



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS  
CURSO**

[Taynara Mendes Cruz Teodoro](#)  
22001111

**Smart Grid: a aplicação de Self Healing descentralizado na rede de  
distribuição**

BRASÍLIA-DF  
2023



[Taynara Mendes Cruz Teodoro](#)

## **Smart Grid: a aplicação de Self Healing descentralizado na rede de distribuição**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília

Orientador (a): **Luciano Henrique Duque**

BRASÍLIA  
2023



[Taynara Mendes Cruz Teodoro](#)

## **Smart Grid: a aplicação de Self Healing descentralizado na rede de distribuição**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília

Orientador (a): **Luciano Henrique Duque**

Brasília, 2023.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Nome e titulação.  
Orientador (a)

---

Nome e titulação.  
Examinador (a)

---

Nome e titulação.  
Examinador (a)



## Smart Grid: a aplicação de Self Healing descentralizado na rede de distribuição

Smart Grid: the application of decentralized Self Healing in the distribution network

[Taynara Mendes Cruz Teodoro](#)<sup>1</sup>, Luciano Henrique Duque<sup>2</sup>

### Resumo

Com crescente demanda por eletricidade é necessário que o sistema elétrico de potência passe por mudanças e aperfeiçoamento para garantir a qualidade de energia elétrica por meio da confiabilidade e continuidade. O SHD (Self Healing descentralizado) é um conceito de Smart Grid que opera sem a intervenção humana minimizando os impactos causados por desligamentos nas redes de 13,8 kV, restabelecendo de maneira automática a maior quantidade de clientes no menor tempo possível. Dessa forma o defeito que causou o impacto do desligamento fica isolado e a disposição da equipe realizar a manutenção corretiva. Índices como o DEC e FEC são monitorados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) são diretamente afetados quando há instalação de sistemas SHD na rede elétrica. Contribuindo para menor tempo de interrupção o DEC e o FEC apresentam melhor desempenho.

Esse trabalho consiste em mostrar as vantagens do sistema de Self Healing descentralizado aplicados ao sistema de rede de distribuição e os impactos nos indicadores monitorados pela distribuidora, por meio de comparações com redes de distribuição que não possuem esse sistema.

**Palavras-chave:** SHD, FEC, DEC, ANEEL, Smart Grid, distribuição, energia

### Abstract:

With increasing demand for electricity, it is necessary for the power system to undergo changes and improvements to ensure the quality of electrical energy through reliability and continuity. The SHD (Self-Healing Decentralized) is a Smart Grid concept that operates without human intervention, minimizing the impacts caused by shutdowns in 13.8 kV networks, automatically restoring the largest number of customers in the shortest possible time. Thus, the defect that caused the impact of the shutdown is isolated and available for the team to perform corrective maintenance. Indices such as DEC and FEC are monitored by ANEEL (National Electric Energy Agency) and are directly affected when SHD systems are installed in the electrical network. Contributing to shorter interruption times, DEC and FEC perform better.

---

<sup>1</sup> UniCEUB, Luciano Henrique Duque

<sup>2</sup> UniCEUB, Luciano Henrique Duque



This work aims to show the advantages of the decentralized Self-Healing system applied to the distribution network system and its impacts on the indicators monitored by the distributor, through comparisons with distribution networks that do not have this system.

**keywords:**

SHD, FEC, DEC, ANEEL, Smart Grid, distribution, energy

## 1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é de suma importância para o desenvolvimento da sociedade moderna. Sem esse recurso não conseguiríamos realizar nossas atividades do cotidiano, como ligar a TV até mesmo o funcionamento de máquinas industriais. (FALCÃO, 2009)

Geração, transmissão e distribuição são as três subdivisões do sistema elétrico. A energia que é gerada centralizada em um ponto do país, quando transmitida pelo sistema de energia, poderá ser consumida em qualquer ponto. Isso acontece graças ao Sistema Interligado Nacional (SIN). (Goinsk, Sobierai, Pereira, 2019). Uma questão muito importante a ser levantada pelo nosso sistema de energia tanto nacional como global é que diferentemente de outros sistemas, como sistema de gás onde é possível armazenar a matéria para ser consumida posteriormente, na indústria da energia ainda não é possível. O montante gerado nas geradoras centralizadas, deve ser instantaneamente consumida. Caso contrário o sistema pode sofrer oscilações bruscas e desencadear uma série de desligamentos de linhas de

transmissão e unidades geradoras de energia. (ABRADEE, 2021)

Desde a geração de energia elétrica até o consumidor final, há um processo de hierarquia que passa por longas linhas de transmissão em diferentes setores de tensão, e chega para o consumo final pelas várias distribuidoras de energia que operam no Brasil. (TOLEDO, 2012)

O Sistema elétrico de potência passa por várias mudanças constantemente em busca de aperfeiçoamento, no modo em que gera, transmite e distribui para manter a continuidade e qualidade de energia. A Smart Grid tem a função de garantir o fornecimento contínuo e a confiabilidade e por meio de sistemas automatizados, como Self Healing descentralizado (SHD). O sistema opera para minimizar o tempo de interrupção de energia elétrica sem a necessidade de intervenção humana, realizando a mudança na topologia da rede elétrica quando a fonte principal falha, isolando o defeito. (FALCÃO, 2009)

Esse auto restabelecimento (Self Healing) contribui para os indicadores de DEC e FEC. Esses índices são monitorados e definidos pela ANEEL



(Agência Nacional de Energia Elétrica) e são especificados no PRODIST 8. Esses indicadores são um modo da ANEEL, distribuidoras e consumidores avaliarem a qualidade do serviço de energia prestado, mapeando a frequência e tempo que a energia ficou interrompida. Quanto menor o índice, melhor a qualidade do serviço prestado. Para isso, a busca por mecanismos que automatizam os sistemas de distribuição no Brasil tem se tornado cada vez mais visível nos últimos anos, devido ao crescimento de carga, seja residencial, comercial ou industrial, à complexidade do sistema e a necessidade por parte das distribuidoras em manter os índices de qualidade do serviço prestado. De acordo com FALCÃO, 2009 é no sistema de distribuição onde há mais investimentos para desenvolvimento da tecnologia Smart Grid.

A qualidade da energia transmitida ou distribuída pode ser afetada por vários fatores: oscilação de tensão, chaveamentos na rede, harmônicos e desbalanceamento entre fases (RIBEIRO, FERREIRA, MEDEIROS, 2005). Manter a qualidade da energia no sistema de energia distribuído é um desafio a ser seguido e cumprido pelas distribuidoras brasileiras e requer investimentos e inovações tecnológicas específicas das áreas de automação e controle, medição inteligente e conexão das fontes de energia alternativas descentralizadas, (FALCÃO, 2009).

### 1.1 *Smart Grid: conceito e motivação*

Há séculos a eletricidade tem sido um fator importante para determinar o desempenho social e

econômico da sociedade mundial. Desde os primórdios a humanidade utiliza a eletricidade para desenvolver e praticar diversas atividades. Antes da distribuição de energia elétrica, a gestão da iluminação pública era feita manualmente. O que hoje seriam os operadores de IPES (iluminação pública), anteriormente precisavam acender manualmente as lamparinas a gás ou a óleo todas as noites. (TOLEDO, 2012) -

O desenvolvimento tecnológico caminhou mais para algumas áreas do que para as áreas do setor elétrico. De acordo do Falcão (2009) mesmo que seja visível o bom desempenho na produção, transmissão e distribuição, muitas tecnologias e técnicas disponíveis e acessíveis economicamente não foram englobadas pelo setor elétrico.

A necessidade de implantação de tecnologias no setor elétrico fez com o termo *Smart Grid* fosse cada vez mais reconhecido como uma opção de melhorar a eficiência energética. (LI e ZHOU, 2011).

A Smart Grid, tradução livre, redes inteligentes, é o termo usado para definir diversas tecnologias empregadas no setor de eletricidade. Para alguns pesquisadores a definição se trata de automação na rede ou medições inteligentes, comunicação em tempo real e serviços em atendimento aos clientes. O fato é que tal tecnologia veio com o intuito de diminuir o tempo de interrupção de energia do cliente, reduzir perdas no sistema e melhorar o desempenho do sistema de proteção e a perspectiva

financeira e ambiental. (TOLEDO, 2012).

Esse recurso irá emoldurar o setor da eletricidade para uma nova era, não apenas no Brasil, mas também universalmente. Geração, transmissão de energia e distribuição serão impactadas positivamente, sendo perceptível o avanço e o aumento na qualidade de energia entregue, monitoramento e gestão da rede, incentivo ao uso de fontes alternativas de energia como usinas solares e eólicas. (CHAGAS et al, 2020).

### 1.2 Self Healing

Dentre as diversas tecnologias que surgiram na Smart Grid, para otimizar a operação, o *Self Healing Descentralizado* (SHD), objeto de revisão deste trabalho, é uma das tecnologias essenciais. Permite a detecção de falhas no sistema elétrico e age rápido na recomposição das cargas interrompidas (SEPA, 2017).

O tópico sobre reconfiguração da rede elétrica de distribuição já vem sendo discutido há algum tempo pelas concessionárias e como sua aplicação vem sendo necessária. Algumas empresas do setor elétrico desenvolveram sistemas de auto restabelecimento de energia, porém essas tecnologias são restritas a áreas isoladas, pequenas e normalmente envolvem somente um único fabricante. (HOKAMA, HELEBRANDO, 2016)

Para implementação do SHD é necessário disponibilizar de recursos extras e tecnologias específicas como equipamentos de comunicação,

sensores e relés de proteção interagindo entre si. Olhando também para um cenário futuro e para a grande necessidade de aumento da rede motivada pelo crescente aumento de carga, esses equipamentos (SHD) e chaves seccionadoras devem ser instalados em pontos estratégicos da rede de distribuição. (CARNEIRO, 2022).

O esquema Self-healing é utilizado para transferências automática de cargas, em caso de falhas no sistema causadas por defeitos que podem se originar de descargas atmosféricas, cabos rompidos, objetos na rede e demais outros eventos. Ou pode ser usado para seccionamento do circuito quando é necessário manutenções preventivas ou corretivas na rede elétrica, isolando a área em que haverá a intervenção. A utilização dessa tecnologia permite que as intervenções possam ser realizadas sem a necessidade de interrupção de carga. O fluxo de corrente que passa pelo caminho da subestação até chegar no cliente é comutado e passa por outra topologia da rede. (NORTHCOTE-GREEN, WILSON, 2007)

Se o defeito ocorrido no circuito for de natureza transitória, após alguns testes realizados pelo SHD, o fornecimento de energia é restabelecido pelo próprio religador e nenhuma outra manobra é necessária. Caso o defeito seja permanente o religador e os equipamentos compostos na rede irão atuar de forma que o fornecimento de energia continue fluindo por outro caminho, sendo por

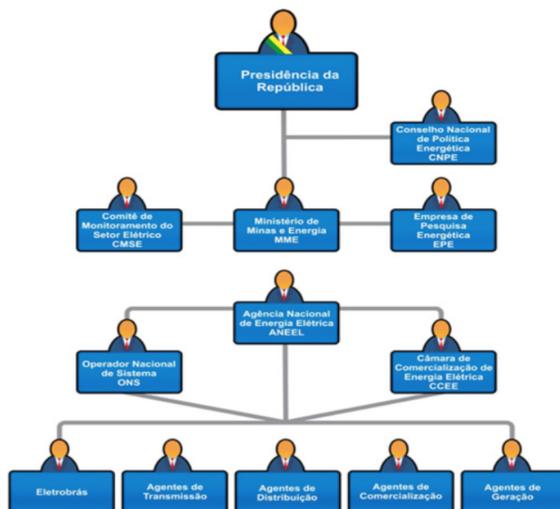
um alimentador vizinho ou até mesmo de outra subestação, onde não haja defeito. (HOKAMA, HELEBRANDO, 2016).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O Setor Elétrico brasileiro.

Com intuito de regulação do setor elétrico brasileiro, foram criadas instituições de caráter público e privado para manter o equilíbrio econômico, investimento no setor e reduzir os riscos de falta de energia. (ABRADEE, 2021)

A seguir o modelo da estrutura de funcionamento do setor elétrico nacional iniciado em 2004 até os dias atuais



Fonte: ABRADEE

MME – Ministério de Minas de energia: Responsável pelas políticas energéticas do País. Sua função principal como órgão do governo é a formulação e implementação de

políticas no setor energético. (MME, 2018)

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética: uma das atribuições desse órgão é a formulação de políticas e diretrizes de energia que assegurem o suprimento de insumos energéticos para todo o país.(MME, 2018)

CMSE- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico: é composto pela Aneel, EPE, CCEE, NOS, MME e ANP. Sua coordenação é realizada diretamente com o Ministério de Minas e Energia e tem a função de assegurar que a energia gerada e transmitida possua padrões de qualidade e continuidade. (MME, 2018)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica: tem a função de regulação e de fiscalizar a geração de energia elétrica provinda de qualquer fonte, bem como a transmissão e a distribuição, a comercialização da energia elétrica. (MME, 2018)

EPE - Empresa de pesquisa Energética: sua função consiste em realizar estudos e pesquisas destinadas a planejamento e expansão do setor elétrico em todo território nacional. (MME, 2018)

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico: o operador, supervisiona, opera e controla a geração de energia elétrica, e a rede básica de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN). (ONS, 2017)



CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica: criada em 1999, faz parte da integração do setor elétrico como ponte e mediadora entre geradores de energia, empresas distribuidoras, comercializadoras e consumidores. Está presente em todas as etapas da comercialização da energia para que seja efetivada com sucesso. (EPE, 2022)

## *2.2 Qualidade no fornecimento de energia elétrica*

O fornecimento de energia contínua e ininterrupta representa melhoria na qualidade de vida da população. Desde o primeiro instante da instalação e utilização dos sistemas de distribuição de energia elétrica, começa-se a notar diversos benefícios em relação ao conforto e as possibilidades de emprego e produtividade. Conforme a comunidade se torna mais dependente desse recurso essencial, percebe-se uma cobrança maior em relação a qualidade do serviço prestado, levando em consideração não somente a disponibilidade contínua desse produto, como também qualidade da energia que chega até as residências e comércios, que diversas vezes não é tão perceptível quanto aos instantes em que a energia é interrompida. (Mehl, 2012)

O módulo 8 do PRODIST, que é o foco deste trabalho, trata da qualidade da energia elétrica e aborda a qualidade do serviço e produto, define terminologia e indicadores bem como seus limites e valores, a

metodologia de apuração utilizada e a gestão de reclamações relacionada ao cumprimento de tensão em regime permanente e distúrbios. (ANEEL, 2017)

A rede de distribuição de energia elétrica quando aérea está exposta a intervenções de várias naturezas podendo ocasionar a interrupção do fornecimento a vários clientes. A falta de energia pode ser causada por acidentes automobilísticos, fenômenos naturais, queda de árvores, objetos na rede e atos de vandalismo. (ANEEL, 2015)

Essas interferências e faltas de energia não afetam somente ao consumidor final, mas também gera impactos negativos na economia, uma vez que a falta de energia causa prejuízos diretamente ao comércio local.

Desde a época das privatizações e da criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as empresas de distribuição têm enfrentado o desafio constante de melhorar a qualidade do serviço prestado conforme as expectativas cada vez mais exigentes dos consumidores, por meio dos índices de continuidade e qualidade de fornecimento de energia. (HOKAMA, HELEBRANDO, 2010)

Para Dieckmann e Pomilio, a qualidade de energia elétrica é definida pela forma de como esse produto é entregue ao consumidor e como ele pode ser usado. Essa definição abrange características de continuidade, disponibilidade, e de conformidade com alguns parâmetros



que são considerados para uma operação segura. Considera-se entre os parâmetros:

- Transitórios
- Flutuação de tensão
- Desequilíbrio de fases
- Variações de tensão de curta duração
- Distorções

O montante gerado nas grandes e pequenas usinas centralizadas, é instantaneamente consumido, e isso exige que o sistema se disponha de meios para transmitir e distribuir a energia elétrica com segurança e qualidade. Caso contrário o sistema pode sofrer oscilações bruscas e desencadear uma série de desligamentos de linhas de transmissão e unidades geradoras de energia. (ABRADEE, 2021)

Quando há manobras programadas na rede de distribuição para manutenção corretiva ou preventiva, se avisado previamente à população que será afetada pela interrupção de energia, não deve ser considerado na apuração dos indicadores. Reclamações em relação a níveis de tensão, atividades que atendem a iluminação pública e serviços comerciais, como religação, troca de medidores e desconexão, também não devem ser contabilizados nesses indicadores. (ANEEL, 2010)

O controle da qualidade de energia elétrica no Brasil é realizado pelas concessionárias por meio de indicadores de qualidade estabelecidos e fiscalizados pela ANEEL que tratam sobre a quantidade de vezes em que a energia foi interrompida e também por

quanto tempo, medido em horas, a energia ficou interrompida, sendo que o principal objetivo das concessionárias é que esses índices sejam os menores possíveis, ou seja, que o consumidor fique o menor tempo possível sem energia. Esses índices são indicadores coletivos de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). A partir do gerenciamento desses indicadores é que as distribuidoras buscam alternativas para melhorias no serviço e produto entregue. (ANEEL, 2018)

### *2.3 Indicadores de continuidade*

Por causa da última reestruturação do setor elétrico, há uma grande expectativa em concordância com a qualidade de energia elétrica (QEE) de se reconhecer o mercado consumidor, em que o produto consumido é a energia elétrica. Em um cenário onde a energia elétrica atingiu o status de bem comum e essencial para o funcionamento e prática das atividades cotidianas, é evidente que o cliente exija um produto mais seguro e atenda a alguns parâmetros de qualidade e confiabilidade. Nesse cenário, a ANEEL e o próprio consumidor, sendo pequenos ou grandes clientes, requerem que os centros de operação do sistema elétrico repassem dados e informações a respeito de eventos no sistema elétrico, onde ocasionam interrupções no fornecimento de energia, e até mesmo distúrbios que



possam ter ocasionado alguma variação de tensão, por exemplo. Esse é um dos desempenhos da coordenação e controle da qualidade de energia elétrica. (Deckmann e Pomilio, 2018)

A primeira vez em foram instituídos os indicadores coletivos de continuidade de energia elétrica, foi em 1978, antes mesmo da criação da ANEEL, em 1996. O DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) anteriormente eram índices controlados pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, Portaria nº 046/78, de 17 de abril de 1978. A partir do ano 2000 a ANEEL apresentou a Resolução N° 024, uma revisão da portaria consolidada anteriormente, que defendia atualização e consolidação dos parâmetros de continuidade e qualidade da distribuição de energia elétrica propostos pela DNAEE em 1978. Desde então é competência da ANEEL regular e verificar as condições e evolução do serviço prestado e zelar pela qualidade de energia que é entregue ao consumidor. (2021)

A qualidade do serviço prestado no sistema elétrico, é avaliada e controlada por procedimentos baseados e definidos pelo PRODIST. Este módulo define os procedimentos para os indicadores de continuidade, tempo de atendimento e monitoramento automático da qualidade da energia elétrica distribuída, por meio dos cálculos dos indicadores individuais e coletivos,

divulgação desses indicadores, controle das interrupções de energia. (Prodinst, Módulo 8, 2012)

### 2.3.1 Indicadores de continuidade individuais

*Duração de interrupção por unidade consumidora (DIC)* - Este é o indicador de continuidade que demonstra quanto tempo uma única unidade consumidora ou ponto de conexão ficou sem energia elétrica. O tempo é expresso em horas e centésimos de horas.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i)$$

Onde:

$i$  = índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a  $n$ ;

$t(i)$  = tempo de duração da interrupção ( $i$ ) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão;

$n$  = número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração.

*Frequência de interrupção individual (FIC)* - Este indicador de continuidade demonstra a periodicidade que uma única unidade consumidora ou ponto de conexão ficou sem energia. Esse valor é expresso em número de interrupção.

$$FIC = n$$

### 2.3.2 Indicador de continuidade coletivos

*Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor (DEC)* - Este indicador de continuidade demonstra por quanto tempo uma ou mais unidades consumidoras ficaram interrompidas dentro de um certo conjunto elétrico por um determinado tempo. O tempo de interrupção de energia é expresso em horas e centésimos de horas.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c}$$

*Frequência Equivalente de Interrupção por unidade consumidora (FEC)* - Este indicador de continuidade indica qual a frequência ou quantidade de vezes que o consumidor teve o fornecimento de energia elétrica interrompido.

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c}$$

Nas apurações dos indicadores de continuidade individuais DIC e FIC, não são contabilizadas interrupções em que o tempo for inferior a 3 (três) minutos, tempo necessário para religamento manual de linhas de transmissão, que estejam com o religamento automático desabilitado. E interrupções que ocorram em tempo inferior a três minutos serão contabilizados como um único evento. (Prodist - Módulo 8)

Já a parte de compensação financeira dos clientes, caso as concessionárias não consigam manter as interrupções de energia elétrica dentro dos parâmetros dos indicadores individuais, elas deverão reembolsar financeiramente os clientes afetados. Se os limites dos fatores coletivos forem extrapolados, a concessionária responsável é direcionada à agência reguladora a apresentar um plano de contingência com a finalidade de redução desses limites, além de ser multada por não cumprimento dos indicadores, podendo perder a concessão. (ANDRADE e LIMA, 2022)

### 2.4 Self-Healing Descentralizado

Com tradução livre, o termo Self Healing, pode ser entendido como auto recuperação ou auto restabelecimento, pois age de forma autônoma. Trata-se de processo que compõe o termo Smart Grid, uma vez que essa ideia se enquadra no conceito de rede inteligente. (ROCATELI, MULLER, 2020)

Após um desligamento automático de um alimentador de alguma certa subestação, conseqüentemente interrupção de carga, é realizada uma reconfiguração automática na topologia da rede elétrica, realizando todas as manobras necessárias para recompor total ou parcialmente dos clientes interrompidos, e principalmente, a isolamento do local da falha. Essas manobras são realizadas da maneira mais rápida e segura possível, sem



qualquer interferência humana.  
(MACHADO, 2016)

Esse modelo de controle que possibilita o restabelecimento e identificação do local onde possa ter ocorrido a falha de forma mais hábil, permite que o operador tenha um papel mais voltado para supervisionar, interferindo menos possível, e de ter a oportunidade de analisar o sistema como um todo, podendo tomar as melhores decisões para o controle do sistema elétrico. (MACHADO, 2016)

O tempo de atuação do esquema de Self-Healing Descentralizado (SHD) pode levar de alguns segundos a quase dois minutos, contribuindo significativamente para melhorar o controle e coordenação da operação na rede elétrica, resultando em benefícios para o indicador DEC, que é somente contabilizado quando uma interrupção de energia dura o tempo equivalente a três minutos ou mais. Uma vez que menos clientes serão afetados, o SHD também contribui para a redução do valor pago em compensações financeiras.  
(ANDRADE, LIMA, 2022)

Os religadores que compõem esse esquema podem ser identificados em dois tipos diferentes de configuração. O Feeder, como segue a tradução, alimentador, é o religador localizado mais próximo a subestação, permanece normalmente fechado e realiza abertura automática, sem interferência do operador, quando acontece algum curto-circuito na rede a jusante desse equipamento. Nessa configuração, o TP (Transformador de Potencial) é instalado do lado fonte do

religador, para que quando ocorra a falta de tensão, garanta que o esquema atue, e abra, impedindo que a falta seja alimentada. Como o equipamento de medição, TP, está instalado somente de um lado do religador, a proteção não se ajusta quando há inversão do fluxo de potência. (WITKOVSKI, 2019)

O TIE é o religador que é configurado para permanecer normalmente aberto, porém é possível constatar leituras de tensão dos dois lados, fonte e carga do equipamento. Esse equipamento é o principal componente para a efetivação completa do esquema, responsável pela normalização das cargas, parciais ou totais. Sua ação se dá início quando da ausência de tensão em um dos terminais, fonte ou carga, a depender da configuração do seu par, o FEEDER. Após ocorrer a falta de tensão, é ativado um temporizador, determinado em cada caso. Caso esse tempo preestabelecido termine e ainda nota-se que não há leitura de tensão em um dos lados do TIE, a configuração do mesmo é alterada para que ele realize o fechamento, também sem nenhuma interferência do operador, restabelecendo parte ou até mesmo total das cargas interrompidas anteriormente. (WITKOVSKI, 2019)

Importante ressaltar que os religadores possuem a possibilidade de alteração na configuração de operação para modo chave. Essa aplicação oferece maior confiabilidade e controle sobre o sistema de distribuição. Ela possibilita a alteração da configuração do religador SHD para modo chave que significa desativar a função de



proteção, e o esquema não irá atuar automaticamente em caso de curto-circuito, porém os dispositivos aceitaram comandos remotos, enviados dos centros de operação, de abertura e fechamento, por exemplo. (ROTH, 2012)

## 2.5 Indicadores de tempo de atendimento

Além de monitorar e coordenar os índices de continuidade, DEC e FEC, é também responsabilidade das concessionárias realizar a coordenação do deslocamento e preparo das equipes em campo que irão atuar na detecção e correção do defeito que ocasionou a interrupção do fornecimento de energia.

Para compreender melhor o funcionamento de uma rede com SHD e a diferença, da atuação do centro de operação sem o SHD, segue o passo a passo do esquema.

Passo 1: Nesta etapa o operador do Centro de Operação identifica a abertura do religador pelo sistema de controle e supervisão e entra em contato com uma equipe que esteja disponível e o mais próximo do possível local do defeito. Aqui será avaliado o tempo médio de preparação, onde é medido a utilização e eficiência dos meios de comunicação entre o Centro de operações e a equipe em campo. (Prodist, módulo 8, 2017). Tempo Médio de Preparação (TMP), utilizando a seguinte fórmula:

$$TMP = \frac{\sum_{i=1}^n TP(i)}{n}$$

onde:

TMP = esse é o fator que mede em minutos o tempo médio de preparação de uma equipe para atender uma ocorrência emergencial

TP = esse fator mede o tempo de preparação que uma equipe necessita para atender uma ocorrência emergencial. É medido em minutos.

n = é o registro de números de ocorrências emergenciais por conjunto de unidades consumidoras. (ANEEL, 2017)

Passo 2: Após a preparação da equipe, se inicia o deslocamento da equipe de campo até o local do defeito, para realizar a manutenção corretiva, com orientação do Centro de Operações. Nessa etapa do processo é avaliado o tempo de deslocamento da equipe.

$$TMD = \frac{\sum_{i=1}^n TD(i)}{n}$$

onde:

TMD: tempo médio de deslocamento que uma equipe utilizará até chegar ao local da manutenção. Esse termo é expresso em minutos.

TD: tempo de deslocamento, expresso em minutos, para cada ocorrência emergencial. (ANEEL, 2017)



Passo 3: Ao chegar ao local a equipe de eletricitistas após localizar o defeito, irá se preparar para executar a manutenção, seguindo todos os procedimentos de segurança. Nessa etapa também será coordenada e avaliado o tempo médio de execução da atividade por meio da fórmula a seguir:

$$TME = \frac{\sum_{i=1}^n TE(i)}{n}$$

onde:

TME: é o tempo médio que a equipe leva para executar a atividade. Esse tempo é medido em minutos.

TE: tempo de execução que a equipe usa para corrigir o defeito por ocorrência emergencial. (ANEEL, 2017)

Ao final é calculado e avaliado a média de todos os processos descritos acima, expressando quanto de tempo foi gasto com o atendimento até o restabelecimento da energia dos clientes.

Essa equação é expressa por:

$$TMAE = TMP + TMD + TMD$$

A coleta dos dados será realizada mensalmente em todos os meses do ano, e deve considerar todas as ocorrências, até mesmo interrupções ocasionadas por defeito interno, por exemplo, onde a responsabilidade de manutenção corretiva é do próprio cliente. (ANEEL, 2017)

Abaixo segue uma tabela demonstrativa dos Tempos Médios de Atendimento do mês de fevereiro de 2023 da concessionária Neoenergia Brasília. Na coluna da esquerda foram especificados cada conjunto monitorado pela concessionária.

Tempos médios de atendimento						
CEBDIS - Fevereiro / 2023						
Conjunto	Código	NIE	NUMOCCORR	TMD	TME	TMP
ÁGUAS CLARAS	15625	160	270	31,00	30,00	201,00
ASA NORTE	16016	142	273	26,00	49,00	201,00
Brasília Centro	12668	27	49	33,00	37,00	143,00
BRASÍLIA GERAL	16014	124	218	27,00	43,00	180,00
BRASILÂNDIA	16023	195	225	38,00	49,00	247,00
Ceilândia Norte	12671	426	620	30,00	38,00	199,00
CEILÂNDIA SUL	16019	330	503	26,00	40,00	175,00
Contagem	12673	168	258	41,00	63,00	243,00
Gama	12674	298	446	32,00	46,00	149,00
HÍPICA	16015	65	92	31,00	62,00	153,00
LAGO NORTE	16017	55	110	35,00	36,00	187,00
Mangueiral	16840	221	364	41,00	62,00	233,00
MONJOLÓ	15626	338	529	29,00	35,00	183,00
NÚCLEO BANDEIRANTE	15623	68	116	29,00	62,00	161,00
PAD-JARDIM	16013	160	241	52,00	82,00	304,00
Paranoá	16842	216	378	35,00	45,00	206,00
PLANALTINA	15621	215	340	32,00	55,00	205,00
RIACHO FUNDO	15624	158	261	33,00	44,00	172,00
SAMAMBAIA OESTE	16020	295	421	35,00	50,00	195,00
Santa Maria	12680	145	237	29,00	39,00	144,00
São Sebastião	16841	138	224	36,00	49,00	273,00
SOBRADINHO	16018	148	215	34,00	60,00	209,00
Sudoeste	12681	37	60	26,00	47,00	139,00
TAGUATINGA	16021	402	683	28,00	43,00	180,00
TAGUATINGA NORTE	16022	147	238	25,00	30,00	203,00
Vale do Amanhecer	12683	166	230	35,00	61,00	218,00

(Fonte: ANEEL, 2023)

No conjunto de Sobradinho, por exemplo, nota-se que o TMD Tempo Médio de Deslocamento é avaliado e contabilizado 34 minutos. Somente o SHD levaria menos de dois minutos para isolar automaticamente o defeito na rede.

### 3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas análises de restabelecimento de carga comparando um circuito com lógica do Self-healing descentralizado instalada e outro circuito sem essa lógica.

Com o objetivo de verificar os benefícios da implantação de um esquema de Self-healing descentralizado, foram coletados dados e amostras de circuitos que possuem o esquema e circuitos não possuem esse esquema, analisando-se a

diferença de tempo de restabelecimento dos clientes interrompidos. Os critérios para escolhas do alimentador foram baseadas na quantidade de clientes e no tempo de interrupção e transferência de carga.

Ao final do capítulo é demonstrado como o circuito que havia implantação da lógica de restabelecimento automático influenciou nos indicadores de DEC, evidenciando os impactos positivos dessa implementação no fornecimento de energia elétrica aos clientes.

**Caso 1:** circuito com ausência do esquema de *Self-healing descentralizado*.

Primeiro conjunto de dados coletados se trata de um circuito de 13,8 kV que possui 417 clientes, 34 transformadores e 16 chaves seccionadoras manobráveis de forma local. O gráfico abaixo foi coletado do sistema SCADA e demonstra as três fases de corrente do circuito durante o dia entre 16h às 19h30min.



(Fonte: sistema Scada)

Por volta das 18h10 houve uma falha no sistema e a corrente foi a 0 A, interrompendo os 417 clientes, que

ficaram sem energia por cerca de 1 hora.

Abaixo podemos ver com mais detalhes as correntes do circuito antes e depois da interrupção. Observa-se também que a corrente no neutro está zerada, já que as fases A, B e V estão equilibradas.

		AMP_A	AMP_B	AMP_N	AMP_V
	Máximo	69,99	66,61		68,57
	Data	06/06/2023	06/06/2023		06/06/2023
	Hora	17:55:00	17:55:00		17:55:00
	Mínimo	42,33	47,38		45,08
	Data	06/06/2023	06/06/2023		06/06/2023
	Hora	19:30:00	19:30:00		19:30:00
06/06/2023	17:55:00	69,99	66,61	0,00	68,57
06/06/2023	18:00:00	69,99	66,61	0,00	68,57
06/06/2023	18:05:00	69,99	66,61	0,00	68,57
06/06/2023	18:10:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:15:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:20:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:25:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:30:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:35:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:40:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:45:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:50:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	18:55:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	19:00:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	19:05:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06/06/2023	19:10:00	54,34	54,55	0,00	51,83
06/06/2023	19:15:00	54,34	54,55	0,00	51,83
06/06/2023	19:20:00	54,34	54,55	0,00	51,83
06/06/2023	19:25:00	54,34	54,55	0,00	51,83
06/06/2023	19:30:00	42,33	47,38	0,00	45,08

(Fonte: sistema Scada)

Esse exemplo apresentado acima não possui o esquema de *Self-healing descentralizado* e a até o restabelecimento das cargas foi cerca de 1 hora.

Nesse caso foi necessário intervenção humana de várias formas: descolamento da equipe acionado pelo centro de operações, localização do defeito, isolamento da área, para que posteriormente fosse possível realizar a manutenção corretiva no trecho do circuito.

É possível notar também que antes da interrupção, a corrente no circuito era de 69,99A na fase A, 66,91A na fase B e 68,57A na fase C e após o retorno das cargas observa-se que não retornou exatamente o mesmo valor antes da interrupção, devido a ponta de carga que já havia passado. Mesmo os valores de corrente serem um pouco inferiores, não quer dizer exatamente que todas as cargas não foram restabelecidas e sim pelo fato de que o consumo nesse horário deste circuito diminuiu.

**Caso 2:** circuito com o esquema de *Self-healing descentralizado*.

Nesse outro conjunto de dados coletados se trata de dois circuitos de 13,8 kV. Um possui 3446 clientes, 68 transformadores e 45 chaves seccionadoras manobráveis de forma local, vamos denominá-lo de circuito *Alfa*. O outro possui 4125 clientes, 65 transformadores e 51 chaves seccionadoras manobráveis de forma local, vamos denominá-lo de circuito *Beta*.

É possível observar no gráfico de corrente, onde estão representadas as três fases de dois circuitos distintos.

O circuito *Alfa* está recebendo carga de do circuito *Beta* que sofreu uma intervenção, o motivo não foi definido, mas causado por um defeito permanente. O esquema SHD atuou perfeitamente transmitindo automaticamente os clientes que ficariam interrompidos que são originalmente do circuito *Beta*, para o

circuito *Alfa* que é de uma subestação distinta.



(Fonte: sistema Scada)

O circuito *Beta* sofreu uma falta em algum trecho por volta das 23h15min. Observa-se também que o levantamento de dados ocorre de 5 em 5 minutos, mas mesmo assim é possível ver que o circuito *Alfa*, teve uma elevação considerável na corrente.

	AMP_A	AMP_B	AMP_V	AMP_A	AMP_B	AMP_V
Máximo	65,97	65,20	68,34	64,19	64,53	63,82
Data	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023
Hora	23:30:00	23:30:00	23:10:00	23:10:00	23:10:00	23:10:00
Mínimo	40,25	39,36	39,68	47,31	47,57	46,99
Data	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023	06/06/2023
Hora	23:00:00	23:00:00	23:00:00	23:30:00	23:30:00	23:30:00
23:00:00	40,25	39,36	39,68	63,95	61,68	62,56
23:05:00	40,25	39,36	39,68	63,95	61,68	62,56
23:10:00	60,15	59,36	68,34	64,19	64,53	63,82
23:15:00	60,15	59,36	68,34	48,00	49,00	47,00
23:20:00	60,15	59,36	68,34	48,99	47,63	47,02
23:25:00	60,15	59,36	68,34	48,99	47,63	47,02
23:30:00	65,97	65,20	65,78	47,31	47,57	46,99

(Fonte: sistema Scada)

Nesse caso não foi necessário mobilização do centro de operações e de equipe em campo para restabelecimento dos clientes já que o trecho possui o esquema de *SHD*. Caso houvesse necessidade de manutenção corretiva, o trecho onde ocorreu a falha já estaria identificado e isolado, possibilitando que a equipe de campo trabalhasse com segurança.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade de energia elétrica é imprescindível para que a humanidade funcione de maneira otimizada. Sem o recurso desse produto, os aspectos da vida moderna seriam diretamente afetados, sucedendo em um desempenho arrastado do bem-estar, retardo no desenvolvimento socioeconômico e no avanço tecnológico.

Através dos indicadores individuais e coletivos, monitorados e exigidos pela ANEEL, vem sendo mais exigido das concessionárias a busca por tecnologias que auxiliem no melhor desempenho do fornecimento de energia elétrica.

Uma das formas encontradas para evitar longos períodos de interrupções de energia foi através da automação na rede elétrica das distribuidoras com tecnologias como o *Self-healing descentralizado* (SHD), objeto da Smart Grid, além de proporcionar mais otimização para os centros de operação e facilidade para manutenções corretivas na rede quando de um defeito, isolando o trecho com a falha.

É importante salientar também a resiliência do SHD na atuação frente a diferentes tipos de falhas causadas por descargas atmosféricas, objetos na rede elétrica ou até mesmo cabos partidos.

Através deste trabalho, realizamos uma análise detalhada sobre o conceito e a importância da implementação do *Self-healing*

*descentralizado* (SHD) em sistemas de fornecimento de energia elétrica, voltada para a qualidade de energia, comparando circuitos que possuem essa tecnologia e outros circuitos distintos com ausência do SHD e o tempo gasto para restabelecimento.

Observa-se que no circuito onde havia a presença do SHD, a duração da interrupção da eletricidade foi menor e os clientes foram menos afetados ou afetados de forma nenhuma, não havendo contabilização nos indicadores de DEC e FEC, parâmetros que são usados para avaliar a performance e o desempenho da distribuidora.

Além disso neste trabalho verificou-se nas pesquisas realizadas para execução deste trabalho que há muitas tecnologias em desenvolvimento para aprimorar a automação nas redes elétricas de distribuição em busca de melhores resultados nos indicadores das concessionárias.

Por fim foi possível verificar as vantagens de instalação do *Self-healing descentralizado* nas distribuidoras e como é tangível as vantagens da sua aplicação.

#### REFERÊNCIAS:

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Disponível em: [https://antigo.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8\\_Revisao\\_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19](https://antigo.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19)  
Acessado em 9 de março de 2023

ABRADEE - Associação brasileira de distribuidores energia elétrica - Visão geral



do setor. Disponível em:  
<https://abradee.org.br/visao-geral-do-setor/>  
Acesso em 14 de março de 2023

SCHETTINO, Stevon et al. **Cenários do uso das redes elétricas inteligentes (Smart Grid): Tendências de sua difusão no Brasil. 2013.**

Disponível em:  
<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5233>

Acesso em 12 de março de 2023.

GOINSK, Julio; SOBIERAI, Renata; PEREIRA, Sidnei. **REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DE SOLUÇÕES EM SMART GRID PARA RECONFIGURAÇÃO AUTOMÁTICA. Revista Técnico-Científica, 2019.**

Disponível em:  
<https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/606>

Acesso em 16 de abril de 2023

FALCÃO, Djalma M. Smart grids e microrredes: o futuro já é presente. **Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos**, v. 8, 2009.

Disponível em:  
<http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/ctee/simpase2009/documentos/IT%2044%20-%20Smart%20Grids%20e%20Microredes%20O%20Futuro%20j%C3%A1%20C3%A9%20Presente.pdf>

Acesso em 17 de abril de 2023

ENERGIA, D. E. 21 a 24 de agosto de 2005 Belém-Pará-Brasil.

Disponível em:  
<https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/04/GERAC%CC%A7A%CC%83O-DISTRIBUI%CC%81DA-E-IMPACTO-NA-QUALIDADE-DE-ENERGIA.pdf>

Acesso em 17 de abril de 2023

CHAGAS, Gabriela Fuzetti et al. A inclusão da tecnologia da Smart Grid para o

desenvolvimento do Brasil. **Revista eSALENG-Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO-Vol**, v. 9, n. 1, 2020.

Disponível em:  
[https://unisaesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2021/03/08\\_A-inclusao-da-tecnologia\\_142\\_159.pdf](https://unisaesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2021/03/08_A-inclusao-da-tecnologia_142_159.pdf)

Acesso em 26 de abril de 2023

CHAGAS, Gabriela Fuzetti et al. A inclusão da tecnologia da Smart Grid para o desenvolvimento do Brasil. **Revista eSaleng-Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO-Vol**, v. 9, n. 1, 2020.

Disponível em:  
[https://unisaesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2021/03/08\\_A-inclusao-da-tecnologia\\_142\\_159.pdf](https://unisaesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2021/03/08_A-inclusao-da-tecnologia_142_159.pdf)

Acesso em 27 de abril de 2023

JÚNIOR, AGRA; CARNEIRO, José Edson. Análise dos impactos do self healing nos indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica. 2022.

Disponível em:  
<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27420>

Acesso em 18 de março de 2023

Painel de Desempenho das Distribuidoras de Energia Elétrica por Município

Disponível em:  
[https://www2.aneel.gov.br/relatoriosrig/\(S\(hauxxvr5fnsimkujcsika1am\)\)/relatorio.aspx?folder=sfe&report=PainelMunicipio#P2e9e19f1ffd64acb8447aa634005617b\\_2\\_67iT0](https://www2.aneel.gov.br/relatoriosrig/(S(hauxxvr5fnsimkujcsika1am))/relatorio.aspx?folder=sfe&report=PainelMunicipio#P2e9e19f1ffd64acb8447aa634005617b_2_67iT0)

Acesso em 20 de maio de 2023

GOINSK, Julio; SOBIERAI, Renata; PEREIRA, Sidnei. **REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DE SOLUÇÕES EM SMART GRID PARA RECONFIGURAÇÃO AUTOMÁTICA. Revista Técnico-Científica, 2019.**

Disponível em:



<https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/606>

Acesso de 5 de maio de 2023

NORTHCOTE-GREEN, James; WILSON, Robert G. **Control and automation of electrical power distribution systems**. CRC press, 2017.

Acesso em 4 de maio de 2023

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Avaliação da qualidade da energia elétrica. Available in:< <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>, 2017.

Disponível em:

<https://www.drb-m.org/av1/avalaiacaodaqualidadedaenergia.pdf>

Acesso em 12 de maio de 2023