

Sistema de Recomposição Automática baseado em Redes de Petri Colorida

Eudes Barbosa de Medeiros, Caio F. V. de Oliveira, Marcell B. Sá, Sidney R. da C. Monteiro, Raimundo F. Sampaio, José R. Bezerra, Giovanni C. Barroso, Ruth P. S. Leão, José G. Silveira, Klendson M. Canuto, Luiz E. P. Formiga, Fernando A. Barros, André L. E. Valentim, Thiago N. S. Pontes, Lacarter M. Ferreira, Ricardo A. P. da Silva.

Resumo – Neste artigo são apresentados a modelagem e o desenvolvimento de um Piloto de Redes Inteligentes para Automação do Sistema Elétrico de Distribuição da Cidade de Aquiraz, pertencente à Companhia Energética do Ceará - Coelce. O sistema proposto consiste de um Sistema de Reposição Automática (SRA) capaz de localizar e isolar trechos dos alimentadores de distribuição afetados por faltas e recompor os demais trechos através de encontros de alimentadores. O SRA foi modelado em redes de Petri coloridas e desenvolvido na linguagem de programação C#. Atualmente, o SRA está funcionando em modo *off-line* integrado a um sistema simulador da rede elétrica, baseado na topologia da rede elétrica de Aquiraz. Os resultados obtidos nas simulações demonstram que o SRA apresenta bom desempenho, proporcionando rapidez e confiabilidade na recomposição da rede. No momento está em curso o desenvolvimento da integração do SRA ao sistema SCADA no Centro de Controle do Sistema da Coelce.

Palavras-chave – Automação de Sistemas de Distribuição, Redes de Petri, Redes Inteligentes, Sistema de Recomposição Automática.

I. INTRODUÇÃO

Redes Elétricas Inteligentes (REI) constituem um paradigma amplamente estudado em todo o mundo, para modernizar as redes elétricas por meio de controle automático avançado, técnicas de comunicação e tecnologia da informação. As REI congregam uma diversidade de tecnologias, equipamentos e fabricantes, com uma gama de benefícios e oportunidades associados à inovação tecnológica e ao desenvolvimento de novos produtos e serviços e novas oportunidades de mercado, atrelados a toda cadeia de provimento e

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, no período de 05 a 07 de agosto de 2013. O trabalho foi apoiado parcialmente pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

M. B. Sá, C. F. V. de Oliveira, S. R. da C. Monteiro, J. R. Bezerra, G. C. Barroso, R. P. S. Leão, R. F. Sampaio estão ligados à Universidade Federal do Ceará (e-mails: marcell.sa@hotmail.com; caio_vas@hotmail.com; engsidneyroberto@gmail.com; jbroberto@yahoo.com.br; gcb@fisica.ufc.br; rleao@dee.ufc.br; rfurtado@dee.ufc.br).

E. B. de Medeiros, J. G. Silveira, K. M. Canuto, L. E. P. Formiga, F. A. Barros, A. L. E. Valentim, T. N. S. Pontes, L. M. Ferreira trabalham para a Companhia Energética do Ceará (e-mail: eudes@coelce.com.br; giordane@coelce.com.br; klendson@coelce.com.br; formiga@coelce.com.br; valentim@endesabr.com.br; thiagopontes@endesabr.com.br; lmferreira@coelce.com.br).

Ricardo A. P. da Silva trabalha para Synapsis Brasil (e-mail: ricardo.augusto@synapsisbrasil.com.br)

consumo da energia elétrica.

Sistemas inteligentes para automatização de redes de distribuição de energia elétrica estão entre os temas de redes inteligentes mais pesquisados no Brasil e no mundo [1]. No âmbito da automação de sistemas elétricos, muitos pesquisadores e empresas de energia estão investindo no desenvolvimento de sistemas de recomposição automática (SRA) [2]-[6].

Um sistema de recomposição automática (SRA), também denominado de sistema de auto recomposição (*self-healing*, no inglês), é capaz de identificar o trecho da rede em falta e os trechos não defeituosos, porém desenergizados como resultado da falta, restaurar o maior número possível de trechos sem defeito baseado em critérios de segurança operacional e prioridades de restabelecimento definidos pela concessionária, e retornar a operação da rede elétrica ao seu estado seguro de forma automática [5]. Dentre os benefícios advindos da implantação de um SRA para as empresas de energia elétrica estão: as condições anormais da rede são automaticamente conhecidas; as alterações na rede são automaticamente realizadas; os operadores não necessitam realizar manobras de ligar/desligar a rede; diminui o tempo de interrupção de energia ao cliente; diminui os custos de deslocamento de equipes de campo; melhora os indicadores de qualidade e de satisfação do cliente; e reduz situações de estresse às quais estão submetidos os operadores [4].

Dentro deste contexto, neste artigo é apresentada a modelagem de um SRA baseado em Redes de Petri Coloridas (RPC) e o estágio atual de integração do SRA ao sistema SCADA no Centro de Controle do Sistema (COS) da Coelce para operação em tempo real. O protótipo do SRA proposto abrange a recomposição automática da rede elétrica de distribuição de energia da cidade de Aquiraz, que dista 25 km de Fortaleza (CE), pertencente à Companhia Energética do Ceará - Coelce. Em [2] é apresentada a metodologia utilizada para desenvolvimento e implantação deste sistema. O SRA modelado em RPC foi desenvolvido na linguagem de programação C# da *Microsoft Visual Studio*.

No estágio atual, o SRA está sendo testado e validado através de um sistema simulador também desenvolvido em C#. O simulador contempla uma base de dados da Coelce com informações sistêmicas e dados reais dos equipamentos da rede elétrica de Aquiraz.

O artigo está organizado como segue: Na Seção II são apresentados os conceitos de Redes de Petri. Na Seção III é descrito o princípio de funcionamento do SRA. Na Seção IV é apresentada a Rede de Distribuição de Aquiraz. Na Seção V é apresentada a modelagem do RSA em RPC. Na Seção VI é apresentada a implementação computacional do SRA.

Na seção VII é descrito um estudo de caso. Na seção VIII é apresentado o estágio atual da Integração do SRA ao SCADA do Centro de Controle. Finalmente, na Seção IX é apresentada a conclusão do trabalho.

Destaca-se que o projeto está em fase de execução e encontra-se registrado no Sistema de Gestão de P&D da ANEEL sob o código PD-0039-0016/2010 e título “Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento para Implantação de um Piloto de Redes Inteligentes (*SmartGrid*) para Automação do Sistema Elétrico”. Financiado pela Companhia Energética do Ceará, o projeto está sendo executado pela Universidade Federal do Ceará, Universidade de Fortaleza, Instituto Federal do Ceará e Synapsis Brasil.

II. CONCEITOS DE REDES DE PETRI

Várias Técnicas computacionais vêm sendo pesquisadas para desenvolvimento de sistemas de recomposição automática de redes elétricas. Dentre as diferentes técnicas estão: métodos de otimização; redes de Petri; sistemas especialistas; busca heurística; lógica *fuzzy*; algoritmos genéticos; otimização por nuvens de partículas; pesquisa Tabu; redes neurais artificiais; e modelos híbridos [6]. Para a modelagem e validação do SRA proposto foi usado o método de Redes de Petri Coloridas.

A. Redes de Petri e Redes de Petri Coloridas

As redes de Petri (RP) são uma ferramenta matemática com visualização gráfica, capaz de modelar, analisar, controlar, validar e implementar diferentes sistemas, em especial sistemas a eventos discretos [7].

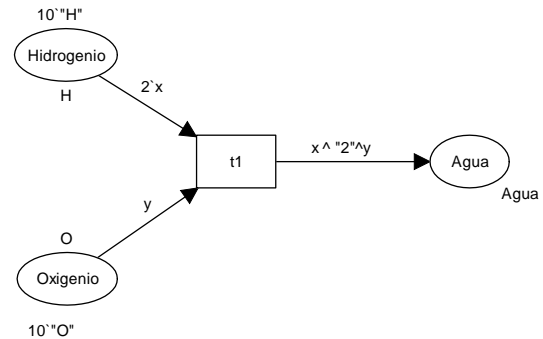
Um sistema a eventos discretos (SED) é um sistema dinâmico cuja evolução no tempo é governada pela ocorrência abrupta de eventos físicos em intervalos irregulares. Um SED é caracterizado pela mudança discreta de seus valores de estado. Estes estados são bem definidos e podem variar sempre que ocorre um evento [9].

As redes de Petri coloridas (RPC) são uma ferramenta que faz uso de uma linguagem gráfica para a construção de modelos de SED e análise de suas propriedades. As RPC são uma linguagem de modelagem que combinam a estrutura de uma rede de Petri com a capacidade de uma linguagem de programação de alto nível. As RPC permitem a construção de modelos compactos e parametrizáveis de sistemas reais complexos, fornecendo um alto nível de abstração e uma melhor representação gráfica [8]. Os modelos RPC podem conter diferentes níveis de abstração. Os mesmos podem ser construídos usando-se um conjunto de módulos quando se está modelando um sistema mais complexo. Os módulos interagem através de interfaces bem definidas, de forma similar a uma linguagem de programação. Em RPC, o conceito de módulos é baseado em um mecanismo de hierarquia, o que permite a um módulo possuir submódulos que podem ser reusados em diferentes partes do modelo. Assim, as RPC são uma ferramenta adequada para a modelagem de sistemas de recomposição de redes elétricas com mudanças discretas de estados em decorrência da atuação da proteção e manobras de chaveamento na rede. As RPC fornecem características importantes como modularidade, capacidade de expansão e fácil manutenção. Estas características facilitam

a adição ao modelo de novos equipamentos ou processos do sistema modelado.

A ferramenta computacional *CPN Tools* é uma ferramenta de distribuição livre usada para edição, análise e simulação de modelos RPC. Na Figura 1 é apresentada a ilustração de um modelo de redes de Petri coloridas. A rede consiste de lugares (elipses), transições (retângulos) e arcos direcionados (ligando lugares a transições e transições a lugares). Associados à estrutura da rede, são usados vários tipos de dados, que podem ser manipulados.

Figura 1. Representação de uma rede de Petri colorida.



Os lugares representam os estados do sistema modelado. Os nomes dos lugares são escritos dentro dos mesmos e não possuem significado formal, mas são de grande importância para a compreensão do modelo RPC. Cada lugar pode ser marcado com uma ou mais fichas e, cada ficha possui um valor associado. Este valor é denominado de cor da ficha. Por exemplo, o lugar “Oxigênio”, da rede da Figura 1, possui 10 fichas de valor “O”.

O número de fichas em cada lugar, bem como suas cores correspondentes, representa o estado do sistema modelado. A distribuição de fichas nos lugares representa a marcação da RPC. As fichas em um determinado lugar da rede representam a marcação daquele lugar.

As transições representam os eventos que podem ocorrer no sistema modelado. Assim, como os lugares, os nomes das transições são escritos dentro das mesmas (a rede da Figura 1 possui apenas uma transição de nome “ t_1 ”).

Quando uma transição ocorre, são removidas fichas de seus lugares de entrada (aqueles que possuem um arco saindo deles e chegando na transição) e são acrescentadas fichas a seus lugares de saída (aqueles cujos arcos iniciam na transição e terminam nos lugares). Quem determina quais fichas são removidas dos lugares de entrada e quais adicionadas aos lugares de saída da transição, são as expressões associadas aos respectivos arcos de entrada e saída da transição. Estas expressões são textos posicionados próximos a cada arco. As expressões de arcos podem ser constituídas de variáveis, constantes, operadores e funções próprias da linguagem de programação CPN ML [10]. Por exemplo, na Figura 1, a expressão associada ao arco que liga o lugar “Hidrogênio” à transição “ t_1 ” é “ $2 \cdot x$ ”.

Quando todas as variáveis em uma expressão são ligadas a valores do tipo correto, relativos às fichas em todos os lugares de entrada da transição, então a mesma estará habilitada

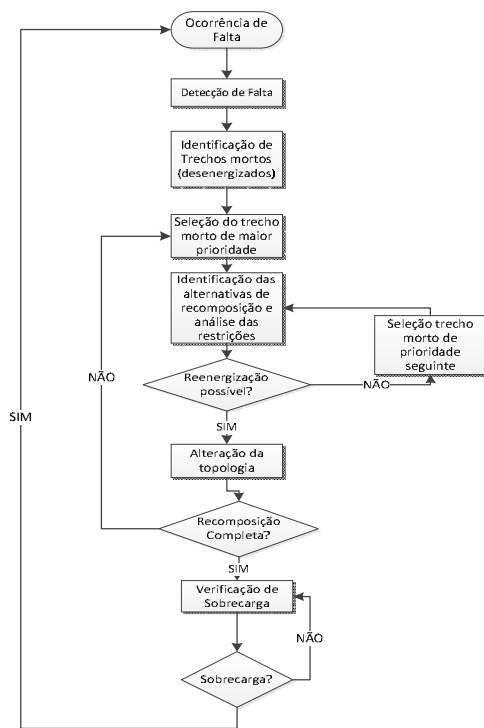
tada e poderá ocorrer. Na Figura 1, a transição “t1” está habilitada, pois a expressão do arco (2’x) que liga o lugar “Hidrogênio” a ela exige que no disparo da mesma, apenas duas fichas do tipo “H” sejam retiradas do lugar e, nessa marcação, o mesmo possui 10 fichas. Da mesma forma, a expressão do arco (1’y) que liga o lugar “Oxigênio” à transição exige que seja retirada apenas uma ficha do tipo “O” do referido lugar.

As transições também podem ter uma expressão de guarda associada, a qual é uma expressão booleana. Neste caso, a transição só estará habilitada se as condições anteriores forem satisfeitas e a expressão de guarda for verdadeira.

III. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SRA

O SRA proposto realiza a recomposição de cada trecho considerando um conjunto de restrições operativas como capacidade dos condutores (ampacidade) e das fontes de suprimento (potência) e prioridades como potência não fornecida, número de consumidores desenergizados e cargas preferenciais do tipo eletro dependentes, hospitais, etc. Na Figura 2 é apresentado o fluxograma do SRA proposto.

Figura 2. Fluxograma de ações.



Na etapa *Detecção da Falta* o sistema é capaz de reconhecer a ocorrência de uma falta pelo envio de informação pelo SCADA de abertura do religador. A localização da falta é feita de acordo com as funções de sensibilidade dos religadores, mostrado posteriormente.

Em *Identificação dos Trechos Mortos* é detectado o trecho onde ocorreu a falta. Os trechos não defeituosos que, por consequência da falta, foram desenergizados são identificados para iniciar a tentativa de energizá-los por rotas alternativas. Para a análise ser realizada em cada trecho individualmente, o sistema considera os trechos desenergizados como se estivessem isolados.

Em *Seleção do trecho morto de maior prioridade*, os trechos mortos são ordenados de acordo com a prioridade desejada, atribuída pela concessionária durante a configuração do sistema.

Em *Identificação das alternativas de recomposição e análise das restrições*, definido o trecho a recompor, detectam-se os religadores abertos que estão ligados diretamente ao trecho escolhido e a outro trecho adjacente que esteja energizado, de forma que seu fechamento normalize a situação do trecho em questão. A identificação do religador é feita com base nos dados que indicam a topologia da rede, que são inicialmente fornecidos ao SRA. Caso não seja encontrado nenhum religador que satisfaça essas condições, uma variável informa ao SRA que deve ser realizada a tentativa de re-energizar o trecho de prioridade seguinte, que compreende a etapa de *Seleção trecho morto de prioridade seguinte*. Caso sejam encontradas formas possíveis de energizar o trecho, é realizada a análise das restrições que calcula a capacidade da fonte e ampacidade dos condutores. Se for possível recompor, o sistema fará a operação, o que constitui a *Verificação de sobrecarga*. Caso não seja possível, o sistema tentará recompor os outros trechos desenergizados.

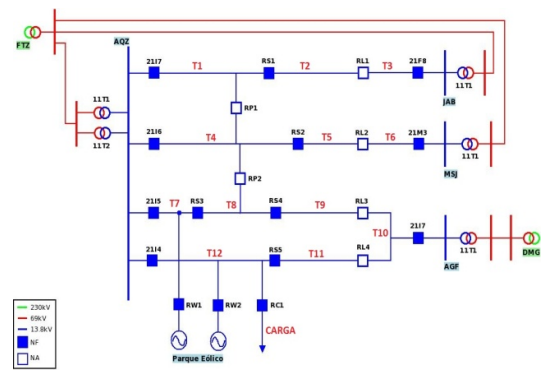
A *Alteração da topologia* indica as mudanças da configuração do sistema de distribuição. No final do processo uma nova topologia da rede é adotada.

Estas etapas são repetidas até que não haja mais nenhum trecho cuja reenergização seja possível. Enquanto a rede não retornar a sua condição normal, a verificação das restrições é executada repetidamente. No caso de detecção de alguma violação às restrições, o sistema é executado novamente de forma a identificar uma nova topologia que obedeça às restrições.

IV. REDE ELÉTRICA DE AQUIRAZ

O diagrama unifilar da rede de distribuição de Aquiraz é mostrado na Figura 3. A rede Aquiraz é suprida em 13,8 kV diretamente por quatro subestações 69kV/13,8kV: SE AQZ, SE JAB, SE MSJ e SE AGF. A SE AQZ é a principal fonte de suprimento da rede Aquiraz, suprimindo aproximadamente 50% da carga da rede.

Figura 3. Rede de distribuição de Aquiraz



A SE Aquiraz (AQZ) possui 4 saídas de alimentadores, 2114, 2115, 2116 e 2117, os quais possuem encontros de alimentadores normalmente abertos com as demais subesta-

a) Se a sub-rede é chamada a partir de uma Análise de Fontes, então, com a informação dos elementos interligados e a informação das cargas dos trechos, e capacidade das fontes, é avaliado se há sobrecarga de alguma fonte. Em caso afirmativo, uma informação é enviada dizendo que tal recomposição não é possível, e deve ser feita a tentativa de fechamento de outro religador para recomposição da rede; b) Se for chamada a partir de uma Análise de Trechos, então com a informação dos elementos interligados e a informação de cargas ligadas para os trechos à jusante, e capacidade de condução para o trecho escolhido para análise, então é feito cálculo cujo objetivo é informar se há ultrapassagem da capacidade de condução do condutor do trecho escolhido. Caso haja, uma informação é enviada dizendo que tal recomposição não é possível, e deve ser feita a tentativa de fechamento de outro religador, se possível, para recomposição.

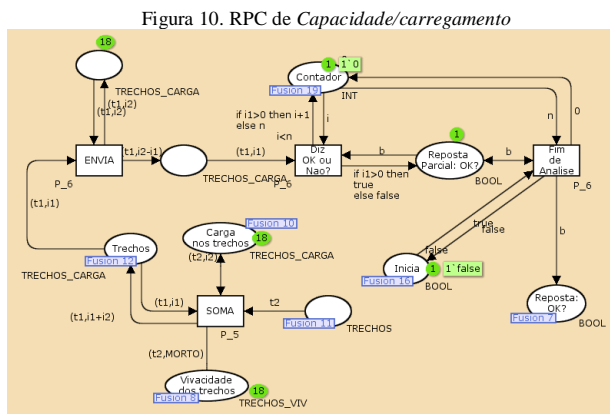


Figura 10. RPC de Capacidade/carregamento

H. Análise de trechos

Após o processo de Análise de Fonte, juntamente com Capacidade/Carregamento, deve ser feita a Análise de Trechos. Isso é feito a partir de informações dos estados dos religadores, e assim identificam-se quais trechos estão a jusante de determinado trecho (chamados aqui também de trechos interligados) escolhido para análise de capacidade de condução.

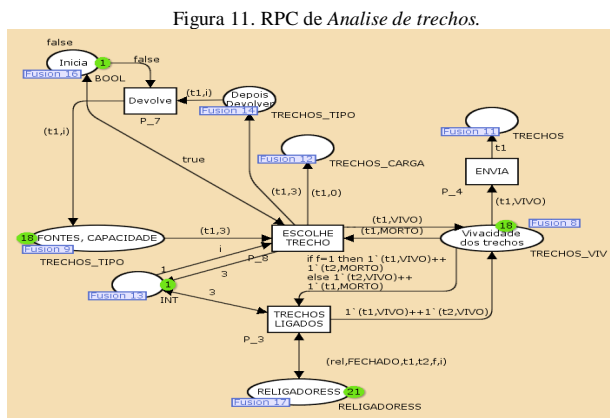


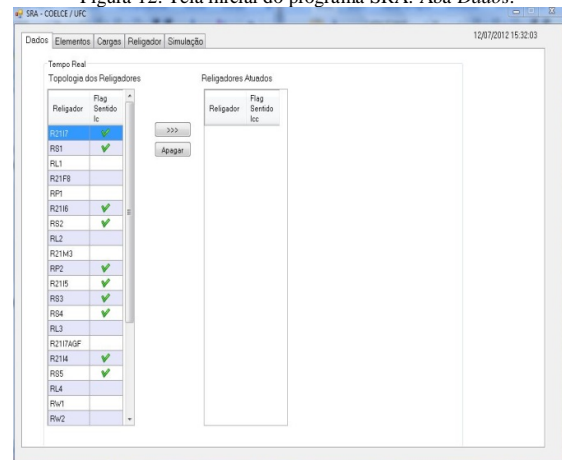
Figura 11. RPC de Análise de trechos.

VI. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO SRA

Baseado no modelo RPC, foi desenvolvido um sistema de recomposição automática (SRA), cujas funcionalidades estão descritas a seguir. A tela inicial do SRA é apresentada

na Figura 12. Esta tela possui cinco abas, a saber: Dados, Elementos, Cargas, Religador e Simulação, as quais são descritas a seguir.

Figura 12. Tela inicial do programa SRA. Aba Dados.



A. Aba Dados

Essa aba simula a entrada de dados oriundos do sistema SCADA para o SRA. Esta é dividida em duas partes: *Topologia dos Religadores* e *Religadores Atuados*.

Em *Topologia dos Religadores* estão contidas duas informações: nome do religador e *Flag* de sentido de corrente de carga (*Ic*) de todos os religadores presentes na rede Aquiraz. É nesta área que o sistema recebe informações externas de atuação dos religadores, sendo a ação do religador armazenada na área *Religadores Atuados*.

Quando a *Flag Sentido Ic* estiver sinalizado indica que a corrente no determinado religador está no sentido da esquerda para a direita, caso contrário, o sentido é da direita para esquerda, de acordo com o diagrama unifilar da Figura 3

B. Aba Elementos

Nesta aba, apresentada na Figura 13, estão presentes todos os elementos do sistema de distribuição de Aquiraz, divididos nas seguintes áreas: *Elementos*, *Fontes*, *Em Falta*, *Vivacidade*, *Capacidade*, *Prioridade*, *Fonte Inicial*, *Fonte Atual*, *Cliente* e *Eletrodependente*. Em que:

1) *Elementos*: Área que nomeia os elementos do sistema, os quais são divididos em trecho, barramento, fonte/transformador.

2) *Fonte*: Indicação se o elemento correspondente é fonte (assinalado) ou não.

3) *Em Falta*: Indicação do estado do elemento. Se o elemento se apresentar em estado defeituoso será assinalado.

4) *Vivacidade*: Sinalização de indicação de vivacidade do elemento correspondente, ou seja, se o campo estiver marcado indica que o elemento se apresenta energizado.

5) *Capacidade*: Expõe a capacidade de condução de cada elemento. No caso de elementos tipo trechos/barramento essa característica representa a capacidade do condutor; em elementos do tipo fonte/transformador indica a capacidade de fornecimento de energia.

6) *Prioridade*: Indica a prioridade de recomposição de cada elemento da rede podendo esse campo ser modificado de acordo com a exigência escolhida: *Número de clientes e Eletrodependentes*.

7) *Fonte inicial*: Indica a fonte que alimenta o elemento correspondente antes de uma possível recomposição.

8) *Fonte atual*: Indica a fonte que alimenta o elemento correspondente após uma possível recomposição.

9) *Cliente*: Indica o numero de clientes que estão conectados ao determinado elemento.

10) *Eletrodependente*: Sinaliza se no elemento está conectado algum consumidor eletrodependente.

Figura 13. Aba Elementos

Elementos	Fonte	Em Falta	Vivacidade	Capacidade(A)	Prioridade	Fonte_Inicial	Fonte_Atual	Cliente	EletroDep
T11			✓	438	1	AQZ01T2		3219	✓
T12			✓	438	2	AQZ01T2		1644	✓
T10			✓	384	3	AGF01T2		9869	
T6			✓	438	4	MSJ01T1		8395	
T9			✓	242	5	AQZ01T2		5644	
JAB			✓	452	6			5000	
MSJ			✓	1000	7			5000	
CARGA			✓	1	8			5000	
PE			✓	5000	13			5000	
AGF			✓	456	9			5000	
AOZ			✓	1554	10			5000	
T2			✓	475	11	AQZ01T2		3193	
T4			✓	475	12	AQZ01T2		2866	
T7			✓	475	13	AQZ01T2		1499	
T5			✓	475	14	AQZ01T2		1318	
T3			✓	475	15	JAB01T2		987	
T8			✓	475	16	AQZ01T2		806	
T1			✓	475	17	AQZ01T2		227	
AGF01T2	✓		✓	1113	21			0	
JAB01T1	✓		✓	523	22			0	
AGF01T1	✓		✓	1113	23			0	
JAB01T2	✓		✓	523	26			0	
MSJ01T1	✓		✓	1113	25			0	
AOZ01T2	✓		✓	628	24			0	
AOZ01T1	✓		✓	628	27			0	

C. Aba Cargas

Nesta aba, mostrada na Figura 14, será exibida a corrente que se estabelece no elemento, em ampères, no momento da última leitura. Em se tratando de um elemento do tipo *trecho/barramento*, a carga representa a corrente que está sendo consumida pelos clientes instalados naquele trecho. Para elementos do tipo *fonte/transformador*, a carga representa o fornecimento de corrente, por isso o sinal negativo para os elementos desse tipo.

Esses dados de cargas são mostrados para que se possam simular as medidas feitas pelos religadores em tempo real. A implementação da leitura dessas medidas *online* será feita

durante a integração com o sistema supervisor e o banco de dados que contém as informações.

Figura 14. Aba Cargas.

Trecho	Carga (A)
T11	51
T12	146
T10	268
T6	277
T9	95
PE	-2
AGF	0
AOZ	0
JAB	0
MSJ	0
CARGA	1
T2	195
T4	39
T7	62
T5	180
T3	198
T8	20
T1	41
MSJ01T1	-1113
AOZ01T2	-628
AOZ01T1	-628
JAB01T2	-523
AGF01T2	-1113
JAB01T1	-523
AGF01T1	-1113

D. Aba Religador

Na Figura 15 é representada a topologia dos religadores de acordo com a rede de Aquiraz. Na tela constam informações do tipo: nome do religador, estado do religador (quadrado preenchido significa religador fechado; o contrário, religador aberto), origem é o trecho a montante do religador, destino é o trecho a jusante do religador, corrente medida pelo religador em amperes e a *flag* indica o sentido de corrente de carga (quando clicado o sentido é origem - destino).


Figura 15. Aba Religador.

Religador	Estado	Origem	Destino	Corrente	Flag Sentido Ic
R217	✓	AOZ	T1	236	✓
RS1	✓	T1	T2	195	✓
RL1	□	T2	T3	0	
R21F8	□	T3	JAB	198	
RP1	□	T1	T4	0	
R21F6	✓	AOZ	T4	219	✓
RS2	✓	T4	T5	180	✓
RL2	□	T5	T6	0	
R21M3	□	T6	MSJ	277	
RP2	□	T4	T8	0	
R21F5	✓	AOZ	T7	176	✓
RS3	✓	T7	T8	115	✓
RS4	✓	T8	T9	95	✓
RL3	□	T9	T10	0	
R217AGF	✓	T10	AGF	268	✓
R21H4	✓	AOZ	T12	196	✓
R55	✓	T12	T11	50	✓
RL4	□	T11	T10	0	
RW1	✓	T7	PE	1	
RW2	✓	T12	PE	1	
RC1	✓	T12	CARGA	1	✓
AOZ11T1	✓	AOZ01T1	AOZ	414	✓
AOZ11T2	✓	AOZ01T2	AOZ	413	✓
JAB11T1	✓	JAB	JAB01T1	99	
JAB11T2	✓	JAB	JAB01T2	99	

E. Aba Simulação

Nesta aba apresentada na Figura 16, é mostrado o diagrama unifilar da rede Aquiraz. Os transformadores foram nomeados (01T1 e 01T2) de acordo com o padrão da concessionária, bem como as subestações *Aquiraz (AOZ)*, *Jaboti (JAB)*, *Messejana (MSJ)*, *Água Fria (AGF)*. Os religadores e trechos também são nomeados de acordo com as listas

apresentadas nas abas *Religador* e *Elementos*, respectivamente. Com a legenda é possível identificar algumas características da rede como: *tensão de distribuição*, *tensão de transmissão* e *estado dos religadores*.

No caso de ocorrer uma falta em um trecho, o símbolo  irá ficar piscando naquele trecho e, no caso de um trecho estar em *desenergizado* (característica da *Vivacidade*) a linha do trecho do diagrama ficará na cor laranja, diferente do outro estado, *energizado*, que ficará da cor azul. Ver Figura 17.

Outro dado importante está exposto no diagrama: *número de clientes energizados* e *número de clientes desenergizados*. Estes dados são calculados automaticamente pelo SRA e mostram a quantidade e a porcentagem dos clientes afetados por uma possível falta na distribuição. O número de clientes é encontrado de acordo com a vivacidade de cada trecho.

As ações de simulação são feitas com a utilização dos botões *Simulação* e *Reiniciar*. A utilização desses botões é registrada na página indicando a hora e data da ação realizada.

As prioridades de recomposição podem ser feitas de acordo com a escolha do operador através do botão *Configurações*. As duas opções de prioridade são *Eletrodependentes* e *Número de Clientes*, mas outras prioridades podem ser acrescentadas e ou retiradas.

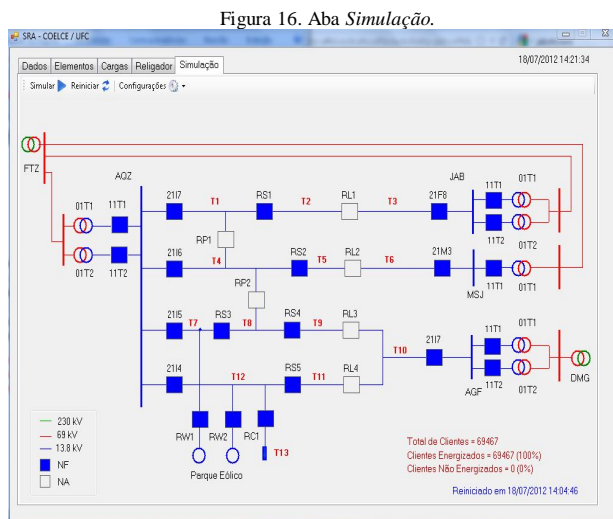


Figura 16. Aba Simulação.

VII. ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a eficiência do SRA, esta seção apresenta um exemplo de ocorrência de falta na subestação AQZ e as ações realizadas pelo SRA.

Considerando que a rede de distribuição está operando em estado normal, Figura 16, uma simulação de falta simultânea, nos trechos *T7* e *T12*, são simuladas no SRA, Figura 17. Como nesta simulação não há falha de abertura, os religadores *2115* e *2114* irão atuar. Após a ocorrência, o SRA isolar os trechos em falta, assim, os religadores, ligados a esses trechos, serão abertos: *RS3* e *RW1*, no caso do trecho *T7*; *RS5*, *RW2* e *RW1*, no caso do trecho *T12*.

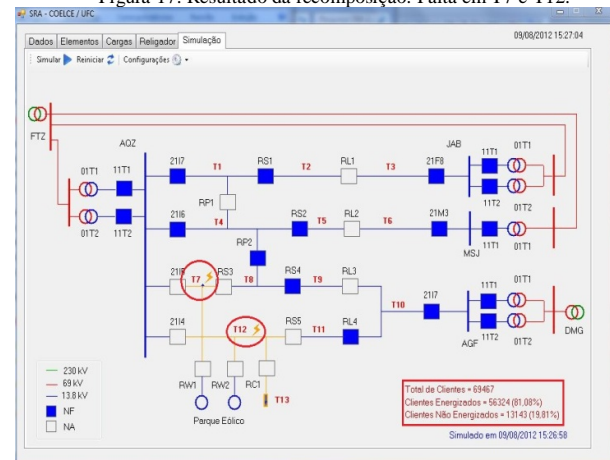
O SRA sempre tentará recompor um trecho não defeituoso de maneira que a fonte inicial seja conservada. Caso não seja possível a recomposição pela mesma fonte, devido a

alguma restrição anteriormente comentada (capacidade da fonte ou ampacidade do cabo), o trecho não defeituoso será recomposto por outra fonte.

Neste exemplo, os trechos *T8* e *T9* são recompostos pela fonte AQZ através da mudança de estado do religador *RP2*, mantendo assim a mesma fonte de alimentação.

No segundo caso o trecho *T11* é recomposto pela fonte *AGF*, pois não há a possibilidade de este trecho ser recomposto pela sua fonte inicial, *AQZ*, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17. Resultado da recomposição. Falta em T7 e T12.



Deve-se destacar a importância das contingências nessa simulação de recomposição.

É óbvio que o a ampacidade do trecho *T4* deve suportar o acréscimo de cargas dos trechos *T8* e *T9*. Em relação à capacidade de fornecimento da fonte (AQZ), o sistema consegue recompor esses dois trechos pela mesma fonte, não havendo necessidade do processo de *análise da fonte* visto que a fonte já supria normalmente esses trechos.

Em relação à falta em *T12*, o sistema tem que analisar a ampacidade do trecho *T10* e da capacidade de fornecimento da subestação *AGF* devido ao acréscimo da carga presente em *T11*, antes alimentado por AQZ.

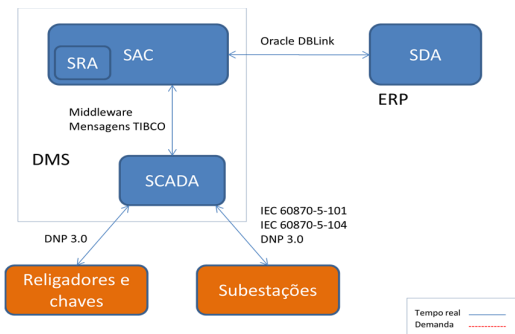
A velocidade de resposta do SRA é quase instantânea, dessa forma, a recomposição em um sistema real ficaria limitado ao tempo gasto na comunicação entre os equipamentos de campo.

Como já comentado, a informação da quantidade de clientes desenergizados é fornecido nessa tela do programa. Nesse estudo de caso, dos 12612 clientes desenergizados inicialmente, pôde-se recompor energia para aproximadamente 75 % destes, totalizando 9469 clientes não afetados.

VIII. INTEGRAÇÃO, IMPLANTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SRA

O SRA está sendo implantado no centro de controle do sistema (CCS) da Coelce integrado ao Sistema de Apoio à Condução (SAC), conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – SRA integrado ao Sistema de Gerenciamento da Distribuição (DMS) da Coelce.



A integração entre o SRA e o DMS da Coelce é baseada na norma IEC 60870-6 (ICCP). O protocolo ICCP é utilizado para comunicação entre centros de controle entre aplicações em um mesmo centro de controle. O sistema DMS da Coelce é composto principalmente pelo SCADA, que faz a comunicação com as UTRs de subestações e religadores e pelo SAC, que, entre outras funções, recebe as informações do SCADA, organiza de acordo com as interligações do sistema elétrico e disponibiliza uma interface gráfica para o usuário. O protocolo ICCP foi escolhido por estar disponibilizado no SAC e por ser um protocolo padrão de mercado, facilitando a implementação.

A implementação do SRA encontra-se atualmente na fase de testes de integração e já apresenta resultados promissores para aplicação no CCS da Coelce.

IX. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado o estágio atual de desenvolvimento do Piloto de Redes Inteligentes para Automação do Sistema Elétrico de Distribuição da Cidade de Aquiraz, pertencente à Companhia Energética do Ceará - Coelce. O SRA modelado em Redes de Petri Colorida e desenvolvido em C# foi testado em modo *off-line* através de um sistema simulador desenvolvido para este fim apresentando bom desempenho. Está em curso o desenvolvimento da integração do SRA ao sistema SCADA no Centro de Controle do Sistema da Coelce.

Os resultados obtidos nas simulações *off-line* demonstram que o SRA apresenta bom desempenho, proporcionando rapidez e confiabilidade na recomposição da rede elétrica de Aquiraz. Para a recomposição da rede elétrica são consideradas restrições operativas tipo ampacidade dos cabos, capacidade disponível das subestações supridoras, o número de clientes desenergizados, a potência não disponível e a presença de clientes especiais.

O SRA traz grandes benefícios em especial à concessionária, aos usuários da rede elétrica e toda a cadeia de provedores de equipamentos inteligentes para a rede elétrica e rede de comunicação.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] F. L. M. Antunes, J. B. Almada, J. V. C. Barros, R. F. Sampaio, R. S. dos Anjos, R. P. S. Leão, C. Cavalcanti, K. Beltrão, M. de M. Santos,

A. da R. Abaide, E. Soriano, J. J. Coura, M. de O. Costa, S. Souza, Redes elétricas inteligentes: contexto nacional. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação (CGEE)/ Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Série Documentos Técnicos. Outubro 2012. N°16.

[2] R. F. Sampaio, J. V. C. Barros, R. P. S. Leão, G. C. Barroso, R. M. Araújo, R. P. S. L., G. C. Barroso, E. B. de Medeiros, K. M. Canuto, J. G. Silveira, K. Queiroz, F. A. Barros, A. L. E. Valentim, L. E. P. Formiga, J. R. Bezerra, R. A. P. da Silva, T. N. S. Pontes, L. S. Melo, L. M. Ferreira, C. F. V. de Oliveira, M. B. Sá. Metodologia para Desenvolvimento de um Sistema de Reposição Automática para um Projeto Piloto de Redes Inteligentes. In: XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. SENDI 2012. Rio de Janeiro - RJ – Brasil.

[3] C. J. S. MOURA. “Estudo para Implantação de um Sistema de Recomposição Automática para a Rede de Distribuição do Campus do Pici”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2010, 73p.

[4] K. M. CANUTO, G. C. Barroso, M. P. S. Neto, R. F. Sampaio, R. P. S. Leão, E. B. de Medeiros. Fluent Restoration Modelling Applied to a Real Power System Using Colored Petri Nets. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2012, Santiago de Compostela (Spain). European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality - ICREPQ'12, 28th to 30th March 2012.

[5] A. T. OHARA. Sistema de Recomposição Automática de Redes de Distribuição – A Aplicação Do Conceito de Self-Healing. VI CIERTEC 2009 Seminário Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica.

[6] T. D. Sudhakar, K. N. Srinivas. “Restoration of power network – a bibliographic survey” EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER Euro. Trans. Electr. Power 2011; 21:635–655.

[7] T. Murata. (April 1989). Petri Nets: properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE. Invited paper. Vol. 77, No. 4, pp. 541-580.

[8] K. Jensen, and L. M. Kristensen, *Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems*, New York, Springer, 2009, pp 384.

[9] Christos G. Cassandras and Stephane LaFortune. 2008. Introduction to Discrete Event Systems. Springer.

[10] J. D. Ullman, Elements of ML Programming. Prentice Hall, 1998.