

# ESQUEMAS DE *SELF-HEALING* E SEUS GANHOS PARA AS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ANDRADE, Reinaldo Mendes de<sup>1</sup>  
LIMA, José Ailton G. de<sup>2</sup>

## RESUMO

A crescente necessidade de adequação das redes de distribuição de energia elétrica à demanda dos consumidores tem feito com que as concessionárias busquem soluções tecnológicas cada vez mais eficientes para manter a continuidade do fornecimento. Uma dessas soluções é a recomposição automática da rede: *self-healing*. O presente artigo apresenta como objetivo uma estimativa de ganhos no indicador regulatório coletivo de interrupção de energia (DEC) trazidos pela implantação do *self-healing* descentralizado, bem como de redução no montante pago pela distribuidora com compensações aos consumidores devido à violação dos limites individuais de continuidade. A metodologia adotada através do estudo de ocorrência reais em uma cidade baiana em 2022 com o auxílio do sistema supervisor de gerenciamento de energia da concessionária em estudo e do Módulo 8 do PRODIST, destacando o comportamento dos equipamentos automatizados envolvidos, os tempos de operação destes, a capacidade de recomposição do esquema e o nível de atuação do controlador do sistema de tempo real nas ocorrências. A redução do indicado DEC de uma concessionária assim como a economia anual da mesma com compensações pagas aos consumidores tiveram ganhos com a implantação do sistema de *self-healing* tendo menor intervenção humana, minimizando os clientes afetados e reestabelecendo mais rápido possível o fornecimento de energia.

**Palavras-Chave.** Compensação. DEC. Reconfiguração. *Self-healing*.

## 1. INTRODUÇÃO

Inegável que as transformações tecnológicas vêm acontecendo em grande velocidade. O resultado dessa evolução permeia a sociedade nas mais diversas áreas incluindo as de serviços públicos essenciais, como água e energia. No caso das distribuidoras de energia, isso têm se tornado cada vez mais visível através da crescente utilização de relés digitais, que utilizam técnicas de microprocessamento, em substituição aos relés eletromecânicos e estáticos (MAMEDE, 2005). Esses equipamentos possibilitam a utilização de esquemas de recomposição automática nas redes de distribuição.

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

O trabalho de Cavalcante et.al, 2016 define *self-healing* como a capacidade da rede de distribuição de se recompor de forma automática no caso de uma falta permanente, isolando o trecho com defeito e recompondo o fornecimento de energia em outros trechos, no menor tempo possível e com o mínimo de interferência humana. O tempo de recomposição automática da rede varia de alguns segundos a menos de dois minutos, portanto, o *self-healing* ajuda na melhoria da operação da distribuição e, conseqüentemente, do indicador DEC, pois uma interrupção de energia deve ser igual ou superior a três minutos para que seja contabilizada a esse indicador, e na redução do valor total pago em compensações financeiras aos clientes, pois menos clientes serão afetados.

Neste artigo, a ênfase está na implantação da tecnologia *self-healing* descentralizado nos religadores instalados em trechos estratégicos da rede de distribuição, nos ganhos em termos de compensação paga aos clientes individuais e de DEC. A metodologia utilizada envolvem o filtro, no histórico de ocorrências do sistema supervisorio da distribuidora, dos eventos que se relacionam com esquemas de *self-healing* entre abril e maio de 2022, um segundo filtro, das ocorrências com os maiores tempos de desenergização dentre as previamente selecionadas a avaliação da quantidade de consumidores ligados aos trechos em estudo e a análise de cada informação enviada dos equipamentos para o sistema supervisorio da concessionária durante o intervalo de duração da ocorrência.

## 2. INDICADORES DE CONTINUIDADE

A ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - é a autarquia que regula e fiscaliza o setor elétrico visando proporcionar condições favoráveis para que o mercado se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade (ANEEL, 2022). Requisitos mínimos de confiabilidade e disponibilidade da rede elétrica são definidos através de indicadores individuais e coletivos de continuidade no Módulo do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Esses procedimentos são documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas à

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

distribuição de energia e que versam sobre qualidade de energia. Os indicadores individuais são o DIC, o FIC, o DMIC e o DICRI e os coletivos são o DEC e o FEC foco da abordagem deste artigo.

a) *DEC* - A Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) representa o tempo médio, em horas, pelo qual os consumidores de um determinado conjunto ficaram sem energia elétrica em um período.

b) *FEC* - A Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) representa a quantidade média de vezes na qual os consumidores de um determinado conjunto ficaram sem energia elétrica em um período.

Se as concessionárias violarem algum dos limites individuais, uma compensação financeira deverá ser paga para os clientes afetados. No caso de transgressão de limites coletivos, a concessionária pode ser obrigada a apresentar um plano de resultados que contemple a redução desses limites dentro de um prazo estabelecido (ANEEL, 2022), sob pena de multa ou até mesmo perda de concessão.

Através da SRD – Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição – da ANEEL, são estabelecidas regras e procedimentos referentes a, dentre outras atribuições, definição e acompanhamento de indicadores de qualidade do serviço e do produto energia elétrica (ANEEL, 2022). Esses parâmetros são necessários para definir porquê o cliente será ressarcido, como e quando a concessionária irá realizar o ressarcimento.

### **3. COMPENSAÇÕES**

As compensações financeiras pagas ao(s) cliente(s) afetado(s) por interrupções incidem como crédito na fatura de energia dentro de até dois meses após o período de apuração. A partir de 2010, instituiu-se que as distribuidoras passariam a compensar diretamente os consumidores pela interrupção dos serviços que superasse limites individuais pré-estabelecidos. Um dos objetivos da mudança foi auxiliar na melhoria da qualidade da prestação do serviço por parte das

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

concessionárias através da definição de padrões de qualidade mais exigentes (ANEEL, 2022).

Apesar da compensação paga a um cliente individual parecer baixa em termos de valores, o montante mensal, trimestral e anual pago pelas distribuidoras pela ultrapassagem desses limites é consideravelmente alto (ANEEL, 2022). Nota-se na Fig. 1 - a qual refere-se aos valores de compensação pagos em 2021 pela concessionária COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia) - que os valores giram na casa dos milhões de reais.

Índices de Compensação de Continuidade					
Região NORDESTE					
COELBA - 2021					
Compensações	DIC, FIC e DMIC			DICRI	Total
	Mensais	Trimestrais	Anuais	Mensais	
Quantidade das compensações	3.930.561	906.273	466.242	142.446	5.445.522
Valor das compensações (R\$)	42.480.629,74	8.833.606,58	5.654.890,34	1.547.624,35	58.516.751,01

Fig. 1. Compensações pagas pela COELBA.

Os indicadores são passíveis de alterações após fiscalização da ANEEL. Os dados apresentados na figura 1 foram obtidos das bases de dados da ANEEL.

#### 4. AUTOMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO

O termo automação elétrica tem sido usado para designar sistemas digitais que são utilizados para supervisão, comando, controle e proteção dos vários componentes do sistema elétrico. Esses sistemas podem ser classificados, quanto ao processo a que estão relacionados, em: sistemas de supervisão do sistema de potência, de automação de subestações, de automação de usinas e de automação da distribuição (ANTONIO, 1997).

No contexto dos sistemas de automação da distribuição, a funcionalidade típica de um centro de controle evolui constantemente, passando de sistemas de aquisição de dados (SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*) para sistemas com grande número de aplicações computacionais avançadas (EMS- *Energy Management System*). O Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE) destaca-se nesse sentido, pois é um sistema supervisor de arquitetura aberta, ou seja, que se comunica com *hardwares* de diferentes fabricantes, rompendo com o paradigma de soluções centralizadas e proprietárias dos sistemas dos centros de controle

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

(PEREIRA et al, 1995). Esse sistema foi concebido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e possui interfaces homem-máquina intuitivas para facilitar a operação do sistema por meio dos controladores, históricos acessáveis de alarmes de equipamentos, comunicação de dados via protocolos padronizados (DNP 3.0, TCP/IP etc.), dentre outras funcionalidades.

Religadores automáticos são equipamentos de interrupção da corrente elétrica dotados de uma determinada capacidade de repetição em operações de abertura e fechamento de um circuito, durante a ocorrência de um defeito (MAMEDE, 2005). Eles são compostos basicamente pela unidade religadora (a qual fica na rede e é responsável por abrir e fechar os contatos) e pela unidade de controle (a qual contém o relé responsável pelo comando, baterias, disjuntores auxiliares, etc.), como mostrado na Fig.2. Quando esse equipamento percebe uma condição de sobrecorrente, um sinal é enviado pelo sensor (relé) para que as lâminas principais abram seus contatos e, posteriormente, feche, em uma sequência determinada, na tentativa de eliminar faltas transitórias. Os religadores mais modernos possuem relés com interfaces programáveis para funcionamento também em outras condições, como na ausência de tensão ou corrente em um dos lados do circuito (fonte ou carga) que faz com que o equipamento abra ou feche. O tempo entre aberturas e fechamentos (circuito aberto) é denominado tempo de religamento e o tempo necessário para que o equipamento atue por proteção ou ausência de tensão é denominado tempo de atuação.



Fig. 2. Religador automático instalado na rede.

Fonte: COELBA, 2022

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

## 5. REDES INTELIGENTES

A expressão *smart grid* deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico (FALCÃO, 2009). Partindo da necessidade que as concessionárias necessitam fornecer energia com mais qualidade e eficiência e assim gerando menor compensação financeira aos clientes. Em (GHARAVI, 2011) as *smart grids* são definidas como sistemas elétricos que usam informação, tecnologias de comunicação bidirecional ciber-segura e inteligência computacional de forma integrada entre geração, transmissão, distribuição e consumo de eletricidade para alcançar um sistema que seja limpo, seguro, confiável, resiliente, eficiente e sustentável. As redes inteligentes estão em desenvolvimento no Brasil e no mundo e necessitam de justificativa de custos e *pay back* razoável em cada passo antes da implementação, assim como testes e verificações antes da expansão em larga escala (GHARAVI, 2011). Seus recursos vão sendo incorporados às redes tradicionais aos poucos, e uma das características que uma *smart grid* terá é a de reconfiguração automática (*self-healing*).

## 6. SELF-HEALING

Assim como o termo *smart grid*, o *self-healing* também é um conceito - e que está inserido no âmbito holístico das redes inteligentes. De acordo com o DOE (*Department of Energy - USA*), *self-healing* é a capacidade que a rede tem de isolar o problema, minimizar os clientes afetados e restabelecer o mais rápido possível, com a menor intervenção humana, de maneira que a inteligência do sistema defina e execute as decisões. Essa habilidade da rede, que busca obedecer à sequência ANALISAR – ISOLAR – RESTAURAR, está ilustrada na Fig.3 em um esquema simples de reconfiguração automática. No caso de um defeito entre o disjuntor 1 (DJ1) e o religador 1 (RL1), o disjuntor 1 (DJ1) identificará a falta (ANALISAR) e abrirá em definitivo, o religador 1 (RL1) abrirá após tempo definido (ISOLAR) e o religador 3 (RL3) – que faz fronteira ou entre dois alimentadores da mesma subestação, ou entre

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.



equipamento imediatamente abre. Atualmente, tal lógica tem sido substituída por outras mais adequadas à rede - uma vez que essas operações de fechamento em cima do curto-circuito causam desgaste nos cabos (BERRY et al, 2009).

No *self-healing* descentralizado, as lógicas de recomposição automática são alocadas em cada equipamento envolvido, ou seja, eles mesmos executam as ações. Há a comunicação com o SCADA, mas o funcionamento não depende deste ou de qualquer telecomando enviado pelo controlador do sistema. Os próprios equipamentos, com base nas lógicas implementadas, realizam as manobras (abertura e fechamento) e a configuração final da rede é reportada, normalmente, ao SCADA (BERRY et al, 2009). Seu funcionamento é baseado na ausência de tensão do lado fonte ou carga dos equipamentos e na diferença dos tempos de religamento dos equipamentos à montante ou à jusante. As figuras 4, 5 e 6 a seguir ilustram o funcionamento do esquema para uma falta em certo trecho da rede.

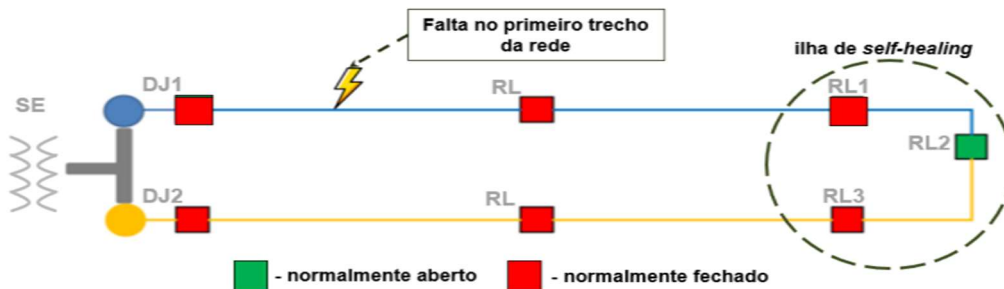


Fig. 4: Diagrama de blocos de um esquema de *self-healing* descentralizado.

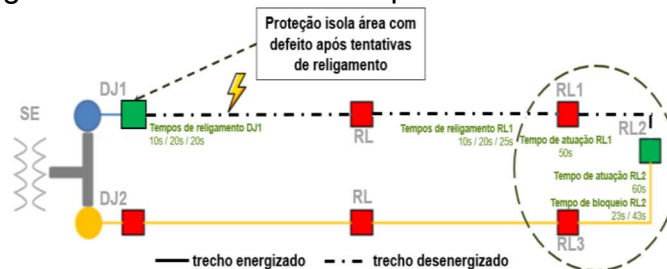


Fig.5: Diagrama de blocos de um esquema de *self-healing* descentralizado.

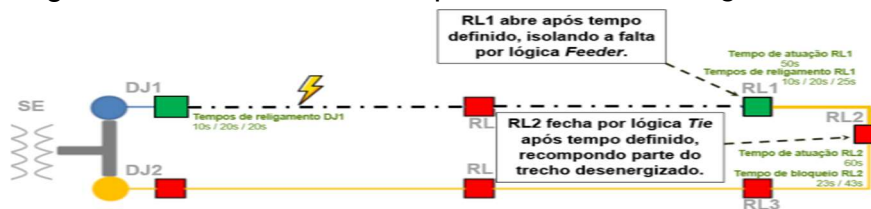


Fig. 6: Diagrama de blocos de um esquema de *self-healing* descentralizado. Fonte: Adaptado de COELBA, 2022.

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.



Os disjuntores de subestação hoje em dia possuem comumente relé de religamento. No exemplo das figuras 7 e 8 frente a uma falta, o equipamento religa a rede na sequência 10-20-20 segundos e abre definitivamente, pois a falta não é temporária. 50 segundos depois da abertura definitiva do DJ1, o religador RL1 abre por lógica *feeder* após sentir ausência de tensão do lado fonte. 10 segundos após a abertura do religador RL1, o religador RL2 fecha por lógica *tie*, totalizando assim 60 segundos desde o bloqueio do disjuntor DJ1. Paralelamente, o tempo de bloqueio do religador RL2 está contando a cada desligamento do sistema – incluindo as tentativas de religamento do disjuntor DJ1. Ele atinge o primeiro ciclo de bloqueio de 23 segundos durante o tempo de atuação do RL1, porém não completa o segundo ciclo, pois  $23+43=66$ , logo, 66 segundos seriam necessários para completar os dois ciclos, mas o tempo de atuação do RL2 é atingido primeiro.

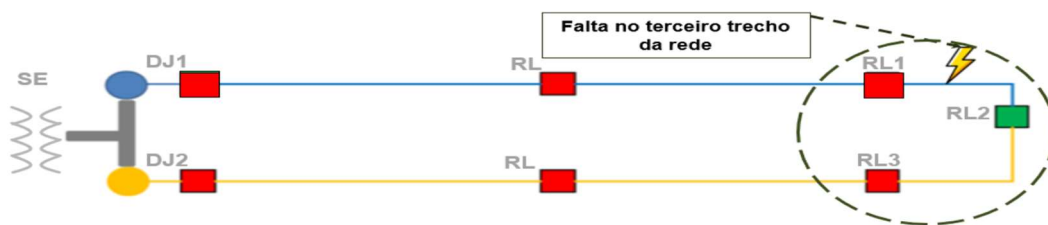


Fig. 7: Diagrama de blocos de um esquema de *self-healing* descentralizado

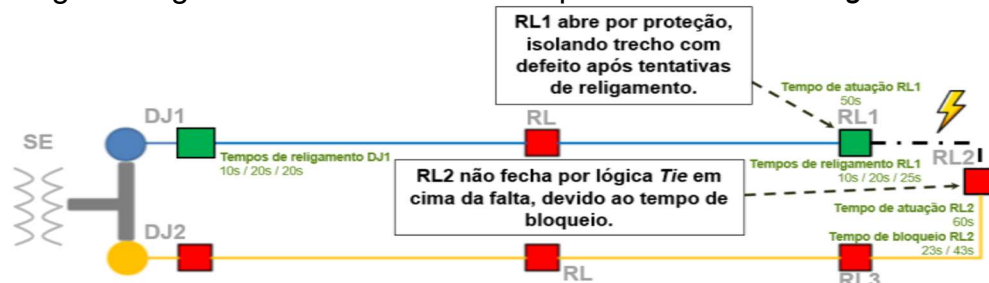


Fig. 8: Diagrama de blocos de um esquema de *self-healing* descentralizado. Fonte: Adaptado de COELBA, 2022.

No exemplo das figuras 7 e 8, uma falta permanente no terceiro trecho da rede faz com que RL1 faça suas tentativas de religamento na sequência 10-20-25 segundos e abra definitivamente. Como o primeiro ciclo de bloqueio do RL2 é de 23 segundos, ele completa antes do terceiro religamento do RL1. 60 segundos depois da abertura definitiva do RL1, RL2 deveria fechar por lógica *tie* – porém o segundo ciclo

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

de bloqueio de 43 segundos é atingido primeiro, impedindo que o religador feche em cima da falta

Seja qual for a topologia do esquema de reconfiguração, todas elas proporcionam redução de custos operacionais gerados pelo deslocamento de turmas, pois o seccionamento de um trecho menor da rede permite que as equipes de prontidão da distribuidora encontrem o ponto de defeito mais rapidamente.

## 7. METODOLOGIA

Pesquisa Empírica ou Prática - Pesquisa de Campo. Analisando os benefícios na implementação do Self Healing descentralizado, através de pesquisa sobre indicadores ANEEL, pesquisa de campo (análise de ocorrência e coleta de dados no relé dos religadores) e análise dos ganhos nos indicadores de qualidade DEC e FEC.

A ocorrência estudada a seguir foi caso real de faltas em alimentadores da distribuidora COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia). Na ocorrência estimou-se a redução do DEC devido à atuação do *self-healing* descentralizado. O diagrama de bloco da figura 9 representa configuração atual de três alimentadores da COELBA - que possuem esquemas de auto recomposição envolvendo 9 religadores e 3 ilhas, identificadas como SH1, SH2 e SH4. Um destes equipamentos está na fronteira entre o alimentador 09X1 da subestação AAA e o alimentador 09N1 da subestação BBB.

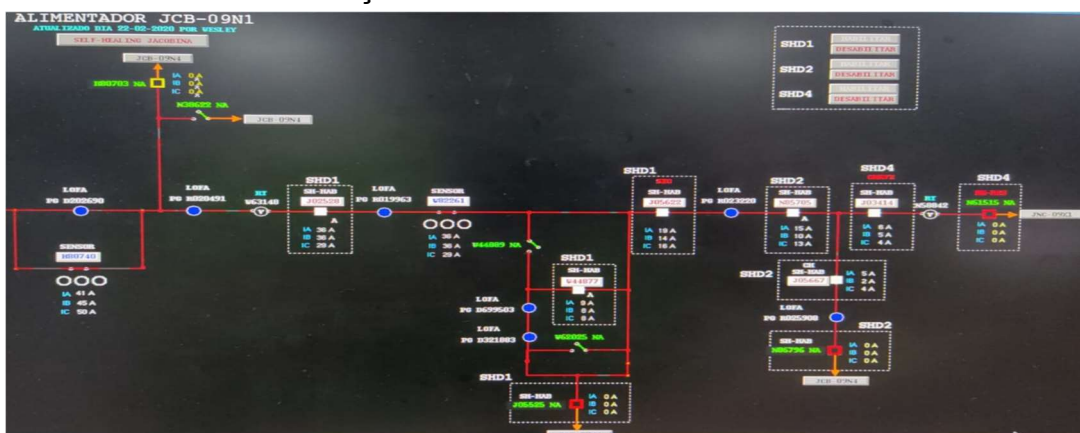


Fig.9: Diagrama de blocos do SAGE. Fonte: Adaptado de COELBA, 2022.

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

No dia 21 de abril de 2022 houve uma ocorrência no alimentador 09N1, o qual possui um esquema de *self-healing* descentralizado. Cada quadrado representa um religador de linha, de subestação ou disjuntor de subestação. Se o equipamento estiver fechado, o quadrado estará preenchido em branco – do contrário, estará apenas contornado na cor vermelha. Tal diagrama, bem como os históricos de ocorrência representados, foram obtidos através do SCADA da COELBA: o SAGE. As subestações e os alimentadores estão localizados na cidade de Jacobina - BA.

Às 11:39, ocorreu uma falta no trecho entre o religador J05667 e o religador NA N86796 (Fig.9). O J05667 e os demais equipamentos à montante foram sensibilizados pela falta. Os alarmes de “disparo de proteção” são enviados do relé para o SAGE quando há sensibilização por sobrecorrente. O alarme de “ultrapassagem” é do próprio SAGE e surge quando há uma corrente acima do especificado manualmente pelo operador na interface homem-máquina. Nota-se, na linha 2 da Tabela 1, que havia uma sobrecorrente oriunda da falta passando pelo equipamento N85705.

TABELA I					
HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS. ADAPTADO DE [23].					
Data	Horário	Equip.	Alarme	Descrição	Estado
26/04/2022	11:39:26	J05622	RPRAE	Disparo de Proteção Fase A	ALARME
26/04/2022	11:39:27	N85705	IA-E	Corrente Fase A	Ultrapassou urgência superior(121.50)
26/04/2022	11:39:29	J05667	RPRAE	Disparo de Proteção Neutro	ALARME
26/04/2022	11:39:29	J05667	RPRAE	Disparo de Proteção Fase A	ALARME

Tabela 1:Fonte: Adaptado de COELBA, 2022.

O religador J05667 atuou por proteção, iniciando seu ciclo de religamento. A tentativa de eliminar a falta não foi bem sucedida. O equipamento deveria realizar 3 religamentos e 4 aberturas, sendo a última uma operação de lockout (bloqueio, ou abertura definitiva), na sequência 10-20-20 segundos (assim como estava parametrizada sua ordem de graduação). Porém isso não aconteceu, pois o controlador do sistema antecipou a ação de tentativa de reconfiguração do alimentador.

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

Às 11:40:00, o controlador desativou as lógicas de reconfiguração automática e abriu o religador J05622, desenergizando todo o trecho a jusante. Como os equipamentos N85705 e J03414 possuem lógica *feeder*, eles abrem seus contatos por ausência de tensão após 50 segundos. A abertura do J05622 foi o motivo pelo qual o equipamento J05667 interrompeu seu ciclo de religamento, pois ficou sem alimentação dos dois lados, o que fez com que a lógica configurada no relé do religador desativasse a contagem. O circuito após essa lógica configurada no relé do religador desativasse a contagem.

A abertura do J05622 fez com que o religador NA N61515, que possui sensores de tensão tanto do lado da fonte quanto do lado da carga, percebesse ausência de tensão do lado da carga e iniciasse a contagem do seu tempo de atuação, fechando por lógica *tie* 60 segundos depois.

Analogamente, o religador NA N86796 fechou por lógica *tie* 60 segundos depois da abertura do J05622 na tentativa de recompor o trecho defeituoso. Porém, como a falta ainda permanecia, ele abriu seus contatos novamente por proteção de *single-shot*, para que o equipamento não permanecesse fechado e realimentando o curto-circuito, como é possível observar através do estado “FECHADO/ABERTO”. A configuração final após a atuação dos equipamentos está ilustrada na Fig 10.

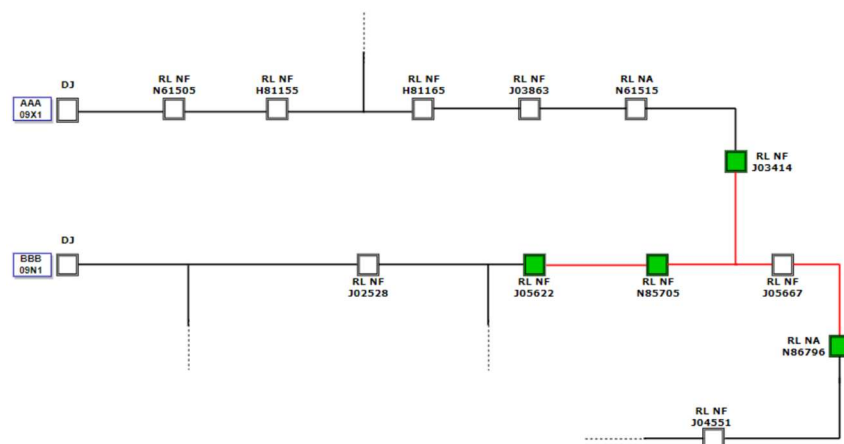


Fig. 10: Diagrama de blocos simplificado. Fonte: Adaptado de COELBA, 2022.

Trata-se de uma ocorrência incomum, pois iniciou-se na ilha 2 e deveria se limitar a ela. Porém, a atuação do operador do sistema fez com que outra ilha (ilha 4)

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

interpretasse a manobra de abertura do J05622 como uma atuação do *self-healing* e iniciasse seu processo de recomposição. Portanto, o esquema da ilha 4 se comportou conforme o esperado, isolando o trecho que ele entendeu que estava em falta, recompondo o trecho não afetado e salvando parte dos clientes. Nota-se, no entanto, principalmente na Fig. 10, que um trecho muito menor do sistema poderia ter sido desenergizado.

De acordo com o PRODIST, o conjunto referente à subestação BBB possui 106098 consumidores. Nesta ocorrência, 1427 consumidores foram afetados. Seja a fórmula do DEC e considere que o tempo de interrupção de energia foi igual para todo o trecho desenergizado. Caso não houvesse um esquema de *self-healing* no trecho entre o J05622 e o N61515, o DEC da ocorrência seria de:

$$DEC=1427 \times 5,8667106098=0,0789 \text{ h}$$

o que equivale a, aproximadamente, 4,73 minutos.

O esquema de reconfiguração automática considerado consegue salvar um trecho com 684 consumidores. Com o esquema de *self-healing* implantado, o DEC da ocorrência foi de:

$$DEC=(1427-684) \times 5,8667106098=0,0395 \text{ h}$$

o que equivale a, aproximadamente, 2,37 minutos.

Nota-se, portanto, que o esquema de *self-healing* implantado reduziu o DEC da ocorrência em cerca de 49,89 %, um ganho considerável, levando em conta a quantidade de clientes envolvida, a quantidade de faltas que ocorrem mensalmente na rede de distribuição e que o DEC anual da maioria das concessionárias do Brasil ainda se encontra na casa das horas e próximo do limite estipulado pela ANEEL.

## 8. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DA OCORRÊNCIA

Na ocorrência, se houvesse falha de comunicação entre os equipamentos e o SCADA, o operador do sistema não conseguiria enviar comando remoto e era

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

esperado que o *self-healing* desenergizasse apenas o trecho entre o religador J05667 e o NA N86796, com 252 consumidores.

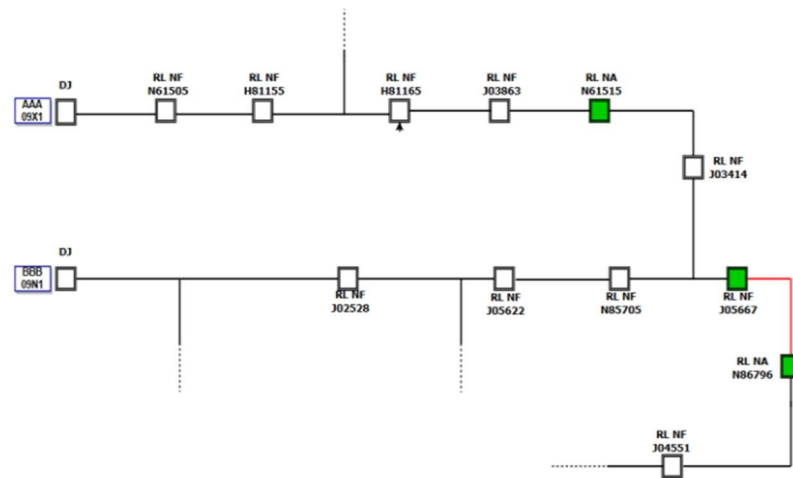


Fig. 11. Diagrama de blocos simplificado. Fonte: Adaptado de COELBA, 2022.

O DEC da ocorrência seria ainda menor (0,83 minutos), o que resultaria em um ganho de 82,38 %.

$$DEC = (1427 - 1175) \times 5,8667106098 = 0,0139 \text{ h}$$

Isso evidencia que as manobras automáticas dos esquemas de *self-healing* tendem a diminuir falha humana na operação da rede de distribuição e que, em caso de falha de comunicação, o *self-healing* descentralizado vai atuar. Nota-se, portanto, que a manobra programada no próprio equipamento é uma das grandes vantagens do *self-healing* descentralizado e que o ganho de DEC e a melhoria no desempenho da operação da rede são consequências disso.

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

Se o defeito estivesse entre o religador N61505 e o H81155 da ilha 4, o esquema fosse centralizado e a comunicação entre o SCADA e o servidor concentrador das lógicas de *self-healing* falhasse, não haveria recomposição automática, mas o operador do sistema conseguiria telecomandar os equipamentos. Mas se não houvesse nenhum esquema de *self-healing* no trecho, o DEC da ocorrência seria muito alto, pois não haveria recomposição automática nem telecomandada. Seria necessário o deslocamento de uma equipe de prontidão ao local da ocorrência para efetuar a recomposição manual da rede. O montante em compensação envolvido em uma única ocorrência pode parecer pouco, mas, considerando que a COELBA paga milhões de reais anuais em termos de compensação (Fig. 1), observa-se que os esquemas de recomposição automática possuem grande capacidade de reduzir esse valor e, portanto, diminuir as despesas anuais de uma concessionária de energia.

Índices de Continuidade					
COELBA - Ano (2017 a 2021)					
ANO	2017	2018	2019	2020	2021
DEC APURADO	19,83	14,45	12,18	12,44	11,44
DEC LIMITE	15,08	14,54	14,53	14,17	13,75
FEC APURADO	8,23	6,43	5,90	5,54	5,18
FEC LIMITE	8,88	8,43	8,33	7,88	7,57
Nº DE CONSUMIDORES	5.627.687	5.693.531	5.791.952	5.935.594	6.036.96

Tabela 2. Fonte ANNEL

ANO	Quantidade das compensações	Valor das compensações (R\$)
<b>2020</b>	<b>6.258.133</b>	<b>60.637.307</b>
<b>2021</b>	<b>5.445.522</b>	<b>58.516.751</b>
<b>2022</b>	<b>467.052</b>	<b>22.833.599</b>

Tabela 3. Fonte ANEEL

No ano de 2018 quando se iniciou a implantação do *self-healing* na COELBA foi percebido conforme tabela 1 que houve uma redução de 42% nos indicadores de continuidade DEC e FEC comparando ano de 2017 a 2021. Porém a redução na quantidade de compensações e valor pago só iniciou a partir de 2021, com redução tímida de 3% relacionado anos de 2020 a 2021 e uma projeção de 21% de redução para 2021 a 2022 (As informações para o ano corrente são do 1º semestre).

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A redução no indicador DEC de uma concessionária, assim como a economia anual da mesma com compensações pagas aos consumidores, se torna, portanto, mais notória à medida que a quantidade e a qualidade dos esquemas de *self-healing*

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.

instalados na rede aumenta. Isso se verifica porque o indicador de continuidade global de uma distribuidora é apurado a partir do agrupamento de todos os conjuntos de unidades consumidoras de sua área de concessão e, assim sendo, depende de cada trecho onde é possível encontrar esquemas de auto recomposição.

Nota-se que a inserção de mais equipamentos em série em uma mesma ilha de *self-healing* de fato permite um seccionamento e conseqüente desenergização de um trecho menor da rede, minimizando os clientes afetados.

Apesar do foco deste artigo ser na topologia de *self-healing* descentralizada, a centralizada e a semi-centralizada também são amplamente utilizadas. Uma análise técnico-econômica é feita para definir qual solução se aplica melhor a cada trecho da rede. Para uma aplicação que necessite de um esquema muito amplo, com vários equipamentos envolvidos e distantes uns dos outros, pode ser que a filosofia descentralizada não se encaixe bem devido à complexidade de implementação, pois seria necessária a configuração de cada equipamento individualmente. Por outro lado, se for indispensável uma estrutura de telecomunicações robusta e o esquema for menor, a topologia centralizada talvez seja a escolhida, devido ao fato de o servidor concentrador estar localizado na sede da distribuidora – facilitando o acesso, a configuração e melhorando a conexão com o SCADA.

A partir do interesse pelo *self-healing* e seus benefícios, é notório a redução dos custos financeiros e do tempo gasto com deslocamento de equipes de prontidão das distribuidoras aos locais de defeito e sobre a redução no valor pago em compensações financeiras aos clientes em um período (mensal, trimestral ou anual).

## **AGRADECIMENTOS**

O autor agradece ao professores José Airton Lima e Samuel Polato Ribas por suas contribuições para a elaboração deste trabalho, bem como aos engenheiros(as), Alisson Santos do Amor Divino, Rodrigo de Oliveira Carvalho, pelo apoio ao desenvolvimento do mesmo e a minha esposa Elane Machado Santana por me incentivar a todo momento durante o curso.

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.



## REFERÊNCIAS

MAMEDE, F, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**, 3ª edição, Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005, pp. 279.

CAVALCANTE, P. L. CAMILO, L. J. FRANCO, F. J. RIDER, M, J. GARCIA, V. MALVEIRA, R. R. M. MARTINS, L, L. DIREITO, M, L, C. (2016). **Centralized Self-Healing Scheme for Electrical Distribution Systems**, IEEE.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **A Missão, a Visão e os Valores da ANEEL**. [Online]. Disponível em:< <https://aneel.gov.br/missao-e-visao> >. Acesso em: 10 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Indicadores Coletivos de Continuidade**. [Online]. Disponível em:< <https://aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade> >. Acesso em: 16 abr. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **SRD – Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição**. [Online Disponível em:< <https://aneel.gov.br/srd> >. Acesso em: 17 mai. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Compensação pela Transgressão dos Limites de Continuidade**. [Online]. Disponível em:<<https://aneel.gov.br/pt/indicadores-de-compensacao-de-continuidade> >. Acesso em: 18 mai. 2022.

ANTONIO, J, J. **Sistemas Elétricos de Potência: Automação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, 1997, pp. 3 -30.

PEREIRA, A, C, L. LIMA, C, L. SILVA, J, R, S, A. et al., (1995). **SAGE – Um Sistema Aberto para a Evolução**, Eletroevolução – Cigré, vol. 1, pp. 1, 1996.

MAMEDE, F, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**, 3ª edição, Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005, pp. 702.

FALCÃO, M, D. (2009). **Smart Grids e Microrredes: O Futuro já é Presente**, Anais do VIII SIMPASE, pp. 3. agosto 2009.

GHARAVI, H, G, R. **Smart Grid: The Electric Energy System of the Future**, *Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng.*, vol. 99, no. 6, pp. 918, jun. 2011.

COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA (COELBA).

SISTEMA ABERTO DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA (SAGE).

<sup>1</sup> Reinaldo Mendes de Andrade, Centro Universitário UNINTER, Bacharelado em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Especialista em Inovações no Ensino de Matemática, Especialista em Engenharia de Produção, Licenciatura Plena em Matemática, Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER, Professor na rede pública de ensino, Professor corretor de provas discursivas EAD no Centro Universitário UNINTER.