# 1. Considerações Iniciais

#### 1.1. Introdução

Todas as subestações possuem algum tipo de automação, cuja complexidade depende da sua estrutura e da sua importância no sistema elétrico no qual estão inseridas. No passado eram utilizados dispositivos puramente analógicos e simples ligações elétricas que enviavam pulsos de comando para os dispositivos. Com o desenvolvimento da eletrônica e dos sistemas digitais houve a evolução dos equipamentos secundários, que deixaram de ser eletromecânicos e passaram a ser digitais. Tal evolução tornou possível a criação de diversos IEDs para a implementação de SASs. Estes IEDs, para trocarem informações entre si, utilizam um canal serial, sendo os dados transmitidos de forma digital por meio de um protocolo.

Fisicamente, podemos estruturar os dispositivos que compõe um SAS em diferentes níveis, cada um com sua função, sendo classificados em nível de processo, de *bay* e de subestação, conforme mostra a Figura 1.

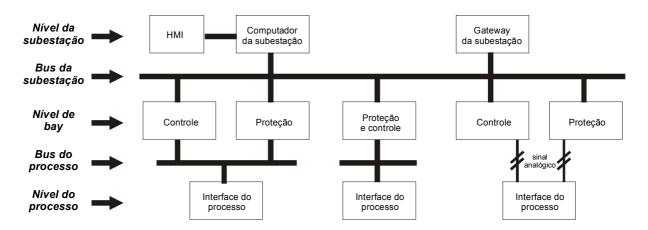


Figura 1: Comunicação serial nos vários níveis que compõe uma subestação

Os sinais entre os níveis de processo e de *bay* (como comando de abertura de disjuntor, valor de corrente lido pelo TC), que são denomidados "sinal analógico", passaram a ter a opção de utilizar um canal de comunicação digital para a troca de informação.

Os dispositivos do nível de processo são tipicamente I/O remotos, sensores inteligentes (como TC e TP convencionais ou com interface em fibra ótica) e atuadores (disjuntores e seccionadoras).

Os dispositivos do nível de *bay* consistem em unidades de medição, proteção e controle, tais como relés de proteção, medidores de energia e oscilógrafos.

Os dispositivos do nível de subestação consistem em computadores da subestação com um banco de dados, a IHM para o operador, interfaces que geram *links* para outras subestações, etc.

A interligação dos diversos níveis é feita nos *buses* (*bus* da subestação e *bus* do processo) de forma digital (comunicação serial com protocolo implementado) ou convencional (sinais analógicos para disparo da bobina do disjuntor, sinal analógico vindo de TCs convencionais).

Na intenção de integrar seus equipamentos, cada fabricante acabou desenvolvendo seu próprio protocolo de comunicação, muitos deles proprietários, o que acabou criando no mercado diversos protocolos como o DNP, MODBUS, LON, PROFIBUS, FIELDBUS, etc. Portanto, para se interligar equipamentos de diferentes fabricantes, não existe outra forma senão a utilização de complicados e caros conversores de protocolo, como mostra a Figura 2.

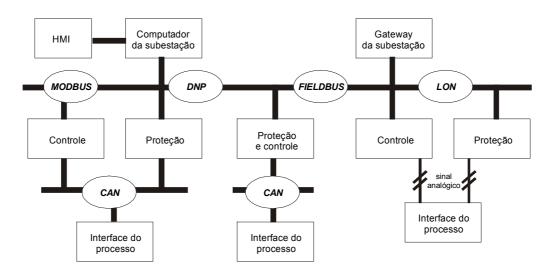


Figura 2: Sistema de automação da subestação com seus diversos protocolos

Embora essa configuração ofereça a estrutura de comunicação para a automação da subestação, diversos requisitos que seriam interessantes de ser atingidos não o são. Dentre eles podemos destacar:

*Interoperabilidade*: é a habilidade dos IEDs de vários fabricantes de poderem trocar informações entre si e utilizá-las para desempenhar suas próprias funções, sem a necessidade de conversores de protocolo.

Liberdade de configuração: a configuração adotada deveria suportar diferentes filosofias e permitir liberdade na alocação de funções, tanto de uma maneira mais centralizada (um IED desenvolver várias funções) quanto decentralizada (os IEDs trocam informações entre si para desempenhar uma determinada função).

Estabilidade a longo prazo: a configuração adotada também deve permitir atualizações, facilitando, por exemplo, a inserção de novas funções ou novos dispositivos no SAS.

A experiência demonstrou, portanto, a necessidade e a oportunidade de se desenvolver um protocolo de comunicação padrão, que propicie a interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes.

Foi deste esforço que resultou a criação da norma IEC 61850. Para que tais requisitos fossem atingidos, a IEC61850 utilizou três métodos: decomposição em funções, fluxo de dados e modelagem da informação.

A decomposição em funções é utilizada para compreender a relação lógica entre os componentes de uma função distribuída, e está presente em termos de nós lógicos que descrevem as funções, subfunções e interfaces.

O fluxo de dados é utilizado para compreender as interfaces de comunicação que devem suportar a troca de informações entre componentes funcionais distribuídos e os requisitos de performance funcionais.

A modelagem da informação é usada para definir a sintaxe abstrata e as semânticas das trocas de informação, e está presente em termos de classes e tipos de objetos, atributos, métodos de objetos abstratos (serviços) e suas relações.

Pode-se dizer, portanto, que a IEC 61850 não é somente um modelo de protocolo, pois cobre não apenas a comunicação, mas também propriedades das ferramentas de engenharia utilizadas e medições para gerenciamento da qualidade e da configuração do SAS.

#### 1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são apresentar um estudo da norma IEC 61850, uma análise comparativa entre o IEC 61850 e os protocolos utilizados atualmente e ensaios de duas funções de proteção: a falha de disjuntor e o bloqueio reverso.

No estudo da norma será feita uma introdução aos principais conceitos utilizados por ela com o objetivo de familiarizar o leitor a cada um deles.

Para a análise comparativa foi escolhido o protocolo DNP3, um dos mais utilizados no setor elétrico. Será feita uma abordagem considerando três aspectos: *stacks* de comunicação, modelo de dados e modelo de serviços. Os objetivos são apontar as principais diferenças entre eles e eventuais vantagens e desvantagens de cada um.

Nos ensaios serão mostradas, para cada modelo duas funções de proteção ensaiadas, uma proposta de implementação usando serviços de alta performance da IEC 61850 e uma proposta usando interligações convencionais, com a intenção de analisar o desempenho de cada uma delas. Visando uma análise independente do software do fabricante dos relés e com metodologia similares para efeito de comparação, a proposta apresentada será fazer todas as medições de tempo de atuação utilizando a mala de testes da OMICRON modelo CM256. Será analisada também a resposta das funções implementadas frente a problemas de comunicação entre os dispositivos.

### 2. Estudo da norma IEC 61850

Neste capítulo é apresentada uma introdução dos principais conceitos utilizados pela norma para se atingir os três objetivos mencionados anteriormente: interoperabilidade, liberdade de configuração e estabilidade a longo prazo. Devido à complexidade de alguns destes conceitos para uma análise mais detalhada de cada um deles, que não é o objetivo deste estudo, recomenda-se a leitura da norma IEC 61850 na íntegra ou de publicações especializadas no tema.

Por meio da leitura da norma e de diversos artigos publicados sobre o tema pode-se constatar que a IEC 61850 utiliza basicamente quatro conceitos para atingir seus objetivos: nós lógicos, dados estruturados, Linguagem SCL e mapeamento de serviços abstratos para protocolos. A seguir é feita uma introdução de cada um deles.

### 2.1. Nós Lógicos

Todas as funções, seja de automação, proteção ou medição, são decompostas em nós lógicos. Estas funções podem residir fisicamente em um ou mais dispositivos físicos.

Assim, num SAS, as informações são trocadas entre todos os IEDs que compõem o sistema. Mais exatamente, os dados são trocados entre as funções residentes nos dispositivos. A menor parte da função que troca dados é chamada nó lógico. A Figura 3 ilustra este conceito.



Figura 3: Nós lógicos e IEDs: sua localização e a troca de dados

A IEC 61850 define um total de 92 nós lógicos. Eles são identificados por um acrônimo de quatro letras que possui uma sintaxe sistemática. Por exemplo:

PDIF: Proteção Diferencial

**XCBR**: Disjuntor

#### YPTR: Transformador de Potência

Os nós lógicos foram agrupados em categorias, conforme mostra a Tabela 1. O grupo o qual pertencem pode ser identificado observando-se a inicial do seu acrônimo.

Inicial	Grupo	Número de
		nós lógicos
L	Nós lógicos do sistema	3
P	Proteção	28
R	Nós lógicos relacionados à proteção	10
С	Controle	5
G	Genéricos	3
I	Interfaceamento e arquivamento	4
A	Controle automático	4
M	Medição	8
S	Sensoreamento e monitoração	8
X	Chaveamento	2
T	Transformadores de instrumentação	2
Y	Transformadores de potência	4
Z	Equipamentos adicionais do sistema de potência	15
	Número total de nós lógicos	92

Tabela 1: Grupos de nós lógicos

A lista completa dos nós lógicos, bem como seu acrônimo correspondente IEEE C37.2-1996 (número ANSI) e sua descrição são feitos na IEC 61850-5.

Além dos dados referentes à implementação das funções, existem alguns dados a serem comunicados que não se referem a nenhuma função, mas ao próprio dispositivo físico, como informações de seu nome de identificação ou o resultado da auto-supervisão do dispositivo. Portanto, um nó lógico para isso se torna necessário e é denominado LLNO.

O exemplo da Figura 4 mostra a decomposição de duas funções em nós lógicos.

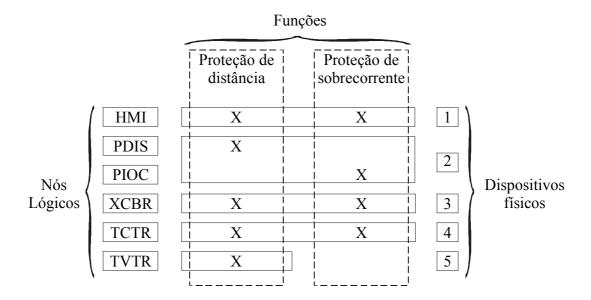


Figura 4: Exemplo de aplicação do conceito de nó lógico

Supondo um sistema de potência com as seguintes funções a ser implementadas:

- a) proteção de distância
- b) proteção de sobrecorrente

Estas funções podem ser decompostas nos seguintes nós lógicos:

- 1) HMI: interface homem máquina
- 2) PDIS: proteção de distância
- 3) PIOC: proteção de sobrecorrente instantânea
- 4) XCBR: disjuntor
- 5) TCTR: transformador de corrente
- 6) TVTR: transformador de tensão

O nó lógico LLNO, que sempre está contido em qualquer dispositivo físico, foi omitido.

A alocação destes nós lógicos nos dispositivos físicos, indicados na Figura 4, pode ser feita da seguinte forma:

1) Computador da estação

- 2) Relé de distância com unidade de sobrecorrente integrada
- 3) Disjuntor
- 4) Transformador de corrente
- 5) Transformador de tensão

Percebe-se que as funções, na maioria das vezes, são executadas por mais de um nó lógico e que estes nós lógicos necessariamente não precisam estar no mesmo dispositivo físico. Por exemplo, a função de sobrecorrente é executada por quatro nós lógicos que estão presentes em quatro dispositivos físicos diferentes. Também que um mesmo dispositivo físico pode conter mais de um nó lógico, neste caso o dispositivo 2.

#### 2.2. Dados Estruturados

Os nós lógicos fornecem diversas informações, denominadas pela norma de dados, que seguem um modelo de dados estruturado. Esse dado é mais que um simples ponto, ele é constituído de diversos atributos, denominados pela norma de atributos do dado.

Um exemplo de estrutura dos dados de um nó lógico é mostrado na Figura 5. Neste exemplo é mostrada a estrutura de dados do nó lógico XCBR. Percebe-se que suas informações seguem uma estrutura em árvore, na qual num primeiro nível estão os dados. O dado *Pos*, por exemplo, traz informações referentes ao controle do disjuntor, como sua posição atual. Conforme foi mencionado anteriormente cada dado possui uma série de atributos. O atributo *stVal*, por exemplo, informa o estado em que se encontra o disjuntor: fechado, aberto ou defeituoso.

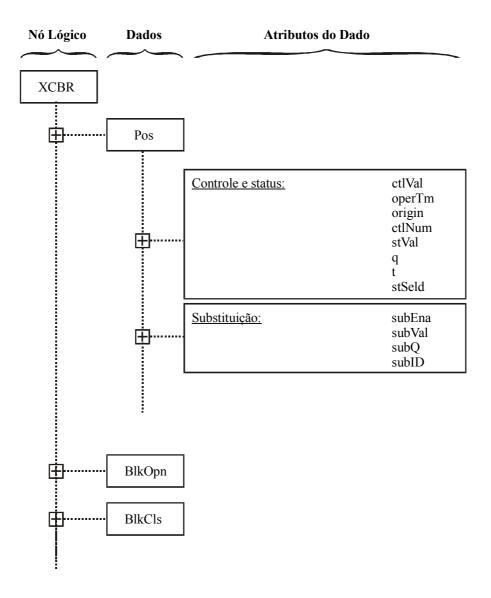


Figura 5: Estrutura em árvore dos dados do nó lógico XCBR contendo os atributos do dado

Na elaboração da norma observou-se que os atributos de dados para o dado *Pos* do nó lógico XCBR também poderiam ser encontrados em outras aplicações específicas para chaveamento. Isso ocorreu também para outros nós lógicos. Desta forma, definiram-se vários modelos padronizados de atributos de dados, chamados pela norma de Classe de Dados Comum (ou CDC). O set de dados utilizado é definido pela norma como Classe de Dados. Assim, no caso do dado *Pos* a Classe de Dados utilizada é a DPC (*Controllable Double Point*). Na IEC 61850-7-3 pode ser encontrada a lista completa de todas as CDCs. Essa forma de padronização oferece um esquema simples para definir todos os tipos de dados na norma.

Portanto, as IEC 61850-7-1, IEC 61850-3 e IEC 61850-7-4 definem os modelos de dados utilizados para a comunicação no sistema de automação de subestações. A seguir o SAS tem seus dispositivos físicos transformados em dispositivos lógicos utilizando os nós lógicos. Os

nós lógicos e os dados neles contidos são definidos na IEC 61850-7-4. Para a definição destes dados são utilizadas as classes de dados seguindo as CDCs especificadas na IEC 61850-7-3. A IEC 61850-7-4 define 92 nós lógicos fazendo uso de aproximadamente 450 classes de dados.

As IECs 61850-7-x fazem uso de tabelas para a definição dos nós lógicos e das classes de dados comuns, conforme pode ser observado na Tabela 2 e na Tabela 3, extraídas da norma, que definem respectivamente o nó lógico do tipo XCBR e a classe de dados comum do tipo DPC. O DPC é utilizado, por exemplo, para especificar o dado *Pos* na definição do nó lógico XCBR.

XCBR class						
Attribute Name	Attr. Type	Explanation	Т	M/O		
LNName		Shall be inherited from Logical-Node Class (see IEC 61850-7-2)				
Data						
Common Logical	Node Inform	ation				
		LN shall inherit all Mandatory Data from Common Logical Node Class		М		
Loc	SPS	Local operation (local means without substation automation communication, hardwired direct control)		М		
EEHealth	INS	External equipment health		0		
EEName	DPL	External equipment name plate		0		
OpCnt	INS	Operation counter		М		
Controls						
Pos	DPC	Switch position		М		
BlkOpn	SPC	Block opening		М		
BlkCls	SPC	Block closing		М		
ChaMotEna	SPC	Charger motor enabled		0		
Metered Values	•					
SumSwARs	BCR	Sum of Switched Amperes, resetable		0		
Status Information	n					
СВОрСар	INS	Circuit breaker operating capability		М		
POWCap	INS	Point On Wave switching capability		0		
МахОрСар	INS	Circuit breaker operating capability when fully charged		0		
		+	_			

Tabela 2 : Definição do nó lógico do tipo XCBR

DPC class						
Attribute Name	Attribute Type	FC	TrgOp	Value/Value Range	M/O/C	
DataName	Inherited from Data Class (see IEC 61850-7-2)					
DataAttribut	ie					
			control a	and status		
ctlVal	BOOLEAN	CO		off (FALSE)   on (TRUE)	AC_CO_M	
operTm	TimeStamp	CO			AC_CO_O	
origin	Originator	CO, ST			AC_CO_O	
ctlNum	INT8U	CO, ST		0255	AC_CO_O	
stVal	CODED ENUM	ST	dchg	intermediate-state   off   on   bad-state	М	
q	Quality	ST	qchg		М	
t	TimeStamp	ST			М	
stSeld	BOOLEAN	ST	dchg		AC_CO_O	
			subst	titution		
subEna	BOOLEAN	SV			PICS_SUBST	
subVal	CODED ENUM	SV		intermediate-state   off   on   bad-state	PICS_SUBST	
subQ	Quality	SV			PICS_SUBST	
subID	VISIBLE STRING64	SV			PICS_SUBST	
		configura	tion, desci	ription and extension		
pulseConfig	PulseConfig	CF			AC_CO_O	
ctlModel	CtlModels	CF			М	
sboTimeout	INT32U	CF			AC_CO_O	
sboClass	SboClasses	CF			AC_CO_O	
d	VISIBLE STRING255	DC		Text	0	
dU	UNICODE STRING255	DC			0	
cdcNs	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLNDA_M	
cdcName	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLNDA_M	
dataNs	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLN_M	
Services						
As defined in 1	Table 31					

Tabela 3: Definição do CDC do tipo DPC

## 2.3. Linguagem SCL

Para garantir a interoperabilidade entre todos os IEDs de uma subestação, constatou-se a necessidade de uma descrição formalizada do SAS com todos os links de comunicação existentes, de modo a garantir a compatibilidade na troca de informações dos IEDs entre eles e entre as ferramentas de engenharia (programas) utilizadas no processo de automação da SAS.

Para isso definiu-se uma linguagem padronizada de configuração de subestações chamada Linguagem de descrição da Configuração da Subestação ou Linguagem SCL. Ela tem como bases a Linguagem XML (versão 1.0) e a Linguagem UML e é definida pela IEC 61850-6.

O âmbito da Linguagem SCL, conforme definido na IEC61850-6, é claramente restrito aos seguintes aspectos:

- 1) especificação funcional do sistema de automação da subestação
- 2) descrição das configurações dos IEDs
- 3) descrição do diagrama unifilar da subestação

#### Para isto definiu-se:

- um modelo de objetos que descreva os IED, suas conexões de comunicação e a sua distribuição na subestação
- um formato padronizado para descrever como este modelo de objetos deve ser representado em arquivos a serem trocados entre as ferramentas de engenharia

Desta forma, primeiramente modelou-se todos os componentes que descrevem o SAS (níveis de tensão, transformadores, IEDs, nós lógicos, etc) como objetos, por intermédio de modelos estabelecidos pela Linguagem UML. A Figura 6 mostra um trecho do esquema UML que traz a informação dos objetos que compõem um arquivo SCL, por exemplo o *tSubstation*, e contém dentro dele informações como os níveis de tensão existentes e o diagrama unifilar da subestação.

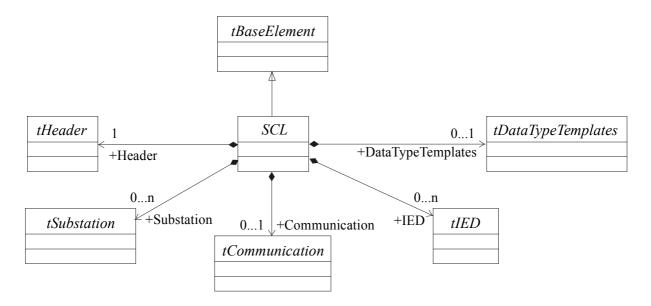


Figura 6: Fragmento de esquema UML utilizado pela Linguagem SCL

Definido o modelo de objetos, o próximo passo foi descrever este modelo em um formato padronizado que possa ser representado em arquivos a serem trocados pelas ferramentas de engenharia. Para isso utilizou-se a Linguagem XML.

```
<Terminal ease:origin="A" connectivityNode="S1/V1/BB2/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="BB2" cNodeName="1" xmlns:ease=...</p>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    <Terminal ease:origin="B" connectivityNode="S1/V1/BB3/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="BB3" cNodeName="1" xmlns:ease=...</p>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             <Terminal ease:origin="B" connectivityNode="S1/V1/BB2/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="BB2" cNodeName="1" xmlns:ease=...</p>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           <Terminal ease:origin="A" connectivityNode="S1/V1/BB1/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="BB1" cNodeName="1" xmlns:ease...</p>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           <Terminal ease:origin="A" connectivityNode="S1/V1/B1/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="B1" cNodeName="1" xmlns:ease=...</p>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             <Terminal ease:origin="B" connectivityNode="S1/V1/B1/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="B1" cNodeName="1" xmlns:ease=...</p>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  <Terminal ease:origin="B" connectivityNode="S1/V1/B2/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="B2" cNodeName="1" xmlns:ease=...</p>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 <Terminal ease:origin="A" connectivityNode="S1/V1/B2/1" substationName="S1" voltageLevelName="V1" bayName="B2" cNodeName="1" xmlns:ease...</p>
                                                             <VoltageLevel sxy:x="10" sxy:y="28" name="V1" xmlns:sxy="http://www.iec.ch/61850/2003/SCL.coordinates">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         <ConductingEquipment sxy:x="107" sxy:y="20" name="CT1" type="CTR">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  <ConductingEquipment sxy:x="62" sxy:y="10" name="CT2" type="CTR">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             <ConductingEquipment sxy:x="108" sxy:y="65" name="A" type="CBR">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             <ConductingEquipment sxy.x="61" sxy.y="55" name="B" type="CBR">
                                                                                                                                                                                                 <ConnectivityNode sxy:x="-10" sxy:y="10" name="1"/>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            <Bay sxy:x="363" sxy:y="290" name="BB2">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              <Bay sxy:x="226" sxy:y="574" name="BB3">
                                                                                                                      <Bay sxy:x="229" sxy:y="17" name="BB1">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                <Bay sxy:x="272" sxy:y="320" name="B2">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                <Bay sxy:x="267" sxy:y="33" name="B1">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          <ConnectivityNode name="1" />
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            <ConnectivityNode name="1" />
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 <ConnectivityNode name="1" />
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 <ConnectivityNode name="1" />
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               </ConductingEquipment>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    </ConductingEquipment>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        </ConductingEquipment>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               </ConductingEquipment>
<Substation name="S1">
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          </VoltageLevel>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                </Substation>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 </Bay>
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       </Bay>
```

Figura 7: Fragmento de código XML utilizado pela Linguagem SCL

A Figura 7 traz um trecho de código XML utilizado para definir o objeto *tSubstation*. Nele se observa o objeto *VoltageLevel*, que define os níveis de tensão presentes na subestação e os objetos que estão conectados a ele.

Com base nos esquemas UML definidos e com todos os elementos que o compõe gerados em XML podemos gerar os Arquivos de Descrição SCL, compostos por estes elementos. Estes arquivos são utilizados na composição do processo de engenharia pretendido com o uso da Linguagem SCL, que é ilustrado pela Figura 8. Os Arquivos de Descrição SCL criados podem ser de 4 tipos:

- Descrição das características do IED (sua extensão é .ICD): Este arquivo descreve as características de um IED, permitindo a troca de dados da ferramenta de configuração do IED com a ferramenta de configuração do sistema.
- Descrição de especificação do sistema (sua extensão é .SSD): Este arquivo descreve o diagrama unifilar da subestação e os nós lógicos exigidos, permitindo a troca de dados da ferramenta de especificação do sistema com a ferramenta de configuração do sistema.
- Descrição de configuração da subestação (sua extensão é .SCD): Este arquivo descreve por completo a configuração do processo, permitindo a troca de dados da ferramenta de configuração do sistema com as ferramentas de configuração dos IED.
- Descrição do IED configurado (sua extensão é .CID): Este arquivo descreve um IED configurado dentro de um projeto, permitindo a troca de dados da ferramenta de configuração do IED com o IED. É um arquivo SCD reduzido, contendo somente as informações necessárias ao IED.

A ferramenta de configuração do IED é uma ferramenta específica do fabricante do equipamento capaz de gerar arquivos de configuração específicos do IED ou configurar o IED. É importante observar que um IED somente poderá ser considerado compatível com a IEC 61850 se ele vier acompanhado ou por um arquivo ICD que descreva suas características ou por uma ferramenta capaz de gerar este arquivo ICD (ferramenta de configuração do IED) e seja ou capaz de utilizar um arquivo SCD do sistema diretamente ou vir acompanhado de

uma ferramenta capaz de importar este arquivo SCD e configurá-lo (ferramenta de configuração do IED).

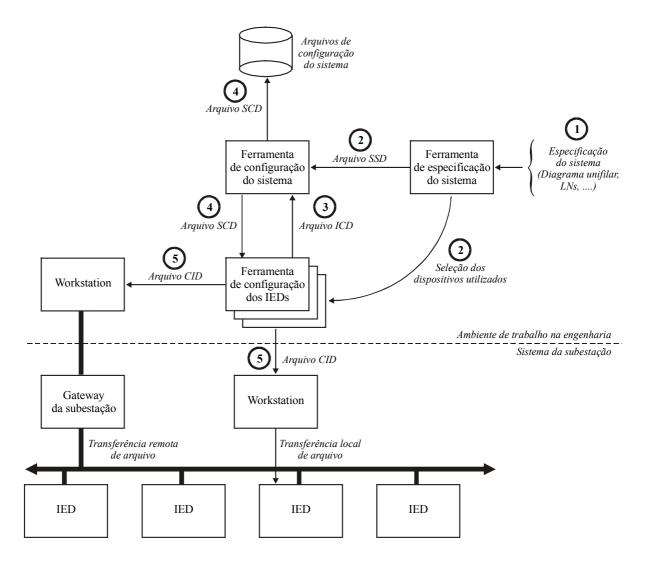


Figura 8: Modelo de referência para o fluxo de informações no processo de engenharia com a Linguagem SCL

A ferramenta de especificação do sistema é uma ferramenta capaz de, a partir de uma dada especificação do sistema (diagrama unifilar, nós lógicos utilizados, diagrama dos alimentadores, etc), gerar o arquivo que contenha as especificações da subestação (arquivo .SSD).

A ferramenta de configuração do sistema é uma ferramenta independente dos IEDs utilizados que deve ser capaz de importar arquivos ICDs de diversos IEDs e arquivo SSD de especificação do sistema que serão utilizados pelo engenheiro para gerar as informações do sistema que serão compartilhadas pelos diferentes IEDs. Esta ferramenta gera um arquivo

SCD do sistema que será utilizado pela ferramenta de configuração do IED para configurar as características do IED relacionados ao sistema configurado pela ferramenta de configuração do sistema.

Observa-se ainda que a norma prevê três formas de transferência dos dados de configuração do IED produzidos pela ferramenta de configuração do IED:

- via transferência local de arquivo por meio de uma workstation conectada localmente no IED;
- via transferência remota de arquivo por meio do método de transferência de arquivo da IEC 61850-7-2;
- via serviços de parametrização e configuração de dados definidos pela IEC 61850-7-2.

#### 2.4. Mapeamento de Serviços Abstratos Para Protocolos

Antes de partir para a definição concreta dos protocolos utilizados para a comunicação entre os nós lógicos, a norma especifica modelos de comunicação abstratos que auxiliam na definição dos serviços disponibilizados pelos protocolos. Estes modelos são chamados Modelos de Interface dos Serviços de Comunicação Abstratos ou modelos ACSI e são definidos utilizando-se técnicas de modelagem por objeto.

Os modelos ACSI fazem uso de dois modelos de comunicação:

- Modelo de comunicação cliente-servidor, nos quais encontramos serviços como controle ou leitura de valores;
- Modelo de comunicação *peer-to-peer multicast*, nos quais encontramos os serviços GSE, utilizados em casos em que o tempo é crítico, como na troca de dados entre IEDs de proteção, no envio de dados de um IED para vários outros IEDs e na transmissão de valores amostrados.

Com base nestes dois modelos de comunicação, os modelos ACSI definem os serviços de comunicação. Eles formam 14 grandes grupos de modelos de serviço, conforme observado na Tabela 4. A primeira coluna contém o nome do grupo, a segunda coluna contém uma

descrição resumida do grupo e a terceira coluna contém os serviços disponibilizados por cada modelo.

Grupos	Descrição	Serviços Disponíveis
Servidor	Representa o comportamento visível externo	GetServerDirectory
	de um dispositivo	
Associação de	Define como dois ou mais dispositivos	Associate
Aplicação	podem ser conectados (two-party e multicast)	Abort
	e também o controle nas formas de acesso a	Release
	um determinado dispositivo	
Dispositivo	Representa um grupo de funções agrupadas	GetLogicalDeviceDirectory
Lógico	como um dispositivo lógico	
Nó Lógico	Representa uma função específica do sistema	GetLogicalNodeDirectory
	de subestação, por exemplo, proteção de	GetAllDataValues
	sobretensão	
Dados	Define um meio para especificar informações	GetDataValues
	a serem alteradas, por exemplo, posição de	SetDataValues
	uma chave com informação de qualidade, e	GetDataDefinition
	timestamp	GetDataDirectory
Set de Dados	Permite agrupar vários dados juntos	GetDataSetValue
		SetDataSetValue
		CreateDataSet
		DeleteDataSet
		GetDataSetDirectory
Substituição	O cliente pode requisitar ao servidor para	SetDataValues
	repor um valor do processo por um valor	GetDataValues
	selecionado pelo cliente, por exemplo, no	
	caso de um valor de medição inválido	
Configuração do	Define como mudar de um grupo de valores	SelectActiveSG
Grupo de	de configuração para outro e como editar tais	SelectEditSG
Controle	grupos	SetSGValues
		ConfirmEditSGValues
		GetSGValues
		GetSGCBValues

Notificação ou	Descreve as condições para se gerar	Buffered RCB:
Log	notificações automáticas, sejam periódicas	Report
	ou disparadas por eventos (mudança de	GetBRCBValues
	variáveis do processo, por exemplo) e o	SetBRCBValues
	registro de eventos.	
		Unbuffered RCB:
	As notificações podem ser enviadas	Report
	imediatamente (Unbuffered) ou não	GetURCBValues
	(Buffered).	SetURCBValues
		Log CB:
		GetLCBValues
		SetLCBValues
		QueryLogByTime
		QueryLogAfter
		GetLogStatusValues
Eventos	Provê uma rápida e confiável distribuição de	GOOSE CB:
Genéricos da	dados; troca de status binários dos IEDs no	SendGOOSEMessage
Subestação	modelo de comunicação peer-to-peer.	GetGoReference
(GSE)		GetGOOSEElementNumber
	Eventos genéricos da subestação orientados a	GetGoCBValues
	objeto (GOOSE): suporta a troca de uma	SetGoCBValues
	vasta gama de dados comuns organizados	
	por uma DATA-SET	GSSE CB:
		SendGSSEMessage
	Evento genérico de estado da subestação	GetGsReference
	(GSSE): provê a capacidade de transferir as	GetGSSEElementNumber
	mudanças de estado	GetGsCBValues
		SetGsCBValues

Transmissão de	Rápida e cíclica transferência de amostras,	Multicast SVC:
valores	por exemplo, de transformadores de	SendMSVMessage
amostrados	instrumentação.	GetMSVCBValues
		SetMSVCBValues
		Unicast SVC:
		SendUSVMessage
		GetUSVBCBValues
		SetUSVCBValues
Controle	Descreve os serviços para controlar, por	Select
	exemplo, dispositivos ou grupos de	SelectWithValue
	parâmetros de configuração.	Cancel
		Operate
		CommandTermination
		TimeActivatedOperate
Tempo e	Provê a base de tempo para o dispositivo e o	TimeSynchronization
sincronização de	sistema	
tempo		
Transferência	Define a troca de blocos de dados como	GetFile
de arquivo	arquivos	SetFile
		DeleteFile
		GetFileAttributeValues

Tabela 4: Grupos de serviço do modelo ACSI

A definição completa dos modelos de serviços e dos serviços disponíveis por cada modelo podem ser encontrada na IEC61850-7-2.

A partir da definição dos serviços de comunicação em sua forma abstrata, pode-se partir para o mapeamento dos serviços de comunicação em sua forma real. Para implementar os serviços, objetos e algoritmos especificados nas IEC 61850-7-2, IEC 61850-7-3 e IEC 61850-7-4 a norma faz uso do Modelo de Referência OSI (ISO/IEC 7498-1) e de diversos protocolos padrões, dentre eles o MMS, o SNTP, o TCP/IP, etc. Para a decisão dos protocolos utilizados em cada serviço, é importante antes observar:

- a forma de utilização do Modelo de Referência OSI
- os requisitos de desempenho especificados

O Modelo de Referência OSI é um modelo baseado no conceito de camadas de comunicação sobrepostas, cada uma com uma função específica. São detalhadas no total 7 camadas que podem ser agrupadas em 2 perfis: Aplicação e Transporte, conforme Figura 9.

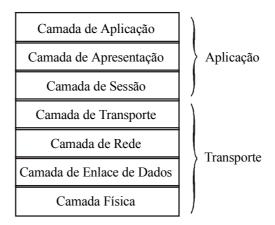


Figura 9: Modelo de referência OSI e os perfis de Aplicação e Transporte

As combinações de vários protocolos nas camadas que compõem cada perfil permitem a troca de diversas informações e a execução de serviços. Estes protocolos são normalizados pela IEC 61850 ou por outras normas. Na IEC 61850 eles são combinados de 4 formas diferentes, formando as seguintes configurações de protocolos:

- Cliente/Servidor
- GOOSE/GSE
- GSSE
- Sincronismo de tempo

Para a configuração Cliente/Servidor, por exemplo, são definidos os seguintes serviços e protocolos normalizados para o perfil de Aplicação, conforme Tabela 5.

Camada do	Especificação			
Modelo OSI				*
	Nome	Serviço	Protocolo	
Aplicação	Manufacturing Message Specification	ISO 9506-1:2003	ISO 9506-2:2003	M
	Association Control Service Element	ISO/IEC 8649:1996	ISO/IEC 8650:1996	M
Apresentação	Connection Oriented Presentation	ISO/IEC 8822:1994	ISO/IEC 8823-1: 1994	M
	Abstract Syntax	ISO/IEC 8824-1: 1999	ISO/IEC 8825-1	M
Sessão	Connection Oriented Session	ISO/IEC 8323:1996	ISO/IEC 8327- 1:1997	M

\* M - Mandatório / O - Opcional

Tabela 5: Serviços e protocolos utilizados pelo perfil de Aplicação da configuração Cliente/Servidor

Já para o perfil de Transporte, existem dois tipos de perfis: TCP/IP ou OSI, sendo que para estar em conformidade com a norma, no mínimo o perfil TCP/IP deve estar implementado. Os serviços e protocolos normalizados utilizados por cada perfil podem ser vistos na Tabela 6 e na Tabela 7:

Analisando as demais configurações de protocolo conclui-se que os protocolos utilizados pela IEC 61850 são padronizados e abertos, o que caracteriza a IEC 61850 como um conjunto de protocolos abertos e não proprietários.

Camada do	Especificação			M/O
Modelo OSI	Nome	Serviço	Protocolo	
Transporte	ISO Transport on top of TCP	_	11000010	M
	Internet Control  Message Protocol	RFC 792		M
	Transmission Control Protocol	RFC 793		M
Rede	Internet Protocol	RFC 791		M
	An Ethernet Address Resolution Protocol	RFC 826		M
Enlace de	Standard for the	RFC 894		M
Dados	transmission of IP datagrams over Ethernet networks			
	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection	ISO/IEC 8802-3:2001		M
Física	10Base-T/100Base-T	ISO/IEC 8802-3:2001		
(орçãо 1)	Interface connector and contact assignments for ISDN Basic Access Interface	ISO/IEC 8877:1992		
Física (opção 2)	Fibre optic transmission system 100Base-FX	ISO/IEC 8802-3:2001		
	Basic Optical Fibre Connector	IEC 60874-10-1, IEC 60874-10-3	60874-10-2 e IEC	

Tabela 6: Serviços e protocolos utilizados pelo perfil de Transporte (TCP/IP) da configuração Cliente/Servidor

Camada do Modelo OSI	Especificação			M/O
	Nome	Serviço	Protocolo	
Transporte	Connection Oriented Transport	ISO/IEC 8072:1996	ISO/IEC 8073:1997	M
Rede	Connectionless Network	ISO/IEC 8348:2002	ISO/IEC 8473- 1:1998 ISO/IEC 8473- 2:1996	M
	End System to Intermediate System	ISO/IEC 9542:1988		M
Enlace de	Logical Link Control	ISO/IEC 8802-2:1998		M
Dados	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection			M
Física	10Base-T/100Base-T	ISO/IEC 8802-3:2001		
(орçãо 1)	Interface connector and contact assignments for ISDN Basic Access Interface	ISSO/IEC 8877:1992		
Física	Fibre optic transmission	ISO/IEC 8802-3:2001	Į.	
(opção 2)	system 100Base-FX  Basic Optical Fibre  Connector	IEC 60874-10-1, IE 60874-10-3	C 60874-10-2 e IEC	

Tabela 7: Serviços e protocolos utilizados pelo perfil de Transporte (OSI) da configuração Cliente/Servidor

# 3. Análise Comparativa entre Protocolos

Neste capítulo será feita uma análise comparativa entre a IEC 61850 e o protocolo DNP3, um dos mais utilizados atualmente nos sistemas elétricos. Será apresentada uma breve introdução sobre o DNP3 e a seguir uma análise do protocolo DNP3 em relação ao IEC 61850, sob o ponto de vista de três aspectos: *stacks* de comunicação, modelo de dados e modelo de serviços.

### 3.1. Introdução

O protocolo DNP3 é um protocolo muito encontrado em SAS. Historicamente suas primeiras aplicações foram em sistemas de automação de companhias elétricas e de água. É também um protocolo aberto e sua documentação está disponível para qualquer um que se filiar ao *DNP User Group* (www.dnp.org). Sua estrutura documental básica compreende:

- DNP Basic 4: Data Link Layer
- DNP Basic 4: Transport Function
- DNP Basic 4: Application layer of the DNP Basic 4
- DNP Basic 4: Data Object Library of the DNP Basic 4

Dentre suas funcionalidades podemos destacar:

- Aquisição de dados digitais
- Aquisição de dados analógicos
- Aquisição, congelamento e *reset* de contadores
- Controles de saída digital
- Controles de saída analógica
- Informação de eventos digitais e analógicos

- Sincronismo de tempo
- Tratamento de eventos
- Transferência de arquivos

#### 3.2. Análise dos stacks de comunicação

Embora o DNP3 tenha sido originalmente desenvolvido para um perfil de link serial, o *DNP User Group* lançou novos perfis de comunicação que o habilitam a operar sobre perfis baseados em Ethernet.

Nestes perfis existem duas formas de conexão entre os IEDs: conexão orientada e sem conexão. A primeira é utilizada para suportar comunicações diretas, nas quais é criada uma conexão virtual entre dois IEDs, sendo que somente os dois irão se comunicar. Já a forma sem conexão é geralmente utilizada em mensagens *multicast* em que a mensagem é transmitida na rede e pode ser recebida por diversos IEDs. Ambos, o DNP3 e o IEC 61850, suportam as duas formas de conexão. Seus respectivos *stacks* podem ser resumidamente observados na Figura 10 e na Figura 11.

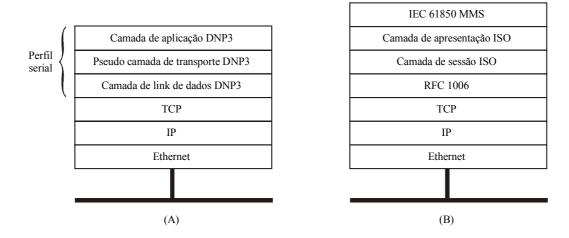


Figura 10: Stacks para o modo de conexão orientada do DNP3 (A) e IEC 61850 (B)

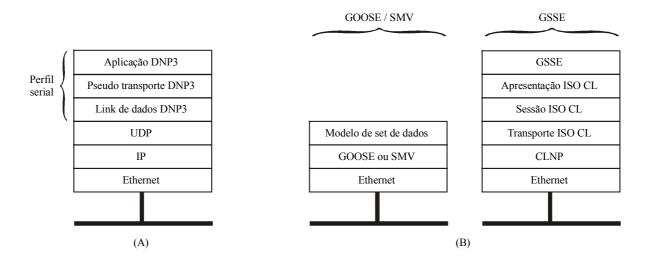


Figura 11: *Stacks* para o modo sem conexão do DNP3 (A) e IEC 61850 (B)

Conforme pode ser observado o DNP3, para ambos os modos de conexão, teve seu perfil serial originalmente feito para links seriais mapeado em TCP/IP ou UDP/IP para que pudesse operar sobre o padrão Ethernet.

#### 3.3. Análise dos modelos de dados

Ambos também definem vários objetos para representar as grandezas elétricas do sistema de potência. O DNP3, pelo fato de ser um protocolo com base em modelos de dispositivos RTU, representa as grandezas elétricas por meio de grandezas genéricas (entrada binária, entrada analógica, contador, saída analógica, etc) cabendo ao usuário determinar o que cada grandeza especificamente representa (valor da corrente da fase A, parâmetro dial de tempo do relé de sobrecorrente temporizado, contato auxiliar do relé do religador, sinalização de atuação pela unidade 59 do relé, etc). Seu modelo de dados compreende três partes:

- Objeto: Especifica o tipo de dado, representado por um número. Por exemplo, "Objeto
  1" representa dados do tipo Entrada Binária Estática, "Objeto 2" representa dados do
  tipo Entrada Binária por Evento.
- Variação: Especifica parâmetros opcionais presentes nas diversas variações de um determinado objeto. Por exemplo, "Objeto 1 Variação 1" indica que o tipo de Objeto 1 não tem inclusa a informação de *status*, "Objeto 1 Variação 2" indica que o tipo de Objeto 1 tem inclusa informação de *status*.

• Índice: Refere-se à identificação do objeto num *set* de objetos do mesmo tipo. Por exemplo, se um dispositivo possui 16 entradas analógicas, o número índice para acessá-las irá de 0 a 15.

Também é importante destacar o que chamamos de nível de implementação. O *DNP Users Group* identificou que nem todos os dispositivos precisam suportar todos os tipos de objetos especificados pelo DNP3. Alguns dispositivos são limitados em memória ou velocidade e não necessitam de todos os objetos para a função a que estão destinados a executar, enquanto outros dispositivos precisam suportar todos os objetos para executarem suas tarefas. Assim, classificou-se a complexidade dos dispositivos em 3 níveis. O nível 1 compreende somente as funções mais básicas enquanto as outras são opcionais, o nível 2 contém mais funções, grupos e variações e o nível 3 contém todas. A tabela que relaciona a implementação específica de cada um dos níveis pode ser encontrada na estrutura documental básica do DNP3.

Graças à representação de sua estrutura de dados por números (com 8 *bits* cada, portanto 1 *byte*) é possível com o DNP3 transmitir uma série de dados num único *frame*, tornando-o muito eficiente em links de comunicação serial com taxas de transmissão mais baixas.

Já a IEC 61850 não só define um modelo de objetos (modelo de dados orientado a objeto), mas também define rigorosamente a sua nomenclatura e a forma como estão agrupados, seguindo uma estrutura hierárquica. Resumidamente, seu modelo de dados consiste nos seguintes conceitos:

- Dispositivo Físico: Dispositivo físico (hardware) que contém os dados. É identificado por um endereço de rede;
- Dispositivo Lógico: Especifica um grupo de nós lógicos de mesma função. Por exemplo: proteção, medição, etc.
- Nó Lógico: Especifica um grupo de objetos que são funcionalmente relacionados. Por exemplo: "XCBR" disjuntor, "YPTR" transformador de potência, "PDIF" proteção diferencial, etc;
- Dados (Objetos): Especificam os dados. Por exemplo: "Pos" posição do disjuntor,
   "SumSwArs" valores medidos, etc;

- Atributos: Especificam os elementos individuais que compreendem um objeto. Por exemplo: "PhsAf" Valor em ponto flutuante para fase A, "q" flag de qualidade, "t" timestamp, etc.
- Estrutura hierárquica do modelo de dados: Todos os dados na IEC 61850 estão dispostos de forma hierárquica, o que acaba por padronizar a forma como estão relacionadas em funções, suas estruturas e a suas formas de acesso.

#### 3.4. Análise dos modelos de serviços

Os serviços suportados pelo DNP3 podem ser considerados, de forma geral, como um *subset* dos serviços disponíveis pelo IEC 61850. Um resumo deles pode ser visto na Tabela 8:

Descrição	DNP3	IEC 61850
Escrita/Leitura	OK	OK
Reporting	OK	OK
Controle	OK	OK
Controle melhorado (com Reports)	*	OK
Arquivos	OK	OK
Start/Stop	OK	*
Event Logs	*	OK
Substituição	OK	OK
Linguagem de Configuração de Subestação (SCL)	-	OK
Mensagens Peer-to-Peer (GOOSE/GSSE)	-	OK
Valores Amostrados (SMV)	-	OK

<sup>\*</sup> não constantes na norma mas podem ser implementados

Tabela 8: Comparação dos serviços

## 3.5. Considerações sobre a análise dos dois protocolos

A partir da análise dos dois protocolos serão feitos alguns comentários a respeito dos serviços disponíveis e da interoperabilidade entre dispositívos.

#### 3.5.1. Serviços Disponíveis

Analisando a lista de serviços conclui-se que, devido às características de alto nível dos protocolos utilizados pelo IEC 61850 e a sua alta performance (serviços GSE e SMV), alguns serviços não podem ser implementados no DNP3. Mais exatamente estas duas características tornaram possíveis a implementação de serviços para a troca de dados diretamente entre IEDs para a elaboração de funções dentro do SAS. O protocolo DNP3 foi projetado para que em seu barramento houvesse somente um mestre se comunicando com vários escravos. Quem sempre solicita as informações na rede é o mestre. Devido a esta limitação, para se implementar as funções de proteção e automação do SAS pela rede, é comum encontrar a estrutura da Figura 12.

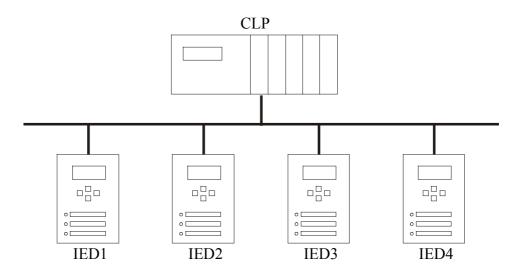


Figura 12: Estrutura de rede para implementação de funções no SAS

Nesta estrutura, o mestre da rede é um CLP dedicado à área de energia e os escravos são os IEDs, como relés de proteção, medidores e remotas. Para a implementação das funções o CLP realiza uma rápida varredura das variáveis de relevância nos IEDs e, na alteração do estado de alguma delas, executa o algorítmo da função dentro dele e envia o comando de resposta para o respectivo IED. Essa arquitetura pode ser encontrada, por exemplo, no sistema SICAM® da Siemens.

A importância da IEC 61850 neste cenário está na padronização, oferecendo uma solução robusta, eficiente e com interoperabilidade para a transmissão de comandos via rede nas implementações de funções no SAS. Além disso ela oferece a possibilidade de utilização do mesmo canal de comunicação serial para serviços de menor prioridade, como a leitura de

valores de potência de medidores ou de arquivos de oscilografia de oscilógrafos, sem o comprometimento da eficiência do sistema.

#### 3.5.2. Interoperabilidade entre Dispositívos

Outra característica da IEC 61850 está no ambiente de trabalho proposto pela Linguagem SCL, que foi criada com o objetivo de garantir a interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes. Conforme mencionado no estudo feito sobre a IEC 61850 a Linguagem SCL utiliza quatro tipos de arquivos:

- SSD, que representa a especificação dos equipamentos primários do sistema
- ICD, que representa as características de determinado IED
- SCD, que representa a especificação primária do sistema junto com as características de todos os IEDs
- CID, que representa as características de determinado IED de maneira resumida.

O modo como a IEC 61850 prevê o uso destes arquivos e das ferramentas de engenharia é mostrado com mais detalhes pelos seguintes procedimentos, enumerados de 1 a 5, na Figura 8.

- a partir de estudos, por exemplo, sobre a demanda que determinada subestação terá, da quantidade de linhas que irão ser conectadas, da quantidade de alimentadores necessários, etc. define-se a especificação dos equipamentos primários do sistema.
- 2) a partir disso, utiliza-se uma Ferramenta de Especificação do Sistema em que o diagrama unifilar da subestação contendo os equipamentos primários são representados de maneira normalizada pela IEC 61850 no arquivo SSD. Com a definição destes equipamentos primários são selecionados os demais dispositivos (os IEDs, como relés de proteção, medidores, etc.) que serão utilizados.
- 3) selecionados os IEDs, é feita a seguir a implementação das funções desejadas (proteção contra falha de disjuntor, bloqueio reverso, etc.) através da Ferramenta de Configuração do Sistema. Para que esta ferramenta consiga a interoperabilidade na implementação de funções entre IEDs de diferentes fabricantes, cada IED deve vir acompanhado de uma

Ferramenta de Configuração de IEDs capaz de fornecer um arquivo ICD contendo as características de seu IED. Assim, recebendo os arquivos ICD de todos os IEDs e o arquivo SSD, a Ferramenta de Configuração do Sistema possui, de forma padronizada, a especificação de toda a subestação e as características de todos os IEDs.

- 4) na Ferramenta de Configuração do Sistema são programadas as funções desejadas. Na implementação de uma função de bloqueio reverso, por exemplo, é programada a mensagem GOOSE de bloqueio que será enviada por um determinado IED e também os IEDs que estarão habilitados a receber esta mensagem, alterando portanto as configurações destes IEDs. Após isso, é gerado o arquivo SCD que contém as novas configurações dos IEDs alterados. Este arquivo deve ser lido pela Ferramenta de Configuração dos IEDs alterados para programá-los com as novas configurações. O arquivo SCD, que contém todas as informações do Sistema de Automação da Subestação pode ser então armazenado num banco de dados para a montagem de um histórico para eventuais análises no futuro.
- 5) a Ferramenta de Configuração do IED pode então separar somente as informações necessárias para programar seu IED e montá-las num arquivo CID que pode ser transferido de maneira local ou remota para o IED, programando-o com as novas configurações.

Portanto a Linguagem SCL acaba por padronizar o formato de todas as informações e o modo como elas serão utilizadas para a implementação de funções no SAS, garantindo desta forma a interoperabilidade entre IEDs de diferentes fabricantes.

# 4. Ensaio de funções no SAS utilizando IEC 61850

Nos capítulos seguintes serão apresentadas duas propostas de implementação para cada uma das duas funções ensaiadas (falha de disjuntor e bloqueio reverso) utilizando os serviços de alta performance da IEC 61850 e dispositivos convencionais. Estes ensaios foram realizados utilizando os relés de proteção da família UR da GE do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos - LPROT - da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Para a análise da performance das duas funções ensaiadas foram feitas medições de tempo nos pontos mais relevantes. Com o objetivo de que fossem feitas de modo mais independente, não utilizando ferramentas da própria GE, e da mesma forma para facilitar a comparação, a proposta é realizar as medições utilizando a mala de testes da OMICRON modelo CM256.

Em alguns casos foi necessário monitorar a chegada da mensagem GOOSE dentro da lógica interna do relé através de seus contatos externos. Neste caso, grandes variações nos tempos de atuação dos contatos acabariam por prejudicar os resultados obtidos. Com a intenção de observar se tais variações existem, foi feito um levantamento por intermédio do esquema da Figura 13.

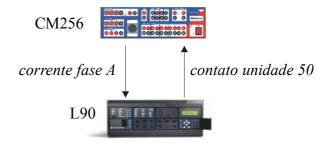


Figura 13: Esquema para levantamento do tempo de atuação dos contatos

O LPROT possui duas unidades do relé L90, que é um relé multifunção da GE utilizado para proteção de linhas. Neste esquema foi habilitada somente a sua unidade 50 (sobrecorrente instantânea). As principais características da unidade 50 e dos contatos, levantados a partir do seu manual, são:

• tempo de operação unidade 50: <16ms, para uma corrente 3 vezes maior que a de *pickup* à 60Hz

- precisão de tempo da unidade 50: para uma corrente igual a 1,5 vezes a de *pickup*, a precisão é de +/- 4ms
- tempo de operação dos contatos: <4ms

Desta forma foi programado num primeiro L90 em sua unidade 50 uma corrente de pickup de 5A, *delay* igual a zero, e injetado pela CM256 15A. Para uma série de 50 aplicações foram levantados os seguintes resultados, conforme Figura 14:

Pelas especificações do manual eram esperados resultados de tempo total de, no máximo, 20ms com uma tolerância de +/- 4ms. Observando os resultados, constata-se que os tempos oscilaram em torno de 20ms com uma tolerância de praticamente +/- 1ms sendo, pelas especificações, 16ms da unidade 50 e 4ms da resposta do contato. O mesmo ensaio foi realizado no segundo L90 do LPROT e os resultados obtidos foram bem próximos, conforme Figura 15.

O tempo de atuação dos contatos pôde então ser estimado por volta de 4ms, com uma tolerância de +/- 1ms. Este valor pode ser adicionado nos levantamentos de tempo realizados pela CM256 na implementação das funções. As medições de tempo serão feitas sobre estes dois relés L90.

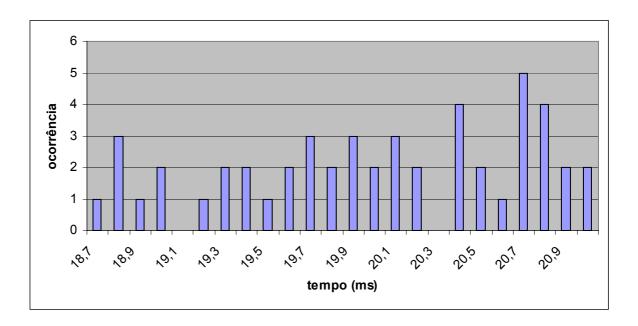


Figura 14: Levantamento dos tempos de resposta do primeiro L90

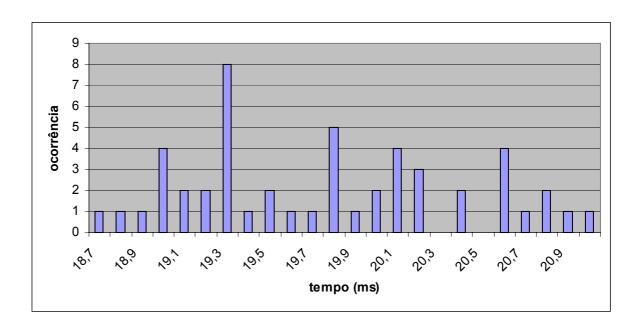


Figura 15: Levantamento dos tempos de resposta do segundo L90

# 4.1. Falha de Disjuntor

#### 4.1.1. Introdução

Na função falha de disjuntor, se um disjuntor receber um sinal de trip de algum dispositivo de proteção e não realizar a abertura do circuito, por exemplo, em razão de um defeito interno, a falha deve ser eliminada pelos disjuntores adjacentes após um tempo pré-definido. Para isso a proteção de falha de disjuntor é iniciada no momento do trip e supervisiona se a corrente de falha é eliminada. Se ela não for eliminada um sinal de trip é enviado a todos os disjuntores adjacentes.

A Figura 16 ilustra a função de falha de disjuntor utilizando dispositivos convencionais na proteção de uma linha. No caso de uma falha ocorrer entre os disjuntores C e E, ambos terão de abrir. Neste instante RL1, tendo sua unidade de sobrecorrente sensibilizada, enviará o comando de abertura para o disjuntor C. A função de falha de disjuntor presente em RL1 também será sensibilizada e aguardará o tempo programado (tipicamente na ordem de 7 a 10 ciclos) monitorando se a corrente após este período será zero. No caso de o disjuntor C por alguma razão apresentar problema e não abrir, após o tempo programado a corrente de falha ainda estará presente, fazendo com que RL1 envie um sinal de trip para o relé RL2 que

acionará os disjuntores adjacentes a C (no caso B e D), inclusive bloqueando o seu religamento, se houver.

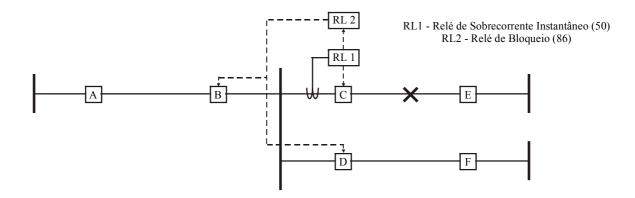


Figura 16: Exemplo de proteção de falha de disjuntor numa linha de transmissão

Percebe-se que, no caso de implementar a proteção de falha de disjuntor em cada disjuntor, será necessária a instalação de um relé de bloqueio e das respectivas ligações com os disjuntores adjacentes.

No caso de utilizar IEDs com a IEC 61850, os comandos de trip para desligar os disjuntores adjacentes serão enviados via rede, sem a necessidade da instalação de relé de bloqueio nem de cabeamento. Para isso é montada uma rede que interligue os IEDs conforme ilustra a Figura 17.

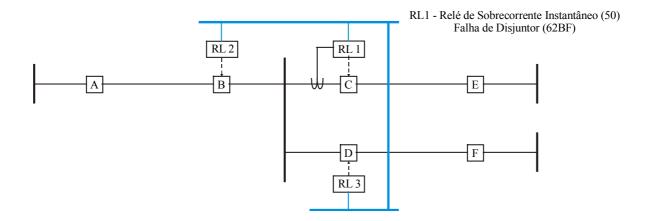


Figura 17: Rede montada para a implementação da função falha de disjuntor

A dinâmica das mensagens se processa da seguinte maneira: ocorrendo uma falha entre os disjuntores C e E, a unidade de sobrecorrente instantânea de RL1 será sensibilizada e enviará o comando de abertura para o disjuntor C, conforme Figura 18.

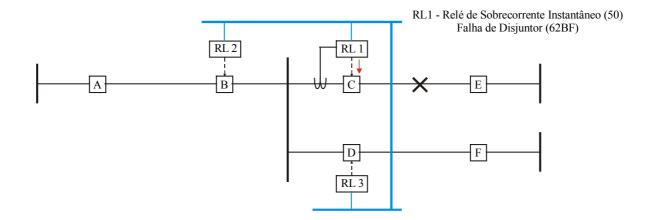


Figura 18: RL1 envia comando para o disjuntor C

Após o envio do comando para o disjuntor C a unidade de falha de disjuntor de RL1 monitora a corrente que passa pelo disjuntor. Se depois do tempo programado ainda existir uma corrente passante, ele envia via rede um comando GOOSE visando a abertura dos disjuntores adjacentes. Pela natureza *multicast* do comando GOOSE todos os IEDs conectados a esta rede receberão este comando, conforme Figura 19.

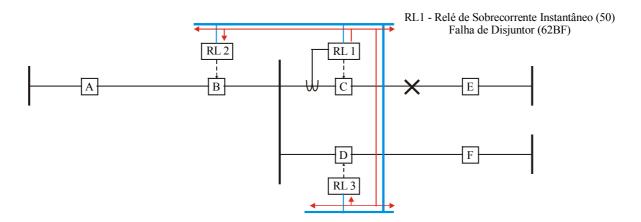


Figura 19: Relé RL1 envia comando GOOSE via rede

Previamente se programam RL2 e RL3 para tratar o comando GOOSE de falha de disjuntor de RL1. Assim que recebem este comando ele é tratado e como resultado enviam o comando de abertura de seus respectivos disjuntores, finalizando a função falha de disjuntor, conforme Figura 20.

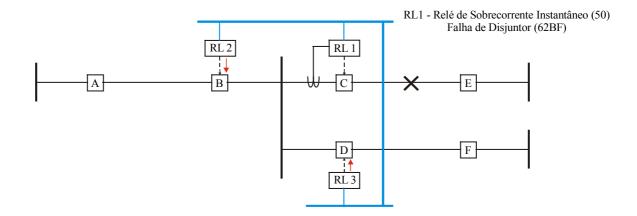


Figura 20: RL2 e RL3 tratam o comando recebido e enviam o comando de abertura para seus respectivos disjuntores

Algumas vantagens de se utilizar esta configuração são a eliminação de relés de bloqueio e de seus respectivos cabeamentos para o envio do comando de abertura nos disjuntores adjacentes e uma maior versatilidade na alteração da função de falha de disjuntor nos relés num eventual acréscimo de uma nova linha no barramento central.

## 4.1.2. Ensaio utilizando dispositivos convencionais

Com base na Figura 16 o ensaio da função falha de disjuntor foi realizado seguindo o sistema proposto pela Figura 21.

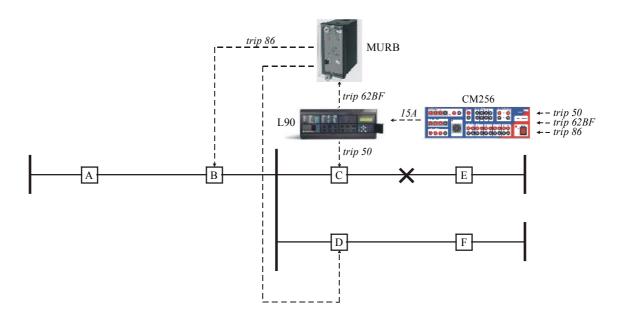


Figura 21: Sistema para ensaio da função falha de disjuntor utilizando dispositivos convencionais

No relé L90 foram habilitadas as funções de sobrecorrente instantânea (unidade 50) e de falha de disjuntor (unidade 62BF). Sua unidade 50 foi programada com a corrente de *pickup* em 5A e *delay* igual a 0s e sua unidade 62BF foi programada com somente um *delay* de 100ms ativado pela atuação da unidade 50.

O relé MURB é um relé de bloqueio eletrônico da Pextron que faz a função 86. Seu tempo de atuação é de aproximadamente 13ms e possui um canal de comunicação serial MODBUS RTU e 8 contatos de saída.

A falha foi simulada injetando-se na fase A do L90 15A através da mala Omicron CM256. Para a análise do desempenho deste sistema foram monitorados por intermédio do programa *State Sequencer* da CM256 o sinal de trip enviado pelo L90 ao disjuntor C (sinal *trip 50*), o sinal de trip enviado pela unidade 62BF do L90 para o relé de bloqueio (sinal *trip 62BF*) e o sinal de trip enviado pelo MURB para a abertura dos disjuntores adjacentes B e D (sinal *trip 86*). Os resultados obtidos são mostrados na Figura 22 e na Tabela 9.

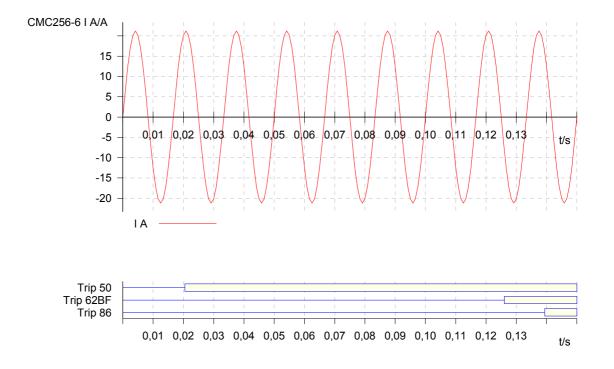


Figura 22: Diagrama de sinais do ensaio da função falha de disjuntor utilizando dispositivos convencionais

Portanto, na avaliação do tempo o L90 levou 20,5ms para atuação de sua unidade 50. Como a falha não foi eliminada pelo disjuntor C sua unidade 62BF foi acionada e após 105,6ms (20,5ms + 105,6ms = 126,1ms) da atuação da unidade 50 enviou o comando de trip para o

relé de bloqueio MURB. Este, por sua vez, levou 13,3ms (126,1ms + 13,3ms = 139,4ms) para propagar o comando recebido para seus contatos de saída.

Avaliação do Tempo			
Nome	Início	Fim	Tempo
Tempo 50	0s	Trip 50 0>1	20,50ms
Tempo 62BF	0s	Trip 62BF 0>1	126,10ms
Tempo 86	0s	Trip 86 0>1	139,40ms

Tabela 9: Avaliação dos tempos do ensaio da função falha de disjuntor utilizando dispositivos convencionais

#### 4.1.3. Ensaio utilizando a IEC 61850

Com base na Figura 17 o ensaio da função falha de disjuntor foi realizado seguindo o sistema proposto pela Figura 23.

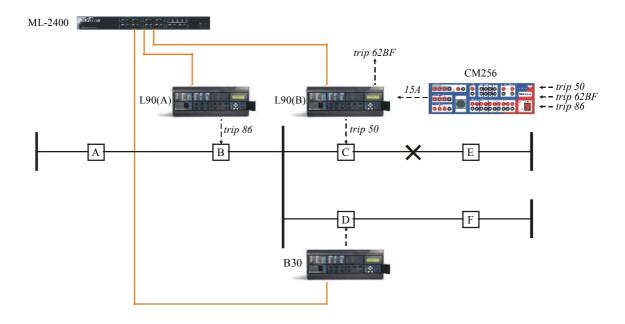


Figura 23: Sistema para ensaio da função falha de disjuntor utilizando IEC 61850

O relé B30 é um relé multifunção para proteção de barra. A implementação do barramento de rede foi feita utilizando um *switch* da GE modelo ML-2400 e interligando-o aos relés por meio de cabos de fibra ótica. No relé L90(B) foram habilitadas as funções de sobrecorrente instantânea (unidade 50) e de falha de disjuntor (unidade 62BF). Sua unidade 50 foi programada com a corrente de *pickup* em 5A e *delay* igual a 0s e sua unidade 62BF foi

programada com somente um *delay* de 100ms ativado pela atuação da unidade 50. Quando o *delay* for atingido, a unidade 62BF envia um comando GOOSE via rede. L90(A) e B30 foram programados para aceitar o comando enviado por L90(B) e acionar um de seus contatos de saída assim que receberem o comando.

A falha foi simulada injetando-se na fase A do L90(B) 15A através da mala Omicron CM256. Para a análise do desempenho deste sistema foram monitorados pelo programa *State Sequencer* da CM256 o sinal de trip enviado pelo L90(B) ao disjuntor C (sinal *trip 50*) e o sinal de trip enviado pelo L90(A) para a abertura do disjuntor B (sinal *trip 86*). Seguindo a metologia proposta de monitorar o comando IEC 61850 através dos contatos o L90(B) foi programado para que, no momento que sua unidade 62BF envia-se o comando GOOSE via rede, um de seus contatos de saída fosse ativado. Desta forma, o sinal de trip enviado pela unidade 62BF corresponde ao sinal *trip 62BF*. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 24 e na Tabela 10.

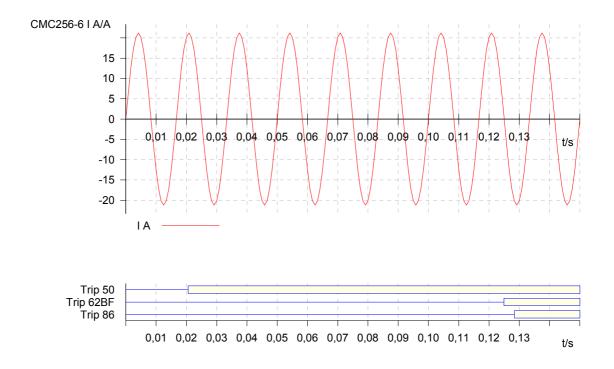


Figura 24: Diagrama de sinais do ensaio da função falha de disjuntor utilizando a IEC 61850

Portanto, na avaliação do tempo o L90(B) levou 20,6ms para atuação de sua unidade 50. Como a falha não foi eliminada pelo disjuntor C sua unidade 62BF foi acionada e após 104,3ms (20,5ms + 104,3ms = 124,9ms) da atuação da unidade 50 enviou o comando de trip

via mensagem GOOSE para a rede. O relé L90(A) processou a mensagem e levou 3,5ms (124,9ms + 3,5ms = 128,4ms) para propagar o comando recebido para seus contatos de saída.

Avaliação do Tempo			
Nome	Início	Fim	Tempo
Tempo 50	0s	Trip 50 0>1	20,60ms
Tempo 62BF	0s	Trip 62BF 0>1	124,90ms
Tempo 86	0s	Trip 86 0>1	128,40ms

Tabela 10: Avaliação dos tempos do ensaio da função falha de disjuntor utilizando a IEC 61850

A partir dos resultados obtidos até agora alguns comentários podem ser feitos.

O tempo total de execução da função falha de disjuntor utilizando IEC 61850 foi reduzido por volta de 11ms (139,4ms – 128,4ms), o que mostra uma melhor eficiência se comparado ao método convencional.

O tempo de processamento da mensagem GOOSE também pode ser estimado. O tempo de atuação de um contato, conforme levantado anteriormente, é aproximadamente constante e por volta de 4ms. O relé L90(B) enviou seu comando GOOSE no tempo 124,9ms e o L90(A) processou-o e acionou seu contato no tempo 128,4ms. Ambos os tempos estão somados do mesmo tempo de atuação dos contatos, portanto, o tempo de processamento da mensagem GOOSE pelo L90(A) pode ser estimado em 3,5ms (128,4ms – 124,9ms).

Além disso, para a execução da mesma função, foram eliminados o relé de bloqueio e os fios elétricos que enviam o comando para os disjuntores adjacentes. Para a implementação da função falha de disjuntor no relé B30 não seriam necessários o acréscimo de mais um relé de bloqueio e dos fios elétricos para os disjuntores adjacentes, bastando somente programar a função nos relés.

## 4.2. Bloqueio Reverso

#### 4.2.1. Introdução

A seletivade é um dos principais objetivos da proteção. Na ocorrência de uma falha num determinado sistema de potência, deve-se procurar isolá-la desligando o menor trecho possível. Uma das técnicas utilizadas para se conseguir a seletivade da proteção é a utilização de esquemas de curvas de tempo inverso, por exemplo, em uma linha radial, conforme mostra a Figura 25.

RL1, RL2, RL3 - Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50) + Relé de Sobrecorrente Temporizado (51)

Figura 25: Exemplo de coordenação da proteção utilizando curvas de tempo inverso

Neste esquema caso a falha ocorra no ponto indicado, as proteções à montante serão sensibilizadas (RL1 e RL2) e as proteções à jusante não serão sensibilizadas (RL3). Devido à coordenação entre as curvas de tempo inverso somente a proteção à montante mais próxima deverá atuar (RL2).

Outra técnica também utilizada é o bloqueio reverso. Nela a configuração da proteção pode se alterar, se necessário, devido a um comando de reconfiguração do sistema vindo de alguma função remota ou local que bloqueia determinadas funções de proteção. Um exemplo de aplicação é fazer uma seletivade lógica das unidades de proteção em uma linha radial, visando uma redução nos tempos de atuação e melhor seletividade na isolação do trecho com falha. A seletividade destas unidades, utilizando dispositivos convencionais, pode ser feita conforme Figura 26.

RL1, RL2, RL3 - Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50)

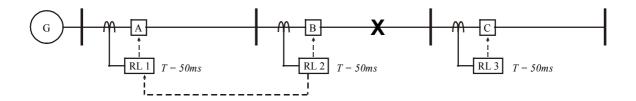


Figura 26: Exemplo da função bloqueio reverso numa linha radial

RL1, RL2 e RL3 são relés de sobrecorrente (unidade 50) programados com um *delay* de 50ms. Quando uma falha ocorre numa linha radial, a corrente de falha fluirá entre a fonte e o ponto onde se localiza a falha. Caso ela ocorra no ponto indicado RL1 e RL2 terão suas unidades 50 sensibilizadas. RL2 está programado para que na partida de sua unidade feche um de seus contatos de saída que envia, através de fios elétricos, um sinal de bloqueio para a unidade 50 de RL1. Após o tempo de 50ms somente RL2 irá atuar. Lógica semelhante também pode ser implementada em RL3 para bloquear as unidades 50 de RL1 e RL2.

Utilizando IEDs com IEC 61850 pode-se implementar a função de bloqueio inverso da Figura 26 por meio de mensagens GOOSE enviadas via rede, conforme Figura 27.

RL1, RL2, RL3 - Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50)

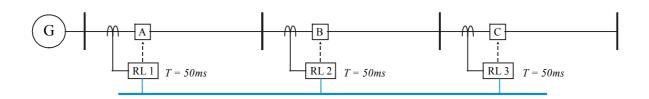


Figura 27: Função bloqueio reverso utilizando IEC 61850

Nesta situação a dinâmica das mensagens se processa da seguinte maneira: no momento em que ocorrer uma falha na linha entre os disjuntores B e C as unidades 50 de RL1 e RL2 serão sensibilizadas e começam a contar o tempo. A partir deste momento RL2 envia uma mensagem GOOSE via rede com o objetivo de bloquear a proteção à montante. Pela natureza *multicast* do comando GOOSE todos os IEDs conectados a esta rede receberão o comando, conforme Figura 28.

RL1, RL2, RL3 - Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50)

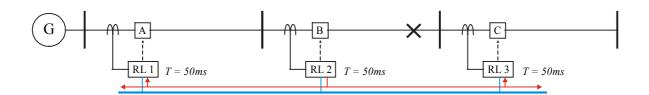


Figura 28: RL2 envia comando GOOSE via rede

Previamente se programa RL1 para tratar o comando de bloqueio reverso de RL2. Assim que receber o comando ele bloqueia sua unidade 50. RL3 não foi programado para tratar o comando de bloqueio reverso de RL2 portanto, sua unidade 50, embora não tenha sido sensibilizada, não tem o seu funcionamento alterado. Assim que o tempo de 50ms for atingido somente RL2 envia o comando de abertura para o seu disjuntor, conforme Figura 29.

Destacam-se como vantagens a melhoria na seletividade, a redução no tempo de atuação do disjuntor localizado mais próximo a fonte e como consequência uma possível redução no dimensionamento dos cabos da linha radial, uma vez que as correntes de falha terão seu tempo de extinção reduzido.

RL1, RL2, RL3 - Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50)

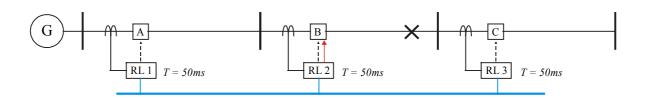


Figura 29: RL2 envia comando de abertura para seu disjuntor

### 4.2.2. Ensaio utilizando dispositivos convencionais

Com base na Figura 26 o ensaio da função bloqueio reverso foi realizado seguindo o sistema proposto pela Figura 30.

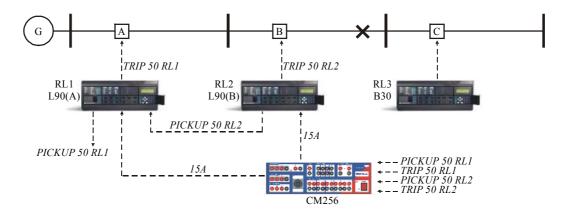


Figura 30: Sistema para ensaio da função bloqueio reverso utilizando dispositivos convencionais

Neste sistema RL1, RL2 e RL3 tiveram somente suas funções de sobrecorrente instantânea (unidade 50) habilitadas e programadas com a corrente de *pickup* em 5A e *delay* igual a 50ms. Um dos contatos de saída de RL2 foi programado para ser acionado na partida de sua unidade 50. Um dos contatos de saída de RL1 foi programado para ser acionado na partida de sua unidade 50 e uma de suas entradas lógicas foi programada para bloquear sua unidade 50 quando energizada.

A falha foi simulada injetando-se nas fases A de RL1 e de RL2 15A através da mala Omicron CM256. Para a análise do desempenho deste sistema foram monitorados pelo programa *State Sequencer* da CM256 os sinais de partida (sinal *PICKUP 50 RL2*) e de trip do disjuntor B (sinal *TRIP 50 RL2*) da unidade 50 de RL2 e os sinais de partida (sinal *PICKUP 50 RL3*) e de trip do disjuntor A (sinal *TRIP 50 RL1*) da unidade 50 de RL1. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 31 e na Tabela 11.

Pode-se observar que após a injeção de corrente a unidade 50 de RL2 partiu em 20,7ms e a unidade 50 de RL1 partiu em 19,5ms. A unidade 50 de RL1, após ter recebido o sinal de partida de RL2, levou aproximadamente 15,5ms (35ms – 19,5ms) para ser bloqueada. Decorridos 49,3ms (70,0ms – 20,7ms) a unidade 50 de RL2 enviou o sinal de trip para o disjuntor B. A unidade 50 de RL1 não atuou devido ao bloqueio.

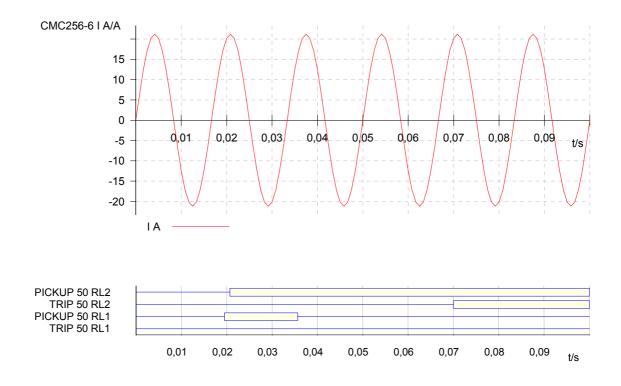


Figura 31: Diagrama de sinais do ensaio da função bloqueio reverso utilizando dispositivos convencionais

Avaliação do Tempo			
Nome	Início	Fim	Tempo
Pickup 50 RL2	0s	Pickup 50 RL2 0>1	20,70ms
Trip 50 RL2	0s	Trip 50 RL2 0>1	70,00ms
Pickup 50 RL1	0s	Pickup 50 RL1 0>1	19,50ms
Trip 50 RL1	0s	Trip 50 RL1 0>1	-

Tabela 11: Avaliação dos tempos do ensaio da função bloqueio reverso utilizando dispositivos convencionais

## 4.2.3. Ensaio utilizando a IEC 61850

Com base na Figura 27 o ensaio da função bloqueio reverso foi realizado seguindo o sistema proposto pela Figura 32.

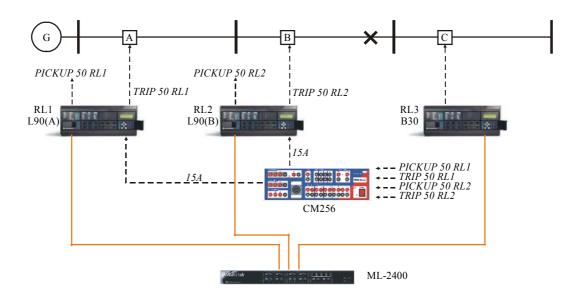


Figura 32: Sistema para ensaio da função bloqueio reverso utilizando IEC 61850

Neste sistema RL1, RL2 e RL3 tiveram somente suas funções de sobrecorrente instantânea (unidade 50) habilitadas e programadas com a corrente de *pickup* em 5A e *delay* igual a 50ms. Um dos contatos de saída de RL2 foi programado para ser acionado na partida e outro no trip de sua unidade 50. O mesmo foi feito na programação de RL1.

Na configuração da rede, a implementação do barramento de comunicação foi novamente feita utilizando o *switch* ML-2400 e interligando-o aos relés por meio de cabos de fibra ótica. A unidade 50 de RL2 foi programada para enviar um comando GOOSE via rede informando sua partida. A unidade 50 de RL1 foi programada para ser bloqueada caso receba um comando GOOSE de partida da unidade 50 de RL2.

A falha foi simulada injetando-se nas fases A de RL1 e de RL2 15A através da mala Omicron CM256. Para a análise do desempenho deste sistema foram monitorados pelo programa *State Sequencer* da CM256 os sinais de partida (sinal *PICKUP 50 RL2*) e de trip do disjuntor B (sinal *TRIP 50 RL2*) da unidade 50 de RL2 e os sinais de partida (sinal *PICKUP 50 RL1*) e de trip do disjuntor A (sinal *TRIP 50 RL1*) da unidade 50 de RL1. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 33 e na Tabela 12.

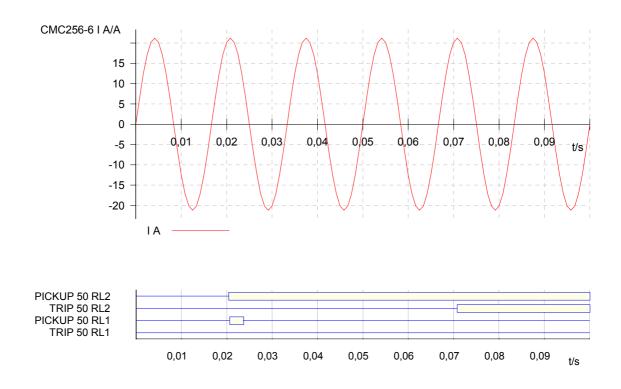


Figura 33: Diagrama de sinais do ensaio da função bloqueio reverso utilizando IEC 61850

Avaliação do Tempo			
Nome	Início	Fim	Tempo
Pickup 50 RL2	0s	Pickup 50 RL2 0>1	20,40ms
Trip 50 RL2	0s	Trip 50 RL2 0>1	70,80ms
Pickup 50 RL1	0s	Pickup 50 RL1 0>1	20,60ms
Trip 50 RL1	0s	Trip 50 RL1 0>1	-

Tabela 12: Avaliação dos tempos do ensaio da função bloqueio reverso utilizando IEC 61850

Pode-se observar que após a injeção de corrente a unidade 50 de RL2 partiu em 20,4ms e a unidade de RL1 partiu em 20,6ms. A unidade 50 de RL1, após ter recebido o sinal de partida de RL2 via mensagem GOOSE, levou aproximadamente 3ms para ser bloqueada. Decorridos 50,4ms (70,8ms – 20,4ms) a unidade 50 de RL2 enviou o sinal de trip para o disjuntor B. A unidade 50 de RL1 não atuou devido ao bloqueio.

A partir dos resultados obtidos até agora alguns comentários podem ser feitos.

O tempo total de execução da função bloqueio reverso utilizando IEC 61850, se comparado com dispositivos convencionais, não foi reduzido (70,0ms contra 70,8ms, respectivamente). O

que se percebe é uma maior velocidade no bloqueio da unidade 50 de RL1 (19,5ms contra 3ms). Desta forma, utilizando comandos GOOSE poderia-se baixar o tempo de *delay* da unidade 50 de 50ms para 16ms (um ciclo da rede de 60Hz) melhorando sua velocidade sem prejudicar a eficiência na seletividade do trecho com falha. Importante observar que uma velocidade desta magnitude não poderia ser implementada utilizando dispositivos convencionais.

O tempo de processamento da mensagem GOOSE também pode ser estimado. O tempo de atuação de um contato, conforme levantado anteriormente, é aproximadamente constante e por volta de 4ms. RL2 enviou seu comando GOOSE no tempo 20,4ms e RL1 processou-o e acionou seu contato aproximadamente 3ms depois. Ambos os tempos estão somados do mesmo tempo de atuação dos contatos, portanto, o tempo de processamento da mensagem GOOSE por RL1 pode ser estimado em 3ms.

Além disso, para a execução da mesma função, foram eliminados os fios elétricos que enviam o comando para RL1. Para a implementação da função bloqueio reverso em RL3 não seriam necessários o acréscimo de mais fios elétricos para RL2 e RL1, bastando somente programar a função nos relés.

# 5. Desempenho das funções frente a problemas de comunicação

Basicamente, com a utilização da IEC 61850 para a implementação de funções no SAS, os comandos que anteriormente eram enviados por fios elétricos passam a ser comandos enviados através da rede. Uma das questões que vem sendo levantadas a respeito desta arquitetura proposta pela norma é o desempenho destas funções frente a problemas na comunicação, mais especificamente, no barramento da rede que interliga os IEDs: caso ocorra, por exemplo, o rompimento de um dos cabos de fibra ótica, ou um defeito no *switch*, como os IEDs irão se comportar?

Embora a norma não mencione nenhuma observação a respeito, diversas soluções vem sendo propostas no mercado. Duas dessas propostas serão apresentadas a seguir: a redundância dos dispositivos de rede e a utilização da própria dinâmica das mensagens GOOSE como indicativo de falha na comunicação.

# 5.1. Redundância dos dispositivos de rede

Na redundância dos dispositivos de rede o objetivo é configurar os *switches* e os IEDs de forma que continuem mantendo a comunicação, mesmo com a presença de uma falha em algum ponto do barramento de comunicação. Uma das soluções apresentadas é a utilização de um anel para interligação entre os *switches* em conjunto com um duplo canal de comunicação nos IEDs, conforme Figura 34.

Neste esquema todo IED que for interligado à rede deve possuir uma interface de rede com dois canais. Cada um desses canais deve ser interligado a um *switch*. Os *switches* são interligados entre si formando um anel para a transferência de dados entre eles. O esquema de redundância executado pelos dispositivos que compõem a rede se processa da seguinte forma:

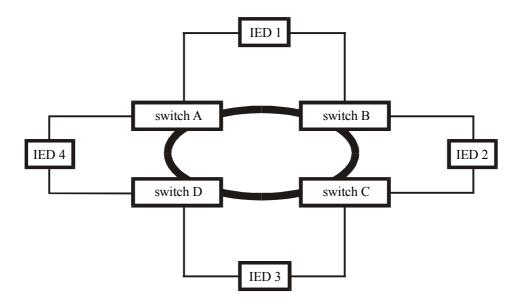


Figura 34: Exemplo de esquema com redundância dos dispositivos de rede

No caso de ocorrer uma falha em uma das conexões entre o IED e *switch* a interface do IED passa a enviar os comandos através da outra conexão entre o IED e o *switch*. Por exemplo, numa falha na conexão entre o IED1 e o *switch* B, a interface de IED1 enviará os comandos pela conexão entre IED1 e o *switch* A, conforme Figura 38.

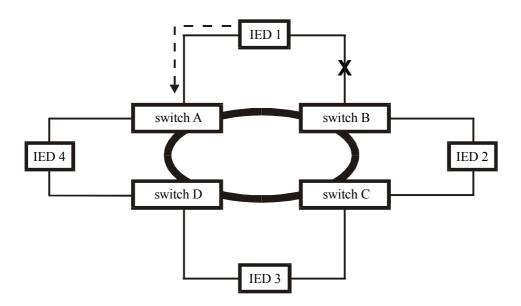


Figura 35: Redundância no caso de falha na conexão entre o IED e o switch

No caso de ocorrer uma falha em uma das conexões entre os *switches*, os *switches* passam a realizar a troca de dados entre eles pelo ramo do anel que não possui defeito. Por exemplo, numa falha na conexão entre o *switch* B e o *switch* C, o *switch* B passa a utilizar a sua conexão com o *switch* A e o *switch* C a sua conexão com o *switch* D, conforme Figura 36.

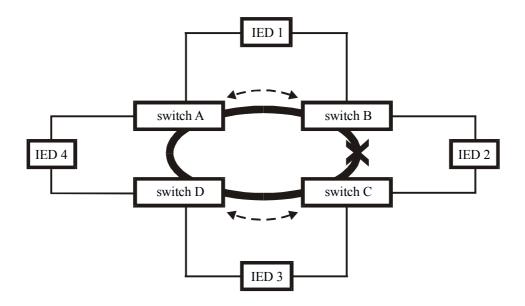


Figura 36: Redundância no caso de falha na conexão entre os switches

# 5.2. Dinâmica das mensagens GOOSE

Na programação da mensagem GOOSE em um IED são definidos, de acordo com as funções a serem implementadas, um conjunto de variáveis necessárias para implementá-las, que serão transmitidas pela rede via comando GOOSE. São exemplos o *pickup* da unidade 50 na função de bloqueio reverso e o trip da unidade 62BF na função falha de disjuntor, ambos utilizados nos ensaios do capítulo anterior.

Num primeiro cenário, em que nenhum evento está ocorrendo, o IED transmite periodicamente o valor destas variáveis dentro do comando GOOSE pela rede segundo um tempo Tmax, conforme Figura 37. O comando GOOSE é representado pelo retângulo negro. Supõe-se neste exemplo que o único dado a ser transmitido seja o *pickup* da unidade 50 deste IED.

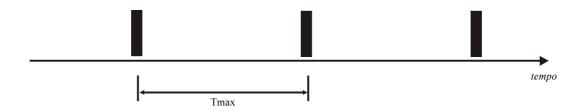


Figura 37: Diagrama de tempo do comando GOOSE quando nenhum evento está ocorrendo

No instante em que ocorrer uma falha que sensibilize esta unidade 50 sua variável *pickup* irá mudar de valor. Neste momento o IED percebe a mudança e passa imediatamente a enviar o comando GOOSE com o novo valor, desta vez repetindo o envio num curto período de tempo Tmin, conforme Figura 38. Este intervalo entre os comandos GOOSE vai sendo incrementado de forma gradativa até retornar ao período de tempo Tmax.

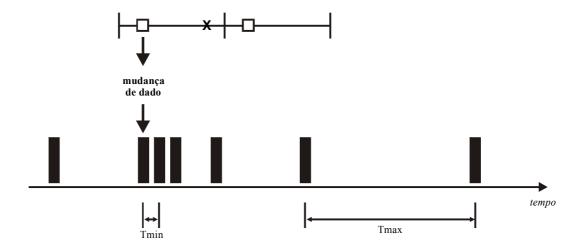


Figura 38: Diagrama de tempo do comando GOOSE quando ocorre um evento

Portanto, ocorrendo ou não algum evento, o IED sempre estará enviando mensagens GOOSE pela rede. Os relés da linha UR da GE, uma vez programados para receber o comando GOOSE de um outro IED, realizam internamente uma monitoração deste comando segundo um tempo programado e disponibilizam, pela tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup>, um operando interno que traz a informação de *status* deste comando GOOSE.

A tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup> cria internamente no relé sinais de *status* vindos das mais diversas fontes, por exemplo de uma unidade 50 indicando seu *pickup* e de uma das entradas lógicas indicando sua energização. Estes sinais podem ser combinados seguindo uma lógica convencional programada pelo usuário para executar uma determinada função.

O sinal que indica o *status* da comunicação tem valor 0 quando o *status* da comunicação com o IED é "OK" e tem valor 1 quando o *status* é "não OK". Este sinal será utilizado nas propostas seguintes para a adaptação dos relés frente a problemas na comunicação.

# 5.3. Falha de disjuntor frente a problemas de comunicação

Para o ensaio da função falha de disjuntor foi utilizado o mesmo sistema proposto pela Figura 23, modificado para simular uma falha na comunicação retirando um dos cabos de fibra ótica que interliga o L90(B) ao *switch*, conforme Figura 39.

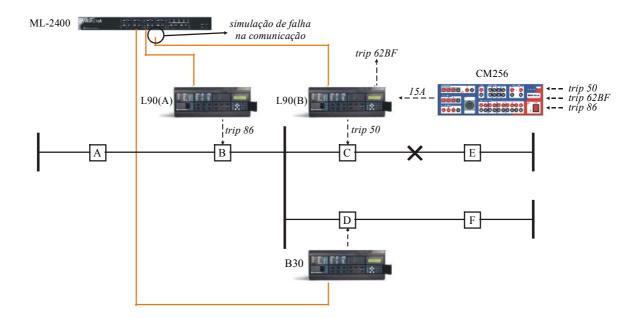


Figura 39: Sistema para ensaio da função falha de disjuntor com cabo de rede desconectado simulando uma falha na comunicação

Realizando novamente o ensaio da função, com a mesma configuração dos IEDs, os resultados obtidos são mostrados na Figura 40. Conforme pode ser observado o L90(B) enviou o comando GOOSE pela rede, mas, devido ao cabo estar desconectado, este não chegou a L90(A) que não realizou a abertura do disjuntor B.

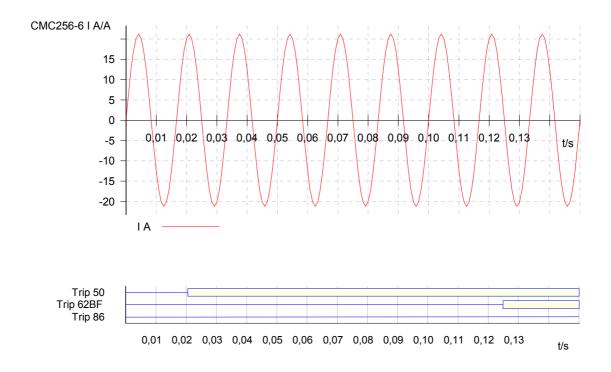


Figura 40: Diagrama de sinais do ensaio da função falha de disjuntor simulando uma falha na comunicação

Para a análise de uma proposta de configuração frente a uma falha na comunicação foi levado em consideração que a função falha de disjuntor é uma função de retaguarda de uma função de proteção, portanto não seria o caso de elaborar uma proteção de retaguarda da retaguarda. A sinalização através de um contato em paralelo com o contato de *autocheck* do relé somada a indicação de falha por meio de uma das luzes na frontal do painel seriam suficientes. Os operadores do sistema seriam informados sobre o problema na comunicação e tomariam as devidas providências. Numa situação em que exista um problema na comunicação, se ocorrer uma falha na linha e o disjuntor falhar, as proteções nos outros IEDs deverão atuar como retaguarda.

A Figura 41 traz imagens do painel frontal do L90(B). Ele foi programado para que o LED TRIP 50 acenda caso o *status* de comunicação seja "OK" e o LED TRIP 27 acenda caso o *status* seja "não OK".



Figura 41: Imagem do painel frontal do relé na situação A (sem falha na comunicação) e na situação B (com falha na comunicação)

## 5.4. Bloqueio reverso frente a problemas de comunicação

Para o ensaio da função bloqueio reverso foi utilizado o mesmo sistema proposto pela Figura 32, modificado para simular uma falha na comunicação retirando um dos cabos de fibra ótica que interliga RL1 ao *switch*, conforme Figura 42.

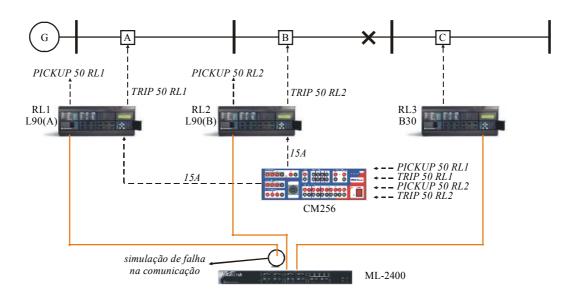


Figura 42: Sistema para ensaio da função bloqueio reverso com cabo de rede desconectado simulando uma falha na comunicação

Realizando novamente o ensaio da função, com a mesma configuração dos IEDs, os resultados obtidos são mostrados na Figura 43. Conforme pode ser observado RL2 enviou o

comando GOOSE pela rede, mas, devido ao cabo estar desconectado, este não chegou a RL1, que realizou a abertura do disjuntor A.

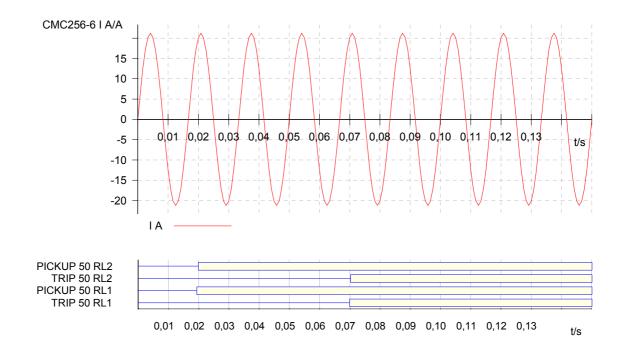


Figura 43: Diagrama de sinais do ensaio da função bloqueio reverso simulando uma falha na comunicação

Para a análise de uma solução para um problema de comunicação nesta função será proposta uma lógica que utilize o sinal de *status* da comunicação em RL1 e em RL2 para modificar a configuração da proteção. Esta nova lógica foi implementada utilizando uma unidade 50 e uma unidade 51 em RL1 e em RL2 e a tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup>. O objetivo final é que num cenário sem falha na comunicação RL1 e RL2 implementem a função bloqueio reverso e num cenário com falha na comunicação RL1 e RL2 implementem uma lógica de curva de tempo inverso. Isso foi feito da seguinte forma:

- 1. RL1 e RL2 têm suas respectivas unidades 50 com mesmo valor de *pickup* e de *delay* e executando a lógica de bloqueio reverso por meio de comandos GOOSE.
- 2. RL1 tem sua unidade 51 programada para que coordene sua curva de tempo inverso com a curva da unidade 51 de RL2. Ambas as unidades 51 são programadas para atuarem após as unidades 50.
- 3. Ambos os relés monitoram o *status* da comunicação por intermédio do sinal de *status* da comunicação. Caso não exista problema na comunicação suas unidades 50 são

desbloqueadas. Caso ocorra um problema na comunicação eles bloqueiam suas unidades 50. Suas unidades 51, em qualquer situação, encontram-se desbloqueadas.

4. Essa falha de comunicação é informada ao usuário através de um contato externo paralelo ao de *autocheck* e por indicação no painel.

A lógica implementada por intermédio da tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup> em RL1 é representada pela Figura 44.

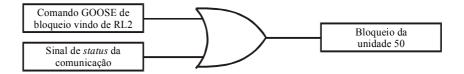


Figura 44: Lógica implementada em RL1 por intermédio da tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup>

A lógica corresponde ao bloqueio da unidade 50 de RL1. Neste caso, dois sinais podem bloqueá-la. Um deles é o sinal de bloqueio vindo de um comando GOOSE de RL2, necessário para a implementação da função bloqueio reverso. Quando ocorrer uma falha na linha e ambas as unidades 50 de RL1 e RL2 partirem, a unidade 50 de RL1 será bloqueada. Outro sinal corresponde a monitoração de *status* da comunicação. Caso o *status* seja "não OK" (valor 1) a unidade 50 de RL1 também será bloqueada.

A lógica implementada por intermédio da tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup> em RL2 é representada pela Figura 47.

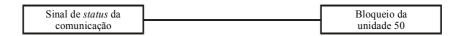


Figura 45: Lógica implementada em RL2 por intermédio da tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup>

A lógica corresponde ao bloqueio da unidade 50. Num cenário sem falha de comunicação o sinal de *status* da comunicação terá valor 0 e não bloqueiará a unidade 50. Num cenário com falha de comunicação o sinal de *status* da comunicação terá valor 1 e bloqueiará a unidade 50.

Após programar estas lógicas em RL1 e RL2 foram feitos ensaios no sistema proposto pela Figura 46.

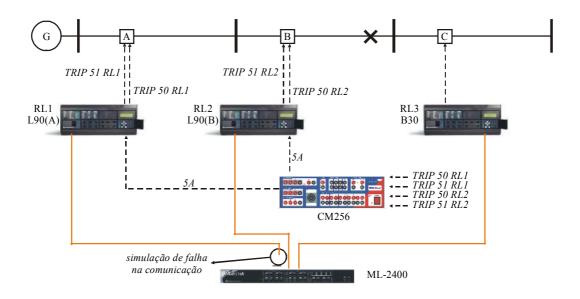


Figura 46: Sistema para ensaio da função bloqueio reverso utilizando lógicas implementadas por intermédio da tecnologia FLEXLOGIC<sup>TM</sup>

Neste sistema RL1, RL2 e RL3 tiveram suas funções de sobrecorrente instantânea (unidade 50) habilitadas e programadas com a corrente de *pickup* em 5A e *delay* igual a 50ms e suas funções de sobrecorrente temporizadas (unidade 51) habilitadas e programadas para coordenarem suas curvas de tempo inverso conforme Tabela 13.

	RL1	RL2	RL3
Curva	MI	MI	MI
Ipickup	0,5A	0,5A	0,5A
TDM	2,0	1,0	0,5
Tempo para Ifalha = 5A	2,414s	1,207s	0,603s

Tabela 13: Parametrização das unidades 51

Dois contatos de saída foram programados em RL1: um para ser acionado no trip de sua unidade 50 e outro no trip de sua unidade 51. O mesmo foi feito na programação dos contatos de RL2.

Na configuração da rede a implementação do barramento de comunicação foi novamente feita utilizando o *switch* ML-2400 e interligando-o aos relés por meio de cabos de fibra ótica. A unidade 50 de RL2 foi programada para enviar um comando GOOSE via rede informando sua partida.

A falha foi simulada injetando-se nas fases A de RL1 e de RL2 5,10A através da mala Omicron CM256. Para a análise do desempenho deste sistema foram monitorados pelo programa *State Sequencer* da CM256 em RL1 os sinais de trip da unidade 50 (sinal *TRIP 50 RL1*) e da unidade 51 (sinal *TRIP 51 RL1*) e em RL2 os sinais de trip da unidade 50 (sinal *TRIP 50 RL2*) e da unidade 51 (sinal *TRIP 51 RL2*). Foram feitos dois ensaios, o primeiro num cenário sem falha na comunicação e o segundo num cenário com falha na comunicação, com objetivo de observar o comportamento do sistema.

A Figura 47 e a Tabela 14 trazem os resultados do primeiro ensaio. Após o tempo de 81,3ms da aplicação da corrente de 5,10A somente a unidade 50 de RL2 atuou, a unidade 50 de RL1 foi bloqueada pelo comando GOOSE enviado por RL2. A partir deste instante, não ocorrendo falha no disjuntor B, a corrente estaria extinta e as unidades 51 de RL1 e RL2 não estariam ativas. A corrente foi mantida para se observar suas atuações, que acabaram por acontecer em 2,407s e 1,214s (respectivamente RL1 e RL2).

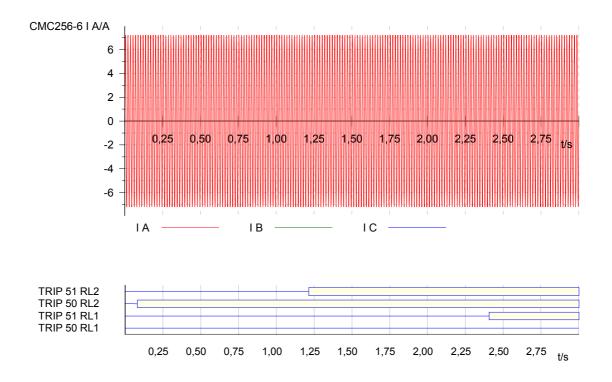


Figura 47: Diagrama de sinais do ensaio da função bloqueio reverso sem simulação de falha na comunicação e com a lógica implementada

Avaliação do Tempo			
Nome	Início	Fim	Tempo
Trip 51 RL2	0s	Trip 51 RL2 0>1	1,214s
Trip 50 RL2	0s	Trip 50 RL2 0>1	81,30ms
Trip 51 RL1	0s	Trip 51 RL1 0>1	2,407s
Trip 50 RL1	0s	Trip 50 RL1 0>1	-

Tabela 14: Avaliação dos tempos do ensaio da função bloqueio reverso sem simulação de falha na comunicação e com a lógica implementada

A Figura 48 e a Tabela 15 trazem os resultados do segundo ensaio. Após a aplicação da corrente de 5,10A, como o *status* da comunicação estava "não OK", as unidades 50 de RL1 e RL2 foram bloqueadas e não atuaram (*TRIP 50 RL1* e *TRIP 50 RL2* sempre em zero). As unidades 51 de RL1 e RL2, por sua vez, não estavam bloqueadas por nenhum comando e partiram. Devido à coordenação entre as curvas de tempo inverso a unidade 51 de RL2 atuou primeiro em 1,213s. A partir deste instante, não ocorrendo falha no disjuntor B, a corrente estaria extinta e a unidade 51 de RL1 passaria a não estar mais ativa. A corrente foi mantida para se observar a sua atuação, que acabou acontencendo em 2,412s.

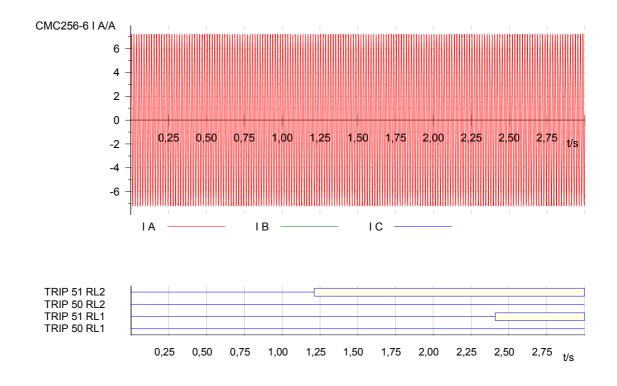


Figura 48: Diagrama de sinais do ensaio da função bloqueio reverso com simulação de falha na comunicação e com a lógica implementada

Avaliação do Tempo			
Nome	Início	Fim	Tempo
Trip 51 RL2	0s	Trip 51 RL2 0>1	1,213 s
Trip 50 RL2	0s	Trip 50 RL2 0>1	-
Trip 51 RL1	0s	Trip 51 RL1 0>1	2,412 s
Trip 50 RL1	0s	Trip 50 RL1 0>1	-

Tabela 15: Avaliação dos tempos do ensaio da função bloqueio reverso com simulação de falha na comunicação e com a lógica implementada

Portanto, com a implementação da lógica proposta num cenário sem falha na comunicação o comportamento não foi alterado. Num cenário com falha na comunicação RL1 e RL2 implementam entre eles uma lógica de curvas de tempo inverso.

# 6. Conclusões

Este trabalho apresentou um breve estudo da norma IEC 61850 e procurou mostrar o impacto de sua utilização em SASs por meio de uma análise comparativa com o DNP3 e de ensaios propostos de duas funções implementadas utilizando dispositivos convencionais e dispositivos com IEC 61850.

No estudo da norma IEC 61850 foram apresentados os principais conceitos utilizados por ela para garantir a interoperabilidade, a liberdade de configuração e a estabilidade a longo prazo no SAS. Para atingir tais objetivos percebe-se que ela se tornou um padrão não somente para os protocolos utilizados, mas para todo o SAS, incluindo a estrutura de rede e os processos de engenharia envolvidos.

A partir do estudo do DNP3 em conjunto com a norma observou-se que as suas principais vantagens residem nos serviços de alta performance e na Linguagem SCL.

Por intermédio dos serviços de alta performance tornou-se possível a implementação de funções no SAS utilizando comandos enviados via rede diretamente entre os IEDs. A norma também acabou por estabelecer uma padronização para soluções deste tipo de automação utilizando comandos via rede, visto que o mercado vinha propondo várias soluções diferentes e algumas delas proprietárias.

A Linguagem SCL foi criada para padronizar todas as informações necessárias para se implementar um SAS e o processo de engenharia que irá trabalhar com estas informações. Seu objetivo maior é garantir a interoperabilidade na integração de IEDs de diferentes fabricantes no SAS.

Nos ensaios das funções falha de disjuntor e bloqueio reverso implementadas por propostas utilizando dispositivos convencionais e dispositivos com IEC 61850 obteve-se grandes vantagens com o uso dos serviços de alta performance da norma. As principais a serem destacadas são a redução de cabos elétricos, maior versatilidade numa eventual necessidade de se alterar o que está implementado (reduzindo este processo à programação de alguns parâmetros dos relés) e o ganho na velocidade de atuação destas funções, sem comprometer sua eficiência para isolar o trecho com falha.

Também foram feitos ensaios destas duas funções simulando uma falha na comunicação com o objetivo de observar suas respostas frente a esse problema. Neste cenário as funções implementadas deixaram de atuar corretamente. A partir disso foram propostas algumas soluções utilizando a própria dinâmica da mensagem GOOSE como indicador de falha na comunicação. As duas funções, com as soluções propostas, passaram a apresentar bons resultados, tanto no cenário com falha na comunicação quanto no cenário sem falha na comunicação.

# Referências

IEC TR 61850-1: Communication networks and systems in substations – Part 1: Introduction and overview

IEC TS 61850-2: Communication networks and systems in substations – Part 2: Glossary

IEC 61850-3: Communication networks and systems in substations - Part 3: General requirements

IEC 61850-4: Communication networks and systems in substations – Part 4: System and project management

IEC 61850-5: Communication networks and systems in substations – Part 5: Communication requirements for functions and device models

IEC 61850-6: Communication networks and systems in substations – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs

IEC 61850-7-1: Communication networks and systems in substations – Part 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Principles and models

IEC 61850-7-2: Communication networks and systems in substations – Part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Abstract communication service interface (ACSI)

IEC 61850-7-3: Communication networks and systems in substations – Part 7-3: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Common data classes

IEC 61850-7-4: Communication networks and systems in substations – Part 7-4: Basic communication structure for substation and feeder equipment – Compatible logical node classes and data classes

IEC 61850-8-1: Communication networks and systems in substations – Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3

IEC 61850-9-1: Communication networks and systems in substations – Part 9-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over serial unidirectional multidrop point to point link

IEC 61850-9-2: Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3

CURTIS, Ken; A DNP3 Protocol Primer; DNP Users Group Publication

The Integrated Energy and Communication Systems Architecture - Volume IV: Technical Analysis; EPRI Publication

SOARES, Luiz Fernando Gomes; LEMOS, Guido; COLCHER, Sérgio; *Redes de Computadores – Das LANs, MANs e WANs às Redes ATM*; Editora Campus

MARSHALL, Perry S.; RINALDI, John S.; *Industrial Ethernet*; ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society

SOUSA, Lindeberg Barros de; TCP/IP básico & conectividade em redes; Editora Érica

TANENBAUM, Andrew S.; Computer networks; Prentice-Hall

BRAND, Claus-Peter; IEC 61850 Short Tutorial; Cigre

JARDINI, José A., Sistemas Digitais para Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, Sem Editora

BAIGENT, Drew; ADAMIAK, Mark; MACKIEWICZ, Ralph; IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations: An Overwiew for User

ROBERTS, Jeff; FISCHER, Normann; FLEMING, Bill; JENKINS, Robin; TAYLOR, Alan; Obtaing a Reliable Polarizing Source for Ground Directional Elements in Multisource, Isolated-Neutral Distribution Systems; SEL Technical Article

BREND, Klaus-Peter; RIETMANN, Peter; MAEDA, Tetsuji; WIMMER, Wolfgang; Requirements of Interoperable Distributed Functions and Architectures in IEC 61850-based SA Systems; B5-110, CIGRE 2006

SIEMENS; SICAM PAS Substation Automation System Catalog; Protection Systems Catalog SIP 2006

SANTOS, Adenilson; SENGER, Eduardo; VICECONTI, Enrico; FILHO, Francisco Antônio Reis; ZERBINATTI, Paulo Egídio; BULGARELLI, Roberval; *O Modelamento e Ensaios de Sistema Digital de Proteção e Automação para o novo Sistema de Recebimento e Distribuição de Energia Elétrica da Refinaria Presidente Bernardes, baseado em IEDs e no Protocolo IEC 61850*; Relatório dos ensaios da rede de IED e protocolo IEC 61850 para o novo sistema elétrico da PETROBRAS/RPBC, 2005

GE INDUSTRIAL SYSTEMS; L90 Line Differential Relay - UR Series Instruction Manual