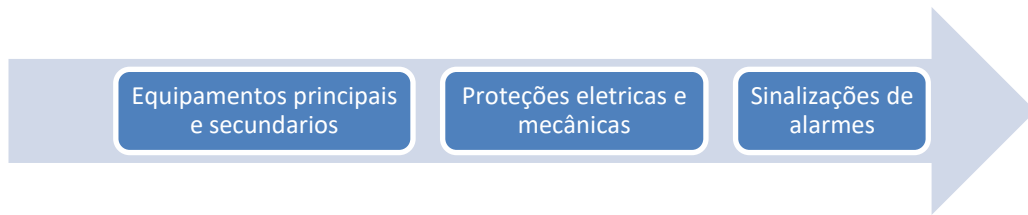
- Causa do desligamento, na qual se descreve o motivo que originou o desligamento automático da UG;
- Providência, que é o campo no qual se registram com riquezas de detalhes as ações tomadas para normalizar a perturbação da UG, pois ele é amplamente utilizado pela equipe de manutenção no trato de perturbações futuras;
- Número da unidade geradora, que servirá para se identificar a unidade e para se confeccionar relatórios gerenciais; e
- Data do ocorrido, cuja função é evidenciar quando houve a ocorrência e estimular o cuidado para que se evite a repetição de casos.

#### 5.2.2.2 Estruturação do sistema de recuperação de casos

Com o banco de casos consistido, foi realizada uma pesquisa com especialista da área de O&M de usina hidrelétrica para determinar os pesos de cada atributo, para a recuperação dos casos similares e também foram feitas simulações se caso os pesos dos atributos fossem unitários. Os resultados estão demonstrados na seção 6 desta dissertação. Somente os atributos Equipamento principal, equipamento secundário, Proteção e sinalização tiveram diferenciação de pesos, isto foi tratado dessa maneira porque os outros atributos não auxiliam na similaridade entre as perturbações, mas sim na identificação da sua causa.

A figura 15 demonstra os atributos criados no MyCBR para o cálculo da similaridade.

FIGURA 15 – ATRIBUTOS PARA A PESQUISA DE CASO



FONTE: O autor (2019).

Assim a estrutura do sistema para recuperação de casos ficou definida da seguinte maneira: os atributos Equipamento principal, Equipamento secundário, Proteção e sinalização, são utilizados para a definição de similaridades, onde foram inseridas duas formas de cálculo, uma com pesos diferentes para esses atributos e outra com peso unitário.

Os atributos UG e Data são utilizados para a identificação da Unidade Geradora e quando a perturbação ocorreu, bem como para relatórios gerenciais. Embora se estruture estas informações, o aplicativo MyCBR gratuito que se usou na pesquisa somente permite que se insiram informações completas adotadas na forma de strings devido a quantidade de detalhes que deverá ser descrita para os atributos de “Causa” e “Providencia”, nesse formato de dados não são realizadas comparações de similaridades. O que caracteriza uma oportunidade de complementação futura da pesquisa.

## 6 TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes realizados e as análises feitas possibilitam avaliar a metodologia empregada para o problema alvo da pesquisa e identificar as limitações das ferramentas empregadas.

Os resultados apresentados foram obtidos a partir de cada etapa da construção da metodologia de Raciocínio Baseado em Caso que usou o conhecimento dos especialistas em manutenção de Usinas Hidrelétricas, com o auxílio do Shell MyCBR. Estes testes demonstram a visão geral da metodologia utilizada e evidenciam os atributos utilizados, para se verificar a similaridade entre os casos, dentre estes atributos estão, o equipamento onde se iniciou a perturbação como exemplo no regulador de tensão ou no regulador de velocidade.

Só então se discutem os resultados a partir dos quais, por meio do modelo proposto se individualizam os problemas e as limitações identificadas. Por exemplo caso a perturbação tenha como equipamento principal o Regulador de Tensão e como equipamento secundário um sensor, se pode ter vários casos similares ocorridos nesses equipamentos, porém quando os atributos Proteção ou sinalização são acrescentados na busca da similaridade a quantidade de casos pode cair drasticamente, assim os pesos adotados para esses atributos determinará o caso mais semelhante ao novo caso.

Por fim, tecem-se considerações sobre os resultados e as possibilidades de solução apresentadas, e se indica a forma pela qual este conhecimento pode ser apresentado pelo usuário e utilizado para a melhoria do processo de manutenção de equipamentos e a redução de tempo para sanar as anormalidades encontradas.

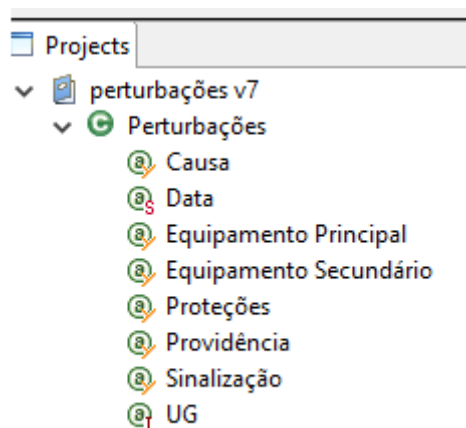
### 6.1 SELEÇÃO E TRATAMENTO PRELIMINAR DOS DADOS

A seleção dos dados utilizou o conhecimento acumulado, experiência pessoal, em mais de 20 anos de manutenção de unidades geradoras de usinas hidrelétricas. Também se utilizou documentação de fabricantes que detalham os equipamentos que compõem as unidades geradoras, as funções de proteção elétrica de gerador síncrono e documentos que especificam as proteções mecânicas de cada sistema utilizado em uma unidade geradora.

O aspecto principal foi a montagem da arquitetura do sistema inteligente na qual se identificou a necessidade de estratificar dois grupos de equipamentos. Sendo um grupo principal de equipamentos, no qual se evidenciaram as partes principais de uma unidade geradora e outro grupo, secundário, de equipamentos nos quais se evidencia a localização da falta, que pode ser identificada pela sinalização dos supervisórios ou pela própria atuação das proteções digitais.

A definição da estrutura do sistema ocorreu após a pesquisa realizada com especialistas em manutenção, na qual se definiu quais seriam as informações necessárias para indicar aos profissionais de manutenção o aspecto mais próximo para resolver a anormalidade em uma Unidade Geradora e também o que seria necessário para indicar a similaridade entre os casos. Foram definidos seis atributos para a criação de um caso de perturbação que são: data, unidade geradora, equipamento principal, equipamento secundário, proteções, e sinalizações. Após a correção da anormalidade foram criados outros dois atributos denominados 'providências' e 'causa', que serviram para auxiliar os profissionais de manutenção a lidar com as futuras perturbações conforme demonstrada na figura 16.

FIGURA 16 – ATRIBUTOS DA INSTÂNCIA EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS



FONTE: O autor (2019)

Para o atributo equipamento principal, definiram-se 15 valores que auxiliaram na localização da perturbação; o atributo equipamento secundário atribuíram-se 13 valores; o atributo sinalização atribuíram-se 50 valores e, por fim, o atributo proteções atribuíram-se 24 valores. Os atributos data e UG são utilizadas para relatórios e detecção da unidade geradora.

Para se definirem estes valores, para cada atributo se verificaram os documentos de cada subsistema que integra uma Unidade Geradora, tais como: manuais de operação e manutenção dos reguladores de tensão e velocidade, manuais de operação e manutenção do transformador elevador, gerador, turbina, comporta de emergência, mancal, disjuntor, seccionador, painel de distribuição de corrente alternada e contínua e a lógica de controle integral da unidade geradora.

Os testes foram realizados utilizando-se 20 casos de perturbação real de uma usina hidrelétrica, com sete unidades geradoras, os quais foram retirados do SIPER, que é um banco de dados do ONS.

## 6.2 REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO

A representação do conhecimento permite se identificar os principais equipamentos nos quais pode ocorrer a perturbação e, sob este aspecto, o MyCBR se mostrou um aplicativo útil para representar o conhecimento requerido para se atingir o objetivo da pesquisa. Com os equipamentos apresentados na figura 17, que compõem uma unidade geradora se utiliza a técnica de similaridade para a determinação da repetitividade, o que influencia diretamente nos índices de disponibilidade de uma instalação, apesar da complexidade dos equipamentos envolvidos, poderá existir uma assertividade na determinação da causa da perturbação.

FIGURA 17 – ATRIBUTOS DA INSTANCIA EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS

Attribute																							
Name	Equipamento Principal																						
Type	Symbol																						
Multiple	<input type="checkbox"/>																						
Allowed Values	<table border="1"> <tbody> <tr><td>Comportas TA</td><td></td></tr> <tr><td>Disjuntor Grupo</td><td></td></tr> <tr><td>Gerador Sincrono</td><td></td></tr> <tr><td>Quadro de alimentação</td><td></td></tr> <tr><td>Quadros de comandos</td><td></td></tr> <tr><td>Regulador Tensão e Velocidade</td><td></td></tr> <tr><td>Seccionadora Grupo</td><td></td></tr> <tr><td>Seccionadora Terra</td><td></td></tr> <tr><td>Serviço Auxiliar CA</td><td></td></tr> <tr><td>Serviço Auxiliar CC</td><td></td></tr> <tr><td>Sistema Adução e Sucção</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Comportas TA		Disjuntor Grupo		Gerador Sincrono		Quadro de alimentação		Quadros de comandos		Regulador Tensão e Velocidade		Seccionadora Grupo		Seccionadora Terra		Serviço Auxiliar CA		Serviço Auxiliar CC		Sistema Adução e Sucção	
Comportas TA																							
Disjuntor Grupo																							
Gerador Sincrono																							
Quadro de alimentação																							
Quadros de comandos																							
Regulador Tensão e Velocidade																							
Seccionadora Grupo																							
Seccionadora Terra																							
Serviço Auxiliar CA																							
Serviço Auxiliar CC																							
Sistema Adução e Sucção																							

FONTE: O autor (2019)

Os valores do atributo Equipamento principal, demonstrados na figura 17, foram definidos após consulta a especialista da área de O&M de usinas hidrelétricas e análise de manuais dos fabricantes dos equipamentos e são descritos conforme segue:

- Quadro de comando local onde é realizada as logicas de controle da unidade geradora e onde é centralizada toda a supervisão da UG;
- Regulador de velocidade é o equipamento responsável em controlar a velocidade da unidade geradora e como consequência a sua frequência;
- Regulador de tensão realiza o controle da potência reativa da unidade geradora e assim controlando também sua tensão;
- Seccionadora de grupo equipamento utilizado para isolar o disjuntor de grupo para manutenção no mesmo;
- Seccionadora de terra esse equipamento tem a finalidade de realizar a equalização de potencial possibilitando a manutenção do trecho entre as seccionadoras;
- Serviço auxiliar de corrente alternada, são equipamentos que tem a finalidade de alimentar equipamentos auxiliares a unidade geradora que são alimentados por corrente alternada; como exemplo motores, iluminação e outros;
- Serviço auxiliar de corrente contínua, são os equipamentos com a finalidade de alimentar as proteções e os equipamentos eletrônicos de supervisão e controle da UG, geralmente esse sistema é composto por banco de baterias, que são utilizados em casos de ocorrências com falta de corrente alternada;
- Sistema de adução e sucção, é o caminho percorrido pela água no processo de geração de energia e é composto de canais de adução e fuga, grades de proteção, comportas de emergência e outros;
- Transformador elevador é o equipamento responsável de elevar a tensão de geração da unidade geradora ao nível de tensão da subestação acoplada a usina;
- Gerador é o equipamento que transforma a energia mecânica aplicada em seu eixo em energia elétrica;

- Turbina hidráulica é o equipamento que transforma a energia hidráulica em energia mecânica em seu eixo;

O método mostrou-se eficaz apenas fazendo algumas adequações para as particularidades de cada Unidade Geradora, e adaptando as peculiaridades do Shell MYCBR. Lembrando que no caso da pesquisa foi utilizada uma turbina tipo Kaplan e relés de proteção digitais para geradores síncronos.

Na figura 17 representa-se no Shell MYCBR os equipamentos secundários utilizados para organizar o conhecimento em casos de perturbação.

FIGURA 17 – ATRIBUTOS DA INSTANCIA EQUIPAMENTOS SECUNDÁRIOS

The screenshot shows a software window titled 'Equipamento Secundário'. It contains an 'Attribute' configuration section with the following fields:

- Name:** Equipamento Secundário
- Type:** Symbol
- Multiple:**

Below these fields is a table for 'Allowed Values' with a scrollable list of equipment types and control buttons (Add, Rename, Remove) on the right.

Allowed Values
Acumulador Ar/Óleo
Anel coletor
CLP - Controlador Lógico Programável
Contatora Alimentação
Disjuntor alimentação
Distribuidor
Instrumentação
Quadro de comando
Relé Auxiliar
Relé de Proteção
Tiristores

FONTE: O Autor (2019)

Os valores do atributo equipamento secundário, demonstrado na figura 17, foram determinados após análise das perturbações de mais relevância em uma usina hidrelétrica e também identificando os subcomponentes dos equipamentos principais da unidade geradora, são apresentados a seguir:

- Acumulador Ar/óleo, é um componente do Regulador de velocidade da unidade geradora que tem a finalidade de armazenar energia para o acionamento dos distribuidores e das pás Kaplan;
- Anel coletor, compõe o gerador e é o local onde é realizada a excitação do gerador para criação do campo eletromagnético;
- Contatora, é um dispositivo utilizado para ligar a alimentação de um motor, bomba e outros e é utilizado para controle de cargas;
- Disjuntor, é um dispositivo que funciona com interruptor podendo ser destinado a proteção de um circuito;

- Instrumentos de medição, são dispositivos capazes de realizar a medição de uma grandeza analógica e enviá-las a sistema de aquisição de dados;
- Relés auxiliares, são dispositivos utilizados para realizar lógicas de acionamentos de outros equipamentos, como motores, bombas, iluminação e outros;
- Relés de proteção, dispositivos que realizam uma verificação nos circuitos elétricos para proteger contra sobrecargas e curtos-circuitos;
- Vedação, é todo material que, quando comprimido entre duas partes, mantém o vazamento de um fluido dentro dos limites máximos aceitáveis para uma aplicação eficiente;

As funções de proteção de um gerador síncrono foram representadas no MYCBR por meio de 24 funções, conforme representado na figura 18.

FIGURA 18 – FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

Attribute																							
Name	Proteções																						
Type	Symbol																						
Multiple	<input type="checkbox"/>																						
Allowed Values	<table border="1"> <tbody> <tr><td>21 - Proteção de distância</td><td></td></tr> <tr><td>24 - Proteção contra sobreexcitação ou Volts/Hertz</td><td></td></tr> <tr><td>27 - Proteção contra subtensões</td><td></td></tr> <tr><td>32 - Proteção contra motorização</td><td></td></tr> <tr><td>40 - Proteção contra subexcitação</td><td></td></tr> <tr><td>46 - Proteção de sequencia negativa</td><td></td></tr> <tr><td>49 - Proteção contra sobrecarga térmica</td><td></td></tr> <tr><td>50/27 - Energização inadvertida do Gerador</td><td></td></tr> <tr><td>50BF - Proteção contra falha de disjuntor</td><td></td></tr> <tr><td>51 - Proteção de sobrecorrente de fase do Gerador</td><td></td></tr> <tr><td>51N - Proteção de sobrecorrente de neutro do Gerador</td><td></td></tr> </tbody> </table>	21 - Proteção de distância		24 - Proteção contra sobreexcitação ou Volts/Hertz		27 - Proteção contra subtensões		32 - Proteção contra motorização		40 - Proteção contra subexcitação		46 - Proteção de sequencia negativa		49 - Proteção contra sobrecarga térmica		50/27 - Energização inadvertida do Gerador		50BF - Proteção contra falha de disjuntor		51 - Proteção de sobrecorrente de fase do Gerador		51N - Proteção de sobrecorrente de neutro do Gerador	
21 - Proteção de distância																							
24 - Proteção contra sobreexcitação ou Volts/Hertz																							
27 - Proteção contra subtensões																							
32 - Proteção contra motorização																							
40 - Proteção contra subexcitação																							
46 - Proteção de sequencia negativa																							
49 - Proteção contra sobrecarga térmica																							
50/27 - Energização inadvertida do Gerador																							
50BF - Proteção contra falha de disjuntor																							
51 - Proteção de sobrecorrente de fase do Gerador																							
51N - Proteção de sobrecorrente de neutro do Gerador																							

FONTE: O autor (2019)

Toda função de proteção está descrita no quadro 5 – Função de Proteção, pág. 53. A figura 19 representa o lançamento dos valores do atributo proteções.

Este atributo se mostrou o mais significativo para se localizar falta de grande monta segundo a pesquisa realizada com os especialistas em manutenção de unidades geradoras de usinas hidrelétrica. Pois é neste atributo que se indica, como o próprio nome diz a proteção elétrica que se sensibilizou durante a perturbação. Isto, porque na maioria das perturbações com unidade geradora, não ocorre atuação da proteção elétrica e sim das proteções mecânicas, que normalmente têm



consequências de menor monta, tais como o rebaixamento do nível de óleo, a perda de fluxo e outros.

Outra representação do conhecimento foi obtida por meio do atributo de sinalização que foi representada no aplicativo Shell MYCBR por meio das sinalizações que indicam desligamento automático de unidade geradora (TRIP), foi definido cinquenta atributos para representar esta instância e foram retirados das lógicas de transição de partida e parada da unidade geradora e da matriz de TRIP onde se determinou quais são as sinalizações: defeito hidráulico – 86H, defeito mecânico – 86M ou defeito elétrico – 86E.

Os valores do atributo sinalização estão descritos na FIGURA 14. Já a figura 20 representa os valores do atributo sinalização cadastrados no MyCBR.

FIGURA 19 – SINALIZAÇÕES QUE INDICAM DESLIGAMENTO AUTOMÁTICO DE UG

Attribute												
Name	Sinalização											
Type	Symbol											
Multiple	<input type="checkbox"/>											
Allowed Values	<table border="1"> <tbody> <tr><td>86H - Defeito fechamento comporta TA</td></tr> <tr><td>86H - Sobre Velocidade Mecânica</td></tr> <tr><td>86H - Sobre velocidade Elétrica</td></tr> <tr><td>86M - Acumulador óleo nível baixo</td></tr> <tr><td>86M - Falta tensão Regulador de Velocidade</td></tr> <tr><td>86M - Fechamento indevido Valvula de isolamento</td></tr> <tr><td>86M - Mancal Guia do Gerador nível anormal de óleo</td></tr> <tr><td>86M - Mancal Guia superior temperatura alta do metal</td></tr> <tr><td>86M - Mancal de Escora temperatura alta do metal</td></tr> <tr><td>86M - Mancal de escora nível baixo de óleo</td></tr> <tr><td>86M - Mancal guia do gerador temperatura alta do metal</td></tr> </tbody> </table>	86H - Defeito fechamento comporta TA	86H - Sobre Velocidade Mecânica	86H - Sobre velocidade Elétrica	86M - Acumulador óleo nível baixo	86M - Falta tensão Regulador de Velocidade	86M - Fechamento indevido Valvula de isolamento	86M - Mancal Guia do Gerador nível anormal de óleo	86M - Mancal Guia superior temperatura alta do metal	86M - Mancal de Escora temperatura alta do metal	86M - Mancal de escora nível baixo de óleo	86M - Mancal guia do gerador temperatura alta do metal
86H - Defeito fechamento comporta TA												
86H - Sobre Velocidade Mecânica												
86H - Sobre velocidade Elétrica												
86M - Acumulador óleo nível baixo												
86M - Falta tensão Regulador de Velocidade												
86M - Fechamento indevido Valvula de isolamento												
86M - Mancal Guia do Gerador nível anormal de óleo												
86M - Mancal Guia superior temperatura alta do metal												
86M - Mancal de Escora temperatura alta do metal												
86M - Mancal de escora nível baixo de óleo												
86M - Mancal guia do gerador temperatura alta do metal												

FONTE: O autor (2019)

Os demais atributos representados na estruturação do conhecimento são a “data” que indica quando ocorreu a perturbação, o atributo “UG” que indica qual unidade geradora ocorreu a perturbação esse atributo é necessário quando existe mais de uma unidade geradora na instalação.

O atributo “Causa” que irá alimentar o sistema somente após a resolução do defeito, bem como o atributo “Providencias” que tem a finalidade de inserir detalhes do que foi realizado para sanar o defeito.

### 6.3 BASE DE CASOS

Foram cadastrados 20 casos de perturbação em uma usina hidrelétrica com sete unidades geradoras, com 15 equipamentos principais, com 13 equipamentos secundários, com 24 funções de proteção e com 50 sinalizações, estes casos foram retirados de informações enviadas pelo agente ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Estes casos foram representados no MYCBR conforme a figura 20.

FIGURA 20 – CASOS DE PERTURBAÇÕES COM UNIDADES GERADORAS DE UHE

The screenshot shows the 'myCBR' software interface. The main window is titled 'Case Base Export' and contains a table of cases. The table has the following columns: Causa, Data, Equipamento Principal, Equipamento Secundário, Proteções, Providência, Sinalização, and UG. Below the table, there are statistics for the case base.

Causa	Data	Equipamento Principal	Equipamento Secundário	Proteções	Providência	Sinalização	UG
Umidade	11/10/16 14:00	Regulador Tensão e Velocidade	Instrumentação	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Substituição	86M - Acumulador óleo nivel bai...	2
Falha	15/04/18 05:55	Turbina	Instrumentação	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Substituição	86H - Sobre Velocidade Mecânica	7
mau contato	12/12/18 05:03	Turbina	Distribuidor	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Reajuste	86H - Defeito fechamento comp...	7
Umidade	14/12/17 22:41	Regulador Tensão e Velocidade	Acumulador Ar/Óleo	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Substituição	86H - Sobre velocidade Elétrica	6
Baixa isolamento	16/08/16 13:56	Gerador Sincrono	Anel coletor	Z1 - Proteção de distância	Reparo	86H - Sobre velocidade Elétrica	5
Falha	06/04/17 17:29	Regulador Tensão e Velocidade	Tristores	86E - Relé de bloqueio Elétrico	Reparo	86H - Defeito fechamento comp...	5
Indevido	24/10/15 10:15	Comportas TA	Instrumentação	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Substituição	86M - Acumulador óleo nivel bai...	5
Falha	22/10/18 14:16	Comportas TA	CLP - Controlador Lógico...	86E - Relé de bloqueio Elétrico	Reparo	86H - Defeito fechamento comp...	5
Falha	06/11/14 08:36	Regulador Tensão e Velocidade	Tristores	86E - Relé de bloqueio Elétrico	Substituição	86H - Defeito fechamento comp...	5
Baixa isolamento	02/05/16 05:56	Gerador Sincrono	Anel coletor	Z1 - Proteção de distância	Limpeza	86H - Defeito fechamento comp...	5
Falha	04/06/16 23:36	Comportas TA	Instrumentação	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Reparo	86H - Defeito fechamento comp...	5
Indevido	14/06/17 23:21	Transformador Elevador	Relé Auxiliar	40 - Proteção contra subexcitação	Reajuste	86H - Defeito fechamento comp...	7
Vazamento	26/04/18 16:21	Regulador Tensão e Velocidade	Instrumentação	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Substituição	86M - Fechamento indevido Valv...	7
Vazamento	26/05/17 23:00	Regulador Tensão e Velocidade	Acumulador Ar/Óleo	86M - Relé de bloqueio Mecânico	Limpeza	86H - Sobre velocidade Elétrica	4
mau contato	24/07/15 11:30	Gerador Sincrono	CLP - Controlador Lógico...	Z1 - Proteção de distância	Substituição	86H - Defeito fechamento comp...	4

Statistics:

- Number of cases: 22
- Number of attributes: 8
- Causa: different values = 7
- Data: different values = 22
- Equipamento Principal: different values = 6
- Equipamento Secundário: different values = 8
- Proteções: different values = 5
- Providência: different values = 4
- Sinalização: different values = 6
- UG: min = 1 | max = 7

FONTE: O Autor (2019)

Os dados foram tratados observando qual campo da planilha do SIPER corresponde a cada atributo já definido se pode exemplificar da seguinte maneira:

- O atributo equipamento principal do MyCBR pode estar inserido no campo equipamento origem ou no campo local da falta da planilha do SIPER; e
- A mesma lógica ocorre com o atributo equipamento secundário, que pode estar localizado no local da falta ou em dados complementares.

Devido a necessidade dessa análise não foi possível realizar uma importação mecanizada das informações é necessário a intervenção de um especialista de conhecimento.

#### 6.4 ANÁLISE DA SIMILARIDADE ENTRE CASOS

A medida de similaridade constitui outro desafio no qual o Shell MYCBR se mostrou bem eficaz, pois esse aplicativo contém lógicas internas que verificam através de técnicas computacionais as coincidências em palavras similares. Os pesos dos atributos foram determinados à partir de pesquisa com especialistas em manutenção de usinas hidrelétricas, na qual se distribuiu uma questão para 20 profissionais da área de manutenção de usinas hidrelétricas e se obteve o resultado demonstrado na tabela 12. A pesquisa se baseou em uma questão na qual deveria ser estabelecido para cada instância um valor de 1 a 10 para se determinar a importância das instâncias equipamento principal, equipamento secundário, proteções e sinalizações para se identificar a causa do desligamento automático de uma unidade Geradora.

A tabela 1 indica a questão casada com os atributos do MyCBR, para o especialista indicar qual deles terá o maior peso para detecção do motivo da perturbação.

TABELA 1 – PESQUISA DOS PESOS INDICADOS POR ESPECIALISTAS DE CADA INSTÂNCIA

Atributo	Quantidade especialista que responderam à pesquisa																	Mediana	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
EQUIPAMENTO PRINCIPAL	9	8	7	7	8	7	9	6	10	10	10	10	9	7	8	9	8	8	8,4
EQUIPAMENTO SECUNDÁRIO	9	9	9	8	9	8	7	8	9	10	9	8	8	8	7	8	7	8	8,3
SINALIZAÇÃO	8	10	9	9	10	9	8	10	8	10	7	7	10	10	9	10	10	9	9,1
PROTEÇÃO	10	10	10	10	9	10	10	9	8	10	8	9	7	9	10	7	9	9	9,1

FONTE: O autor (2019)

A questão da pesquisa foi a seguinte: “em uma perturbação qual dos itens abaixo tem o maior peso para se poder definir o motivo do desligamento de uma Unidade Geradora? (Peso de 5 a 10)”

O quadro 6 representa os itens da questão, onde cada um representa o atributo inserido no MyCBR, os especialistas consultados indicaram o valor do peso para cada item, entre 5 a 10, que representa o peso na detecção da causa da perturbação da unidade geradora, onde se tem a seguinte classificação: Peso 5 - Não auxilia na detecção; Peso 6 - Pouco auxilia na detecção; Peso 7 - Pode auxiliar na detecção; Peso 8 - Tem relevância na detecção; Peso 9 - Essencial na detecção; Peso 10 - Imprescindível na detecção.

QUADRO 6 – PESQUISA DE PESOS

Atributo	Descrição
EQUIPAMENTO PRINCIPAL	Local onde foi identificado o motivo do desligamento na Unidade Geradora.
EQUIPAMENTO SECUNDÁRIO	Equipamento onde foi identificado o motivo do desligamento na Unidade Geradora.
SINALIZAÇÃO	Descrição da sinalização no desligamento da Unidade Geradora.
PROTEÇÃO	Função de proteção atuada no desligamento da Unidade Geradora.

FONTE: O autor (2019)

Após as respostas da pesquisa se elaborou uma planilha por meio da qual se calculou a média ponderada e a mediana de cada instância e também se determinou a porcentagem das notas, chegando aos seguintes valores de peso para cada instância: proteção = 9,1; sinalização = 9,1; equipamento principal = 8,4; equipamento secundário = 8,3.

Os valores da pesquisa para determinar o peso de cada atributo na relevância na detecção da causa de uma perturbação em unidade geradora, foram cadastrados no MYCBR para serem utilizados no cálculo da similaridade, nos ensaios realizados em uma usina com 7 unidades geradoras, com 15 equipamentos principais, com 13 equipamentos secundários, com 24 funções de proteção e com 50 sinalizações. Obteve-se os resultados conforme demonstrados nas figuras 22 a 30.

As figuras 21 e 22 representam uma consulta de um caso com os seguintes valores dos atributos:

- Equipamento principal: Regulador de tensão e velocidade;

- Equipamento secundário: Tiristores;
- Proteção: 21 - Proteção a distância; e
- Sinalização: 86E – Atuação da proteção 21G.

Os pesos foram diferenciados da seguinte maneira, para figura 21 foram inseridos pesos igual a 1 para todos os atributos e na figura 22 foram utilizados os pesos conforme determinados na pesquisas com os especialistas em manutenção, sendo: Peso do atributo equipamento principal = 0,84; peso do atributo equipamento secundário = 0,83; peso para o atributo proteção = 0,91 e o peso para o atributo sinalização = ,091.

FIGURA 21 – SIMILARIDADE COM PESO 1 PARA OS ATRIBUTOS

The screenshot shows the myCBR software interface. The main window is titled "Retrieval" and displays a query with the following attributes:

- Equipamento Principal: Regulador Tensão e Velocidade
- Equipamento Secundário: Tiristores
- Proteções: 21 - Proteção de distância
- Sinalização: 86E - Atuação Proteção 21G

Below the query, there are buttons for "Start retrieval" and "Save results". To the right, a list of perturbations is shown with their similarity scores:

- Perturbações #0 - 0.77
- Perturbações #15 - 0.51
- Perturbações #12 - 0.51
- Perturbações #1 - 0.26
- Perturbações #17 - 0.26
- Perturbações #16 - 0.26
- Perturbações #11 - 0.26
- Perturbações #20 - 0.26
- Perturbações #8 - 0.26
- Perturbações #9 - 0.26
- Perturbações #4 - 0.26

At the bottom, a similarity matrix is displayed with the following data:

	Perturbações #0	Perturbações #...	Perturbações #...	Perturbações #1
Similarity	0.77	0.51	0.51	0.26
Causa	Baixa isolamento	Falha	Falha	Umidade
Data	10/12/14 10:12	06/04/17 17:29	06/11/14 08:36	11/10/16 14:00
Equipamento P...	Regulador Ten...	Regulador Ten...	Regulador Ten...	Regulador Ten...
Equipamento S...	Tiristores	Tiristores	Tiristores	Instrumentação
Proteções	21 - Proteção ...	86E - Relé de b...	86E - Relé de b...	86M - Relé de ...
Provisência	Substituição	Reparo	Substituição	Substituição
Sinalização	86E - Atuação ...	86H - Defeito f...	86H - Defeito f...	86M - Acumul...
UG	1	5	5	2

FONTE: O autor (2019)

FIGURA 22 – SIMILARIDADE COM PESOS CONFORME ESPECIALISTA

The screenshot shows the 'myCBR' software interface. The main window displays a 'Retrieval' query for 'Perturbações'. The query parameters are:

- Equipamento Principal: Regulador Tensão e Velocidade
- Equipamento Secundário: Tiristores
- Proteções: 21 - Proteção de distância
- Sinalização: 86E - Atuação Proteção 21G

Below the query, there are buttons for 'Start retrieval' and 'Save results'. To the right, a list of cases is shown with their similarity values:

- Perturbações #0 - 0.74
- Perturbações #15 - 0.48
- Perturbações #12 - 0.48
- Perturbações #16 - 0.26
- Perturbações #11 - 0.26
- Perturbações #9 - 0.26
- Perturbações #1 - 0.24
- Perturbações #17 - 0.24
- Perturbações #20 - 0.24
- Perturbações #8 - 0.24
- Perturbações #4 - 0.24

At the bottom, a similarity matrix is displayed with the following data:

	Perturbações #0	Perturbações #...	Perturbações #...	Perturbações #...
Similarity	0.74	0.48	0.48	0.26
Causa	Baixa isolamento	Falha	Falha	Baixa isolamento
Data	10/12/14 10:12	06/04/17 17:29	06/11/14 08:36	16/08/16 13:56
Equipamento P...	Regulador Ten...	Regulador Ten...	Regulador Ten...	Gerador Sincr...
Equipamento S...	Tiristores	Tiristores	Tiristores	Anel coletor
Proteções	21 - Proteção ...	86E - Relé de b...	86E - Relé de b...	21 - Proteção ...
Providência	Substituição	Reparo	Substituição	Reparo
Sinalização	86E - Atuação ...	86H - Defeito f...	86H - Defeito f...	86H - Sobre ve...
UG	1	5	5	5

FONTE: O autor (2019)

Verificou-se que não houve diferença significativa no valor da similaridade, para o caso com maior similaridade da figura 21, foi de 77% e o caso com maior similaridade na figura 22, foi de 74%. Também foi constatado que a diferença de similaridade entre os demais casos não ultrapassou de 5%. Mesmo assim essa diferença deve ser considerada na análise de similaridade dos casos.

Os demais ensaios foram realizados com pesos determinados na pesquisa realizada pelo os especialistas em manutenção.

No ensaio realizado com perturbação no sistema de excitação, que o valor do atributo equipamento principal, de uma unidade geradora, obteve o resultado conforme a figura 23, onde foram cadastrados os seguintes valores para os demais atributos: Relé auxiliar para equipamento secundário, 27 – sobretensão para a proteção e 86E atuação do 64R para sinalização.

FIGURA 23 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO NO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

	Perturbações #...	Perturbações #3	Perturbações #0	Perturbações #1
Similarity	0.26	0.26	0.23	0.0
Causa	Indevido	mau contato	Baixa isolamento	Umidade
Data	14/06/17 23:21	25/04/16 09:23	10/12/14 10:12	11/10/16 14:00
Equipamento P...	Transformado...	Quadros de co...	Regulador Ten...	Regulador Ten...
Equipamento S...	Relé Auxiliar	Relé Auxiliar	Tiristores	Instrumentação
Proteções	40 - Proteção ...	86M - Relé de ...	21 - Proteção ...	86M - Relé de ...
Providência	Reajuste	Substituição	Substituição	Substituição
Sinalização	86H - Defeito f...	86M - Acumul...	86E - Atuação ...	86M - Acumul...
UG	7	3	1	2

FONTE: O autor (2019)

Foi verificado que não houve similaridade significativa nesse ensaio, isto é, somente um atributo para cada caso foi similar, que é demonstrado pelo sombreamento do item similar. Essa falta de similaridade pode ter ocorrido devido o lançamento do caso novo ter uma inconsistência que é, quando se tem a atuação da proteção de sobre tensão não termos a sinalização de atuação do 64R que é um curto circuito a terra do rotor e não uma sobretensão.

No ensaio representado pela figura 24 foi utilizado como equipamento principal a comporta TA, como equipamento secundário a instrumentação utilizada pelo equipamento principal, a proteção acionada foi o relé de bloqueio mecânico - 86M e a sinalização foi o defeito no sistema hidráulico da comporta – 86H. pode-se notar que foi inserido uma diferença entre a proteção e a sinalização, pois a primeira acionou o relé de bloqueio 86M e a segunda atuou o relé de bloqueio 86H, mesmo assim tivemos uma similaridade significativa com valor de 77%, com três dos quatro atributos similares e também podemos verificar que o defeito era recorrente na unidade geradora 5. Dessa forma esses casos poderão ser utilizados como base para análise do novo caso de perturbação.

FIGURA 24 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO DA COMPORTA DA TOMADA D'ÁGUA – PROBLEMA HIDRÁULICO

	Perturbações #...	Perturbações #...	Perturbações #1	Perturbações #...
Similarity	0.77	0.77	0.51	0.51
Causa	Indevido	Falha	Umidade	Falha
Data	24/10/15 10:15	04/06/16 23:36	11/10/16 14:00	15/04/18 05:55
Equipamento P...	Comportas TA	Comportas TA	Regulador Ten...	Turbina
Equipamento S...	Instrumentação	Instrumentação	Instrumentação	Instrumentação
Proteções	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...
Providência	Substituição	Reparo	Substituição	Substituição
Sinalização	86M - Acumul...	86H - Defeito f...	86M - Acumul...	86H - Sobre Ve...
UG	5	5	2	7

FONTE: O autor (2019)

O ensaio realizado na figura 25 demonstrou um caso onde todos os atributos são similares ao caso novo de perturbação, assim esse caso ocorrido na unidade geradora 5 teve uma similaridade de 100% com o novo caso, também se pode notar que existem dois casos com três atributos similares, o primeiro um caso com a unidade geradora 5 e o segundo com a unidade geradora 2, onde os valores da similaridade foram de 77% e 74% respectivamente, na análise se verificar que o peso dos atributos foi determinante para essa diferença, isto é o atributo equipamento principal nesses casos são diferentes, no caso da unidade geradora 5 a perturbação foi na comporta TA e no caso da unidade geradora 2 a perturbação foi no regulador de tensão e velocidade, assim se pode afirmar que a diferença de peso para cada atributo tem grande relevância na pesquisa de similaridade.



FIGURA 25 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO DA COMPORTA DA TOMADA D’ÁGUA – PROBLEMA MECÂNICO

Retrieval

Case base: Perturbações

Query

Equipamento Principal: Comportas TA [Change](#) Special Value: none

Equipamento Secundário: Instrumentação [Change](#) Special Value: none

Proteções: 86M - Relé de bloqueio Mecânico [Change](#) Special Value: none

Sinalização: 86M - Acumulador óleo nível baixo [Change](#) Special Value: none

Start retrieval

Save results

	Perturbações #...	Perturbações #...	Perturbações #1	Perturbações #...
Similarity	1.0	0.77	0.74	0.51
Causa	Indevido	Falha	Umidade	Falha
Data	24/10/15 10:15	04/06/16 23:36	11/10/16 14:00	15/04/18 05:55
Equipamento P...	Comportas TA	Comportas TA	Regulador Ten...	Turbina
Equipamento S...	Instrumentação	Instrumentação	Instrumentação	Instrumentação
Proteções	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...
Providência	Substituição	Reparo	Substituição	Substituição
Sinalização	86M - Acumul...	86H - Defeito f...	86M - Acumul...	86H - Sobre Ve...
UG	5	5	2	7

FONTE: O autor (2019)

No ensaio da figura 26, demonstra que não existe nenhum caso similar ao novo caso cadastrado, mesmo sendo um caso de perturbações já divulgado no setor elétrico de geração de energia, isto demonstra que o banco de casos deverá ser bem robusto e construindo com o maior número de casos conhecidos. Essa perturbação foi inserida no banco de casos para futuras pesquisas.

FIGURA 26 – ENSAIO COM PERTURBAÇÃO NO SERVIÇO AUXILIAR

The screenshot shows the 'Retrieval' window of the MyCBR application. The 'Case base' is set to 'Perturbações'. The 'Query' section includes the following fields:

- Equipamento Principal: Serviço Auxiliar CC (Special Value: none)
- Equipamento Secundário: Contatora Alimentação (Special Value: none)
- Proteções: 51 - Proteção de sobrecorrente de fase do Gerador (Special Value: none)
- Sinalização: 86E - Atuação proteção 51 (Special Value: none)

Buttons for 'Start retrieval' and 'Save results' are visible. A list of 22 perturbation cases is shown on the right, with 'Perturbações #0 - 0.0' selected. Below is a table of results:

	Perturbações #0	Perturbações #1	Perturbações #...	Perturbações #...
Similarity	0.0	0.0	0.0	0.0
Causa	Baixa isolação	Umidade	Falha	mau contato
Data	10/12/14 10:12	11/10/16 14:00	15/04/18 05:55	12/12/18 05:03
Equipamento P...	Regulador Ten...	Regulador Ten...	Turbina	Turbina
Equipamento S...	Tiristores	Instrumentação	Instrumentação	Distribuidor
Proteções	21 - Proteção ...	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...	86M - Relé de ...
Providência	Substituição	Substituição	Substituição	Reajuste
Sinalização	86E - Atuação ...	86M - Acumul...	86H - Sobre Ve...	86H - Defeito f...
UG	1	2	7	7

FONTE: O autor (2019)

## 6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O universo da pesquisa foi realizado com um banco de casos de 22 perturbações em um período de cinco anos, referente a uma UHE com sete Unidades Geradoras, 15 valores para o atributo equipamentos principais, 13 valores para o atributo equipamentos secundários, 24 valores para o atributo proteção e 50 valores para o atributo sinalizações.

Desse universo os 20 casos de perturbação utilizaram sete unidades geradoras, seis valores do atributo equipamento principal, oito valores do atributo equipamento secundário, cinco valores do atributo proteção e seis valores do atributo sinalização.

O MyCBR não se mostrou amigável para a inserção de detalhes das ocorrências, devido a quantidade de caracteres possíveis de se lançar nos valores dos atributos e também porque os campos para comentários da versão gratuita do aplicativo necessitam ser parametrizados para o modo "string", e nos testes realizados quando houve a entrada da informação do atributo "Causa", a informação

não era salva no banco de casos. Assim se optou em focar na similaridade dos casos com os atributos: equipamentos, proteções e sinalizações, do que na recuperação das causas e providências tomadas.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A construção do sistema inteligente para diagnóstico de perturbações em usinas de geração de energia elétrica baseou no levantamento e apresentação de um arcabouço teórico relativo às responsabilidades das áreas de operação e manutenção - O&M que trabalham em usinas de geração de energia e, no método do raciocínio baseado em casos.

As atividades executadas pela O&M das usinas para a identificação dos componentes e equipamentos utilizados para a geração de energia elétrica permitiu a redução do objeto de pesquisa e ocasionou economia no processamento das informações disponibilizadas na base de casos. Outro aspecto importante foi a organização do modelo de conhecimento baseada no sistema de informações de perturbações utilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

O raciocínio baseado em casos demonstra de forma breve porque se deve adotar o modelo de sistema inteligente, pois a disponibilidade de uma base de dados com soluções empregadas em diversas usinas de geração de energia elétrica sintetizou também o objeto de pesquisa, inclusive o direcionamento a desligamentos automáticos em unidades geradoras. Uma base de casos gerados através do SIPER propicia a construção de um sistema inteligente com características específicas identificadas utilizando a técnica RBC, contudo com o aprimoramento dessa técnica se pode elaborar sistemas inteligentes complexos que irão auxiliar especialistas de diversas áreas de conhecimento da manutenção de Usinas Hidrelétricas.

As informações desta ferramenta possibilitaram o desenvolvimento de um método de inserção de casos e de consulta para uso na recuperação das informações de perturbações similares a uma nova ocorrência, para que as mesmas possam ser utilizadas por profissionais da área de O&M das plantas de geração de energia, como referência na análise da causa raiz do defeito.

Ademais, foi apresentada a estrutura do sistema inteligente para o diagnóstico de perturbações em usinas de geração de energia elétrica, indicando como elementos centrais, a base de casos e sua recuperação sem, no entanto, se deixar de abordar tópicos importantes tais como: a representação do conhecimento (extremamente relevante para se adequar a base de casos ao sistema inteligente e permitir a sua uniformização) e o cálculo de similaridade (elemento basilar da técnica

que permite a seleção da solução mais interessante, fixando critérios e pesos para o seu cálculo). Por fim, demonstrou-se como é utilizado o sistema por meio da recuperação dos casos; etapa na qual o usuário informa critérios para que se realize a busca (baseado no modelo de conhecimento proposto), o que permite a reutilização do caso ou a sua adequação por meio de uma revisão, que culmina com a sua retenção.

O método para a construção do sistema inteligente envolveu a estruturação do problema para a utilização da técnica de raciocínio baseado em casos, identificando-se os documentos pertinentes de cada unidade geradora para a seleção dos elementos que caracterizaram cada uma das soluções para o defeito encontrado. A lista de equipamentos foi empregada tanto para a caracterização da unidade geradora quanto das técnicas empregadas para a solução do defeito, o que possibilitou a adequação ao modelo de conhecimento empregado. Nesta etapa da pesquisa, estabeleceu-se a representação a ser empregada, os tipos de dados e valores possíveis de serem empregados, a definição dos tipos de proteção e das medidas de similaridade e a identificação dos critérios e pesos.

Os resultados apresentados permitem identificar a adequação da ferramenta para a busca de casos similares aos elementos informados e, com base na semelhança dos casos, apresentar uma lista de aspectos e sequencias a serem empregadas para se construir uma solução que se adeque de forma total ou parcial às novas demandas.

Já a busca realizada de forma pontual, isto é, quando a pesquisa de similaridade é realizada com um único atributo, demonstra que o cálculo de similaridade (diverso da expectativa) é prejudicado, pois ao considerar que o atributo pesquisado é único, ele contabiliza aquele valor, atribuindo para os demais atributos o valor zero. Assim, cada avaliação parcial tem valoração diversa e proporcional aos pesos colocados no sistema para aquele determinado atributo.

O sistema está sendo utilizado em forma de teste em uma usina hidrelétrica onde já foram inseridos mais de 80 casos de ocorrências no banco de casos, com um universo de 14 unidades geradoras, 15 equipamentos principais, 25 equipamentos secundários, 25 proteções e 50 sinalizações. As ocorrências desse banco são de um período de 5 anos. O método pode auxiliar na solução de perturbações com unidades geradoras, diminuindo o tempo para que fossem sanados os defeitos.

A solução, propriamente dita, ainda depende de intervenção do usuário que, ao interpretar os dados, pode realizar a consulta das principais ocorrências e verificar os equipamentos onde mais ocorreram os defeitos.

Muitas possibilidades surgem com o presente trabalho, uma vez que a utilização desta tecnologia permite a evolução e o aperfeiçoamento do modelo apresentado, com vistas a atender cada um dos equipamentos, sistemas e serviços presentes na Usina de Geração de Energia, permitindo sua expansão para outras áreas da própria da Usina ou mesmo de estruturas do setor elétrico.

Outro aspecto importante é a versatilidade do modelo que permite incluir na base de casos soluções específicas ou fragmentos de soluções, para atender a perturbações de outros tipos de equipamentos tais como turbinas do tipo Pelton e Bulbo, vertedouro e eclusas as quais não estão presentes na base de casos.

Oportunamente também se pode explorar com ganho, a possibilidade de se incluir casos específicos de outros sistemas do setor, tais como: usinas fotovoltaicas, aerogeradores, usinas de armazenamento de energia e usinas termosolares. Assim é possível preparar memoriais descritivos das principais perturbações, com explicações e validações de cada solução empregada, o que permite preparar outra gama de documentações pertinentes, mas nem sempre empregadas.

No mesmo aspecto, pode-se propor o uso de técnicas híbridas para permitir, com o auxílio de outros *softwares*, a construção automática das soluções sugeridas, de forma a diminuir ainda mais o tempo de restabelecimento de um equipamento para o retorno à operação. E permitir que o usuário utilize o tempo disponibilizado, para avaliar as soluções possíveis e fazer pequenos ajustes. Para tal, é igualmente importante criar uma ferramenta e um banco de dados que permita refinar a elaboração destes documentos de forma automática.

O emprego de técnicas para a aquisição facilitada das soluções adotadas seria interessante através da utilização de aprendizagem de máquina, porém em vista da diversidade de nomenclaturas e mesmo da utilização de mais de uma língua mostra-se um caminho árduo a ser analisado em vista do custo/benefício da técnica. Com isso caracteriza-se a necessidade de padronização da base de dados, assim seria possível trabalhar com um universo maior de dados, o que certamente possibilitaria a evolução do sistema de forma mais interessante, especialmente se identificadas marcas e modelos de equipamentos, possibilitando verificar se é um

problema decorrente da marca, ou, de uma forma mais refinada, até do lote de produção, que pode ter um defeito genérico digno de recall.

Por fim, outra possibilidade que se vislumbrou por meio da pesquisa é a de se trabalhar com uma metodologia para a construção de sistemas/serviços que auxiliem o especialista a diagnosticar o defeito de forma preditiva, a partir de estatísticas de ocorrências e tempo de utilização dos equipamentos. Como, por exemplo, a programação orientada a serviço, que é uma técnica relativamente nova que se atrelada à visão da programação orientada a objeto, pode diminuir as complexidades de se construir lógicas para empreendimentos com diversidade de equipamentos.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL, **Resolução número 688 de dezembro de 2003**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2003.
- BO-SUK YANGA, SEOK KWON JEONGA, YONG-MIN OHB, ANDY CHIT CHIOW TANC. **Case-based reasoning system with Petri nets for induction motor fault diagnosis**. ELSEVIER, 2004.
- CARVALHO, B. S., SILVA, R. P., FERNEDA E., BRASIL L. M., SILVA, A. P. B., **Proposta de um Modelo RBC para Construção de um Sistema de Apoio ao Diagnóstico Médico**. Universidade Católica de Brasília (UCB), V Workshop de Informática Médica, 2005.
- CESP, **Manual de Operação da Usina Porto Primavera**, 1998.
- CESP, **Ajuste da Proteção da Usina Porto primavera**, 2008.
- ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LACERDA, R. T. O.; TASCA, J.E. **Processo de Seleção de portfólio Bibliográfico.**, 2010.
- KNUBLAUCH, H. **An Agile Development Methodology for Knowledge-Based Systems Including a Java Framework for Knowledge Modeling and Appropriate Tool Support**. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades Dr.rer.nat der Fakultät für Informatik der Universität Ulm, 2002.
- MANCINI, F. N. **Sistema Inteligente para Projeto de Lógicas de Partida e Parada de Centrais Hidrelétricas**. Curitiba, 2016.
- MANCINI, F. N., AOKI, A. R. **Case-Based Reasoning for the Design of Start-Stop Logic of Hydroelectric Power Stations**, Instituto Lactec, Curitiba, Brasil, 2018.
- MARTINS, H. **A Lógica Paraconsistente Anotada de Quatro Valores - LPA4v aplicada em Sistema de Raciocínio Baseado em Casos para o Restabelecimento de Subestações Elétricas.**, 2003.
- MORAES, C.C, CASTRUCCI, P.L.; **Engenharia de Automação industrial**; 2010
- NIKOLOPOULOS, C. **Expert systems**: New York: Marcel Dekker, Inc., 1997.
- ONS. Submódulo 25.1 - **Apuração dos dados, relatórios da operação do Sistema Interligado Nacional e indicadores de desempenho: visão geral**. Procedimentos de Rede, p.1–5, v. 2016/12.
- ONS. Submódulo 25.9 – **Indicadores de Desempenho dos Sistemas de Proteção**. Procedimentos de Rede, p.1–21, v. 2016/12.
- ONS. Submódulo 25.3 – **Relatório da operação do Sistema Interligado**. Procedimentos de Rede, p.1–12, v. 2016/12.



ONS RE 3-0041-2017, **Relatório de Análise estatística de desligamento Forçados de equipamentos referente ao ano de 2016**, Operador Nacional do Sistema, 2017.

PACHECO, R.C. S., DIAS, M. M.; **Uma Visão geral de metodologias para desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimento**; Revista de Ciência da Informação, v. 10, n.5, out. 2009.

PETERSON, J. L. **Petri net theory and the modeling of systems**. New York: Prentice-Hall, 1981.

QIAN, Z., GAO, W. S., **A case-based reasoning approach to power transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis data**. A European Transactions on Electrical Power publicou em 2009.

QUAGLINI, S., et al. **Guideline-based careflow system**. Artificial Intelligence in Medicine, 20, 5–22. 2000

RIESBECK, C. K.; SCHANK, R. C. **Inside Case-Based Reasoning**. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1989.

SANTOS, A. K.; **Sequenciamento automático de comandos no Centro de Operação do Sistema da COPEL a partir de informações em tempo real das subestações**. 2012.

SELLITTO, M. A.; **Inteligência artificial: Uma Aplicação em uma Indústria de Processo contínuo**, v.9, n.3, p.363-376, dez. 2002.

SCHANK, R.C. and ABELSON, R. **Scripts, plans, goals, and understanding**. NJ:Erlbaum, Northvale, 1977.

SCHANK, R.C. **Dynamic memory: A theory of reminding and learning in computers and people**. Cambridge University Press, Cambridge. KOLODNER, 1993.

SELLITO, M. A.. **Inteligência Artificial: Uma Aplicação Em Uma Indústria De Processo Contínuo**. Gestão & Produção, v.9, n.3, p.363-376, dez. 2002.

URNAU, E.; KIPPER, L. M.; FROZZA, R. **Técnica de raciocínio baseado em caso para auxiliar processos de tomada de decisão estratégica**. Anais do XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção – XXX ENEGEP, São Carlos, 2010.

WANGENHEIM, C. G.; WANGENHEIM, A. **Raciocínio Baseado em Casos**. v. 1 Curitiba: Editora Manole, 2003.

## BIBLIOGRAFIA ADICIONAL CONSULTADA

CHUNLI YANG; HAO LI, **Study on product knowledge management for product development, Intelligent Control and Automation**. 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on , vol., no., pp.71197124, 25-27 June 2008.

CORCHADO, J. et al. **Hybrid instance-based system for predicting ocean temperature**. International Journal of Computational Intelligence and Applications, v. 1, n. 1, p. 35-52, 2001.

GANG MA,LINRU JIANG, GUCHAO XU AND JIANYONG ZHENG. **A Model of Intelligent Fault Diagnosis of Power Equipment Based on CBR**. School of Electric & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, China, Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, China, Hindawi Publishing Corporation, 2014.

GARRIDO, J.L.; HURTADO, M.V.; NOGUERA, M.; ZURITA, J.M. **Using a CBR Approach Based on Ontologies for Recommendation and Reuse of Knowledge Sharing in Decision Making, Hybrid Intelligent Systems**. 2008. HIS '08. Eighth International Conference on, vol., no., pp.837842, 10-12 Sept. 2008.

KACPRZYK, J. **Multistage fuzzy control**. Chichester, UK: John Wiley Sons, 1997.

KOLODNER, J. **Case-based reasoning**. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1993.

RABUSKE, R. **Inteligência Artificial**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

SCHANK, R.C. **Explanation patterns: understanding mechanically and creatively**. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1986.

VITORINO, T. A. S. **Raciocínio Baseado em Casos: Conceitos e Aplicações**, Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

WANG, KE; LIU, JAMES N. K.; MA, WEI-MIN. **A Study on the Reliability of Case-Based Reasoning Systems, Data Mining Workshops**. 2008. ICDMW '08. IEEE International Conference on , vol., no., pp.60-68, 15-19 Dec. 2008.

## ANEXO 1 – INDICADORES DE MANUTENÇÃO

A gestão dos indicadores de manutenção é realizada pela engenharia de manutenção e divulgada para as equipes de manutenção local, para auxiliar a tomada de decisão quanto ao planejamento da manutenção, sempre comprometida com a produtividade, confiabilidade e economicidade.

O acompanhamento dos indicadores de desempenho da manutenção permite avaliar a evolução do desempenho do equipamento, para se identificar o momento mais oportuno de atuação das equipes de manutenção e otimizar a utilização dos recursos da empresa.

O Submódulo 25 dos Procedimentos de Rede do ONS apresenta alguns índices definidos como:

$$\text{Taxa de Falhas} = \frac{\sum \text{NF} \times 8.760}{\sum \text{HS}} \quad (1)$$

Onde: NF = número de falhas, HS = horas de Serviço e 8.760 = fator de anualização. Este indicador tem a finalidade de medir a confiabilidade operacional e de possibilitar o acompanhamento de equipamentos distintos, com perfis de produção diferentes.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\sum (\text{PxHD}) \times 100}{\sum (\text{PxHP})} \quad (2)$$

Onde: P = potência da unidade geradora, HD = horas disponíveis e HP = horas do período. Este indicador tem a finalidade de medir a produtividade operacional.

Na resolução ANEEL nº 614/2014 foram apresentados os seguintes itens que norteiam o setor elétrico.

$$\text{TEIFa} = \frac{\text{Px}(\text{HDF} + \text{HEDF})}{\text{Px}(\text{HEDF} + \text{HS} + \text{HDF} + \text{HRD} + \text{HDCE})} \quad (3)$$

Onde, P = potência instalada, HDF= horas de desligamento forçado, HEDF= horas equivalentes de desligamento forçado, HS= horas em serviço, HRD= horas de reserva desligada e HDCE= horas desligada por condições externas e TEIFa= taxa

equivalente de indisponibilidade forçada. Este indicador aponta a parcela do tempo total, descontada do tempo utilizado para manutenção preventiva, que as unidades geradoras utilizam para correção de manutenção forçada.

$$TEIP = \frac{Px(HDP+HEDP)}{PxHP} \quad (4)$$

Onde, HDP= horas de desligamento Programado, HEDP= horas equivalentes de desligamento programado, HP= total de horas de serviço e TEIP= taxa equivalente de indisponibilidade programada. Este indicador indica a parcela do tempo total que as unidades geradoras utilizam para de manutenção preventiva.

$$IDv = (1 - TEIP) \times (1 - TEIFa) \quad (5)$$

O índice de disponibilidade verificada (IDv) é calculado a partir das taxas TEIFa e TEIP de cada usina do setor elétrico que possuem valor de referência de ID específico. Caso a usina apresente valor inferior a esta referência de disponibilidade, a mesma é penalizada com a redução proporcional da energia assegurada, que é a energia máxima que a usina pode negociar (TABELA 2).

TABELA 2 – EXEMPLO DE VALORES DE REFERÊNCIA DE ALGUMAS USINAS DO SETOR ELÉTRICO

Potência	TEIFa	TEIP	IDv
10 – 29 MW	0,0233	0,0686	0,9096984
30 – 59 MW	0,0167	0,0540	0,9302018
60 – 100 MW	0,0253	0,0809	0,8958468

FONTE: O autor (2019)

## ANEXO 2 – ESTATÍSTICAS DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS

As tabelas 3 a 6 se referem ao relatório estatístico do ONS do SIPER, cujo universo de análise consiste em todos os geradores hidráulicos e térmicos despachados de forma centralizada e com as usinas selecionadas conforme os critérios:

- (1) Usina com potência efetiva igual ou superior a 300 MW;
- (2) Usina com  $200 \text{ MW} \leq \text{potência efetiva} < 300 \text{ MW}$  e transformação igual ou superior a 230 kV.

Neste item se demonstra como foram calculados os indicadores de duração média de desligamento forçado, frequência de desligamento forçado e taxa de desligamento forçado das funções transmissão e geração da rede básica. E os valores encontrados nos anos de 2014 a 2016, segundo ONS (2017).

A Tabela 3 apresenta o universo de geradores hidráulicos e térmicos, de acordo com o maior nível de tensão do transformador ao qual este gerador está conectado.

TABELA 3 – UNIVERSO ESTATÍSTICO DE 2014 A 2016 – UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS

Tensão (kV)	Unidades da Rede Básica					
	Térmica			Hidráulica		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016
500	8	8	12	161	180	207
440				66	66	66
345	24	24	24	34	34	34
230	45	45	39	108	108	111
138	32	32	34	36	36	36
88	4	4	4	7	7	7
69		1		2	2	2
34,5				2	2	2
13,8			4	1	1	5
Total	113	114	117	417	436	470

FONTE: ONS RE 3/0041/2017

O indicador DMDF se destina a gerenciar o desempenho das funções transmissão e geração, em relação à duração média dos desligamentos forçados durante o período considerado (TABELA 4). A equação utilizada para o cálculo deste indicador é:

$$\text{DMDF} = \frac{\text{Número de horas de desligamentos forçados da função}}{\text{Número de desligamentos forçados da função}} \quad (6)$$

TABELA 4 – DURAÇÃO MÉDIA DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS NOS ANOS DE 2014 A 2016

Tipo	Duração Média – DMDF (horas/deslig.)								
	Todas as origens			Interna e secundária			Interna		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Hidráulica	3,593	9,436	2,280	4,160	6,187	2,466	13,125	14,504	5,533
Térmica	5,235	6,923	6,521	4,042	7,007	6,256	3,494	11,992	5,872

FONTE: ONS RE 3/0041/2017

O indicador FDF se destina a gerenciar o desempenho das funções transmissão e geração, em relação à frequência média dos desligamentos forçados durante o período considerado (TABELA 5). A equação utilizada para cálculo deste indicador é:

$$\text{FDF} = \frac{\text{Número de desligamentos forçados da função no período considerado}}{\text{Número de horas do período considerado}} \quad (7)$$

TABELA 5 – FREQUÊNCIA DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS NOS ANOS DE 2014 A 2016

Tipo	Frequência Desligamento Forçado – FDF (deslig./1000horas)								
	Todas as origens			Interna e secundária			Interna		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Hidráulica	282,561	288,128	219,635	123,952	195,091	159,817	12,727	8,333	5,365
Térmica	118,777	115,639	57,420	38,336	107,877	54,452	8,451	4,566	1,370

FONTE: ONS RE 3/0041/2017

O indicador TDFLT se destina a gerenciar o desempenho da função Transmissão – LT, em relação à quantidade de desligamentos forçados durante o

período considerado (TABELA 6). A equação utilizada para cálculo deste indicador é:

$$\text{TDF} = \frac{\text{Número de desligamentos forçados da função}}{\text{Horas de serviço da função}} \times 8.760 \quad (8)$$

TABELA 6 – TAXA DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS DAS UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS NOS ANOS DE 2014 A 2016

Tipo	Taxa Desligamento Forçado – TDF (deslig./1000horas)								
	Todas as origens			Interna e secundária			Interna		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Hidráulica	5,540	5,940	4,250	3,690	4,022	3,092	0,250	0,172	0,104
Térmica	9,148	8,952	4,606	8,649	8,351	4,368	0,651	0,354	0,110

FONTE: ONS RE 3/0041/2017