



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTL/27
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – XV

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MULTICAMADAS PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

**Rafael Gressler Milbradt(*) Paulo Ricardo Pereira da Silva
Luciane Neves Canha
Pedro Bastos Zorrilla
CEESP - UFSM CEEE-D - RS**

Sandro Marcelo Schmaedecke

RESUMO

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema multicamadas (Dados, Negócio e Apresentação) para análise de sistemas de distribuição, com as funcionalidades de Sistema de Informações Georreferenciadas e Sistema Central de Controle, o ASW (Sistema para Análise em Redes de Distribuição Web). Neste sistema são utilizadas informações em tempo real adquiridas através de sua integração a um sistema supervisorio, para estimação de estado da rede, baseadas em *software* livre. Como resultados tem-se um protótipo funcional, onde o principal destaque está na possibilidade de seu uso em dispositivos móveis, como *tablets* e *smartphones*.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema Multicamadas, Estimação de estado, Sistema de Informações Georreferenciadas, Sistema Supervisorio

1.0 - INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas elétricos de potência e os requisitos da sociedade para estes estão trazendo novos conceitos para os sistemas de distribuição como os medidores inteligentes, geração distribuída, gerenciamento pelo lado da demanda, microgeração, os veículos elétricos, entre outros. Em contrapartida, a operação de um sistema de distribuição nestes moldes se tornará extremamente complexa fazendo necessária a análise da rede de forma mais eficiente, abrangente e em tempo real. Há que se considerar ainda que a análise destes sistemas nestes moldes exigirão processamentos cada vez mais complexos e em grande volume.

Neste mesmo tempo, a computação ubíqua trouxe nos últimos anos um grande número de possibilidades antes pouco imaginadas, através da exploração do uso de *smartphones* e *tablets* com bom poder de processamento, se considerarmos dispositivos de mão alimentados por pequenas baterias. Pelo fato destes dispositivos integrarem também câmera fotográfica, sensor GPS, acesso à internet entre outros, torna-se fácil imaginar uma série de utilizações para estes nos sistemas de distribuição, desde os processos referentes à operação até o planejamento destas redes.

Entretanto, mesmo com bom poder de processamento, estes dispositivos não possuem capacidade de armazenar e processar informações localmente a respeito das redes de distribuição, que possuem na sua maioria um elevado número de nós e de trechos de rede. Há que se encontrar uma solução técnica que possibilite o uso destes dispositivos em campo, trazendo inúmeras aplicações e benefícios.

O presente trabalho tem por objetivo a apresentação de técnicas e ferramentas que possibilitem o uso de aplicações relacionadas a sistemas de potência em dispositivos móveis, através do uso de uma arquitetura multicamadas e *frameworks* que fazem uso da filosofia do *software* livre, que além de não possuírem custo, permitem a agregação de novas funcionalidades para melhor adaptação de seus usos em diversos projetos. A abordagem multicamadas em suma, permite distribuir a carga de processamento entre computadores mais poderosos, deixando a aplicação cliente, no lado do usuário final mais leve.

Como resultados deste trabalho tem-se um protótipo funcional de uma ferramenta para análise de sistemas de distribuição, onde o principal destaque está na possibilidade de uso em dispositivos móveis. Além

disso, os métodos utilizados podem servir de base para estudos posteriores em outras aplicações tanto na operação quanto no planejamento em sistemas de potência de uma forma mais ampla.

2.0 - ASW - SOFTWARE PARA ANÁLISE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO VIA WEB

Com a crescente complexidade dos sistemas de informações, e principalmente a possibilidade do uso de dispositivos móveis nos mesmos, uma das arquiteturas que vem sendo amplamente utilizada no contexto de aplicações para os sistemas elétricos de potência é a arquitetura em três camadas, como pode ser visto em vários trabalhos da literatura(1)(2)(3). Essa arquitetura visa tornar uma aplicação mais bem organizada, através da separação do sistema em três camadas distintas, objetivando minimizar a interdependência das mesmas, além da parte complexa do processamento das informações ser executada na camada de negócios, possibilitando a visualização dos dados em dispositivos com baixa capacidade de processamento. As três camadas recebem os nomes de camada de dados, camada de negócios e camada de apresentação, e a visão dos sistemas que utilizam essa arquitetura pode ser observada na FIGURA 1.

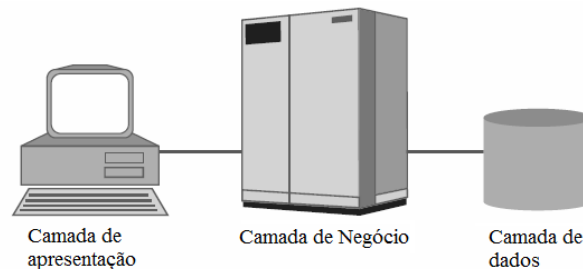


FIGURA 1 –Arquitetura de software em três camadas

A camada de dados é a responsável por fornecimento dos dados e atributos relacionados a uma determinada requisição. A camada de negócios é responsável por uma série de processamentos desses dados, necessários para responder a requisição e a apresentação final dos mesmos. Por fim, a camada de apresentação é necessária para formatação de como esses dados devem ser mostrados para o cliente final. As subseções a seguir irão detalhar o sistema proposto por esse trabalho no contexto das redes de distribuição de energia, de acordo com cada uma dessas camadas. O software ASW é um Sistema de Informação Georreferenciado (SIG) com interface web e sistema central de controle desenvolvido com essa arquitetura, com intuito de prover análise, monitoramento e auxiliar na operação de um alimentador em redes de distribuição de média tensão, bem como exibir suas informações elétricas e topológicas em uma interface georreferenciada. A seguir esse trabalho apresenta as funções de acordo com cada camada do sistema desenvolvido.

2.1 Camada de Dados

No contexto do sistema para análise da rede, a camada de dados é a camada responsável por prover todos os dados referentes à uma rede de distribuição, tanto elétricos como topológicos. Dessa forma, foram modeladas as entidades representando uma rede de distribuição de média tensão, a fim de prover uma base para cálculos relativos a algoritmos para análise da rede, como por exemplo, a estimação de estado. A FIGURA 2 ilustra as entidades até então modeladas e suas principais características.

As principais entidades modeladas no sistema são: Subestação rebaixadora, Alimentador, Trecho de rede, Poste contendo ou não Equipamento (Chave seccionadora, Transformador de distribuição, Banco de reguladores de tensão e Religador) e Consumo (também relacionado com sua curva típica de carga). Todos os equipamentos foram modelados levando em consideração o acoplamento desses dispositivos a controladores que possibilitem medições remotas em tempo real e até mesmo operação remota dos mesmos.

Tendo em vista a característica radial das redes de distribuição, um alimentador pode ser representado através da estrutura de dados do tipo árvore genérica, onde a subestação rebaixadora é o nó raiz da árvore. A partir da raiz uma hierarquia de postes e trechos de rede é construída. A FIGURA 3 ilustra essa abordagem. Um poste tem um ou vários trechos de rede como filhos (no caso, seriam os ramos do alimentador, também denominados *laterals*) e trechos de rede tem somente um poste como pai.

Foram utilizados o framework *Hibernate*(4) para mapeamento objeto-relacional e o SGDB (Sistema Gerenciador de Banco de Dados) *PostgreSQL*(5), (ambos fazem uso da filosofia de software livre). A abordagem utilizando o *Hibernate* entre a aplicação e o banco de dados, possibilita grande flexibilidade para o sistema em relação ao SGDB a ser utilizado, visto que essa ferramenta representa as informações em metadados, não vinculando o mapeamento à um banco de dados específico. Assim, apesar de que o SGDB escolhido para o projeto tenha sido o *PostgreSQL* (pois além de ser um software livre, é robusto e já bastante difundido) a modelagem dos dados poderia ser facilmente adaptada para a utilização de algum outro SGDB. Dessa forma, caso a base de dados da concessionária onde o ASW venha a ser utilizado esteja em conformidade à outro SGDB (como MySQL e Oracle, por exemplo), o sistema seria facilmente adaptado.

Diagrama de uma rede elétrica em árvore (radial). O sistema é composto por:

- Raiz:** Subestação Distribuidora (representada por um transformador no topo de um poste).
- Ramo:** O trecho da rede que se ramifica a partir da raiz.
- Poste inicial:** O primeiro poste de apoio da linha de distribuição.
- Poste final:** O último poste de apoio da linha de distribuição.
- Trecho de rede:** O segmento da rede entre dois postes consecutivos.

2.3 Camada de Negócio

Esse módulo foi desenvolvido utilizando a plataforma de programação Java, uma linguagem de programação que possui suporte à gerenciamento de memória automático, independência de plataforma, portabilidade, segurança, orientação a objetos, uma extensa API e uma grande comunidade de desenvolvedores (6). O módulo do servidor (camada de negócio) é o responsável pelo monitoramento e análise da rede, e é a parte do sistema onde se encontra a inteligência para análise e operação da rede inteligente. Esse módulo realiza o ajuste das cargas dos transformadores de distribuição de acordo com curvas típicas de carga em função do tipo de dia (dia útil, sábado ou domingo) baseado em informações históricas, também ilustrados em (7). Em seguida é feita a estimação do estado elétrico da rede, utilizando o modelo elétrico, dados estimados e dados em tempo real

oriundos do sistema supervisório. As subseções seguintes descrevem melhor tanto metodologia para a estimação de estado da rede como a aquisição de dados em tempo real através da integração à um sistema supervisório.

2.3.1 Estimação de estado

A estimação de estados é um problema que vem sendo discutido nos sistemas de transmissão há mais de 40 anos, sendo que o método conhecido como Weighted Least Square (WLS), e suas variantes, é ainda hoje um dos mais implementados pelos centros de controle. As peculiaridades dos sistemas de distribuição, como a baixa relação r/x , o frequente desequilíbrio entre as fases e a própria característica heterogênea das cargas tornou necessária a adaptação dos métodos WLS clássicos usados nos sistemas de transmissão para os sistemas de distribuição. A ideia do estimador de estados consiste em obter a melhor estimativa do estado da rede, baseando-se no uso do modelo elétrico da rede e uma série de medidas associadas aos seus pesos, que representam o grau de confiabilidade de cada uma destas. Nesse trabalho essa estimativa é obtida através da minimização da seguinte função objetivo (7):

$$\min j(x) = \sum_{i=1}^m W_i (z_i - h_i(x))^2 = [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad \{1\}$$

Onde W_i representa o peso associado à medida z_i e $h_i(x)$ a função de correção. A solução do problema se dá através da resolução deste conjunto de equações lineares (normal equations) a cada iteração computando a correção $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$.

$$[G(x^k)] \Delta x^k = H^T(x^k) W [z - h(x^k)] \quad \{2\}$$

Onde H representa a matriz jacobiana e $G(x)$ é conhecida como matriz de ganho e tipicamente representada por:

$$G(x) = H^T(x) W H(x) \quad \{3\}$$

A grandeza selecionada para o vetor de estados é a magnitude e ângulo de tensão, que é representado por $x = [\theta V]$. Devido ao desequilíbrio de fases e o fato de que muitos ramos (*laterals*) são monofásicos ou bifásicos, além das cargas que são em grande número monofásicas (residências) o vetor de estados precisa representar magnitude e ângulo de tensão nas três fases de forma distinta. O ângulo da fase A (θ_1) não necessita ser representado por ser este o ângulo de referência.

$$x = [\theta_2 \quad \theta_3 \quad V_1 \quad V_2 \quad V_3] \quad \{4\}$$

Desta forma também as equações que representam a corrente nos trechos de rede, em função dos valores de tensão nos seus terminais podem ser escritas da forma:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s,1} - V_{e,1} \\ V_{s,2} - V_{e,2} \\ V_{s,3} - V_{e,3} \end{bmatrix} \quad \{5\}$$

Onde l é o comprimento do trecho, a matriz y é a matriz de admitância e V_s e V_e são a tensão no início e no fim do trecho, respectivamente. Maiores detalhes a respeito dos métodos utilizados para estimação de estado podem ser encontrados no trabalho desenvolvido em (7).

2.3.2 Comunicação com o sistema supervisório

Para que seja possível ao ASW obter informações em tempo real, tanto para a estimação de estado como para funções relativas à operação inteligente de redes de distribuição, é necessária uma infraestrutura de comunicação. Desta maneira, nesse trabalho o módulo servidor do ASW é integrado via protocolo MODBUS junto a um sistema supervisório, o qual é responsável por adquirir dados em tempo real e monitorar medidores e controladores de equipamentos na infraestrutura crítica da rede. Esta abordagem permite a integração do ASW a qualquer sistema supervisório, já que o protocolo MODBUS além de possuir simples implementação, é bastante difundido na indústria (8). O uso de um sistema supervisório, por sua vez, permite abstrair detalhes mais complexos de outros protocolos mais modernos como DNP3 e IEC61850, além de permitir uma interface única de acesso aos equipamentos para o sistema de controle de operação da rede. A FIGURA 4 ilustra essa infraestrutura.

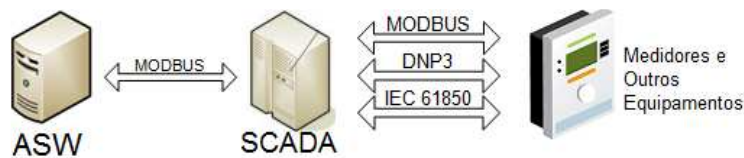


FIGURA 4 – Arquitetura da comunicação entre o ASW, sistema supervisório e demais equipamento

O MODBUS é um protocolo de mensagens na camada de aplicação para comunicações cliente/servidor entre dispositivos conectados em diferentes tipos de barramentos ou redes. O protocolo MODBUS contém basicamente três variantes: RTU, ASCII e TCP/IP. O modo RTU é a variante mais comum e base das outras. Nela a transmissão é feita usando código binário, representado por N duplas de caracteres em hexadecimal, geralmente utilizando como meio físico uma porta serial, padrão RS232. Já em ASCII são usados caracteres da tabela ASCII para representar a mensagem, tornando-a mais facilmente lida por seres humanos. Por fim a variante TCP/IP, que utiliza a RTU como base, mas utiliza como meio físico a *ethernet*, eliminando somente os bits de checagem de erros, transferindo para o protocolo TCP/IP essa tarefa. O modo TCP/IP foi escolhido como padrão da comunicação nesse trabalho, tendo em vista que o mesmo já é amplamente utilizado em aplicações comerciais e industriais (8,9).

2.4 Camada de Apresentação

Essa parte do sistema é a responsável por formatar a exibição dos dados e fornecer a interface com o usuário final do sistema. Tendo isso em vista foi utilizado o *Google Web Toolkit* (GWT) e *Google Maps Api-GWT* para facilitar a construção da interface web (navegador) com o cliente, a qual é representada por um mapa contendo informações elétricas e topológicas das entidades modeladas. O GWT possui o mecanismo *ARPC* (*Asynchronous Remote Procedure Call*) para comunicação assíncrona de maneira simples entre a camada de apresentação e a camada da lógica de negócios e foi escolhido para esse trabalho principalmente pelo compromisso do mesmo de gerar código Javascript otimizado para diversos navegadores, inclusive para navegadores de dispositivos móveis *Android* e *Iphone*(10), o que viabiliza a utilização de terminais com capacidade de processamento limitada para apresentação dos dados.

A partir das informações requisitadas ao servidor pelo usuário, que pode ainda consulta a base de dados, um diagrama unifilar de um alimentador de média tensão é exibido num mapa que faz uso da base cartográfica fornecida pelo *Google Maps*, onde são exibidos trechos de rede, transformadores, chaves, banco de capacitores, reguladores de tensão e a subestação originária de um alimentador de média tensão em um ambiente georreferenciado. Ao clicar em algum desses componentes ou selecionar algum algoritmo para execução são então buscadas as informações referentes a essa requisição. A partir disto existe uma etapa de tradução, onde uma versão mais leve dessas informações é armazenada no cliente para então serem exibidas no mapa. Essa tradução possibilita que os dados sejam exibidos mesmo em dispositivos com poder computacional relativamente baixo, como *tablets* e *smartphones*.

3.0 - RESULTADOS

Um sistema central de controle e SIG (o ASW) separado logicamente em três camadas distintas (dados, negócio e apresentação), bem como sua comunicação através do protocolo MODBUS com um sistema supervisório responsável por adquirir dados em tempo real e vir a operar equipamentos na infraestrutura da rede foram desenvolvidos. O módulo servidor (camada de negócio) através do ajuste de cargas nos transformadores de distribuição da rede, juntamente com um estimador de estado utilizando essas medidas em tempo real permite ao operador do sistema uma melhor análise de um alimentador de média tensão. Uma IHC (interface Humano-Computador) georreferenciada foi proposta como módulo cliente (camada de apresentação) do ASW, tornando possível a localização espacial e melhor visualização do estado elétrico estimado dos trechos de rede e equipamentos de um alimentador de média tensão. A FIGURA 5 ilustra o uso de medidas remotas e em tempo real de um medidor acoplado num banco de reguladores de tensão adquiridas por um sistema supervisório, no ASW. Na FIGURA 6 é possível observar a utilização do ASW em um navegador web de um *smartphone* baseado em *Android*.

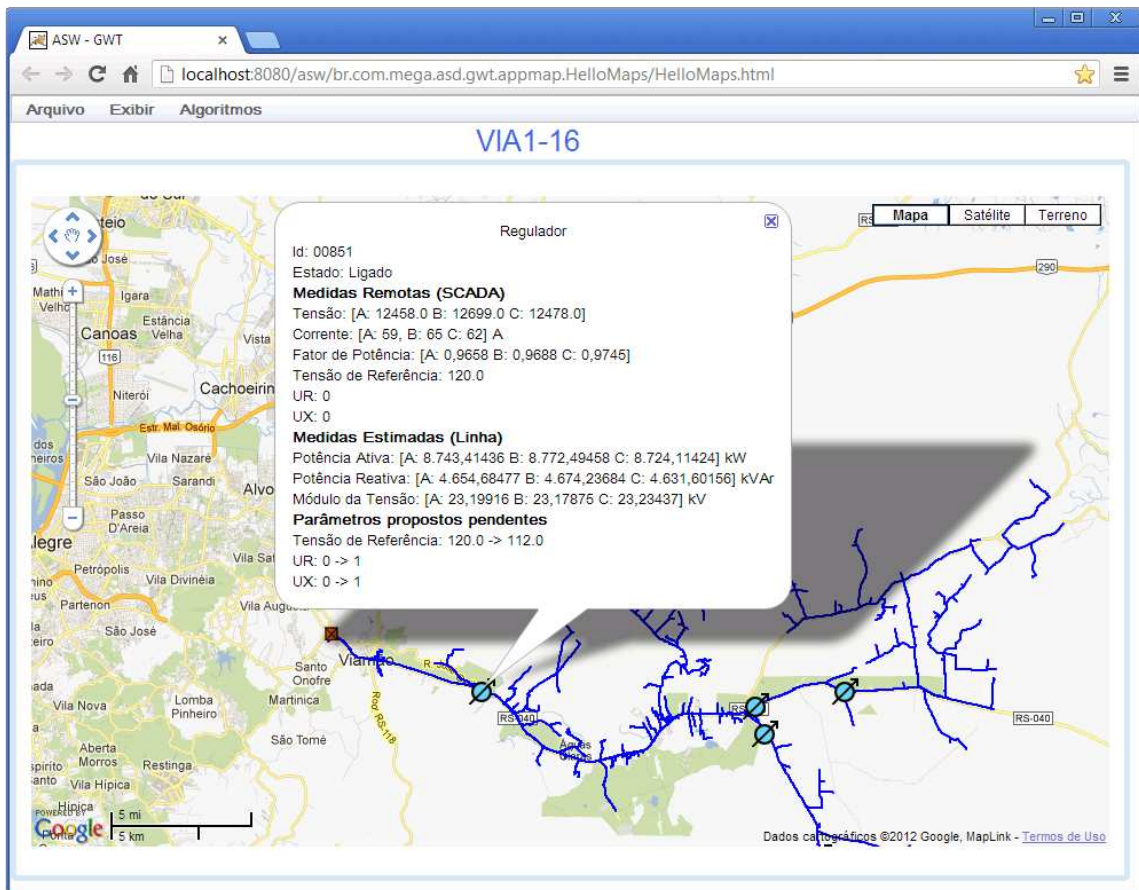


FIGURA 5 – Uso de medidas remotas e em tempo real vindas do sistema supervisorio no ASW

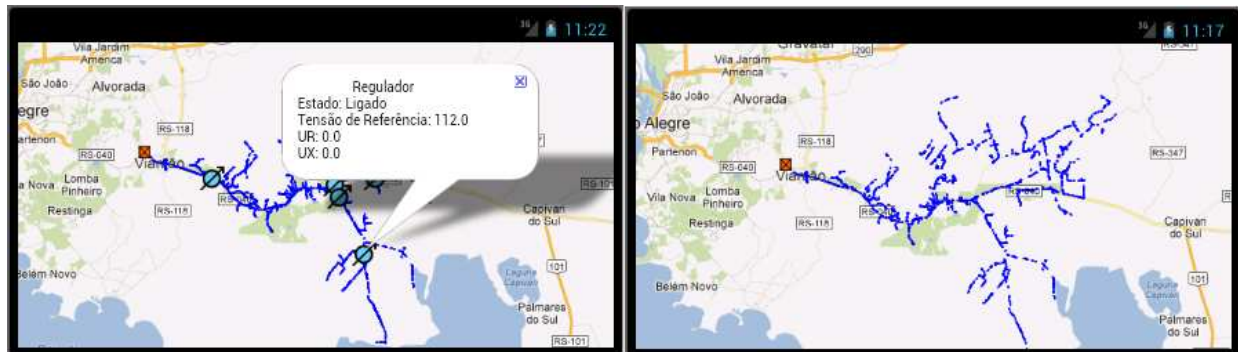


FIGURA 6 – Interface do ASW com o usuário através de um *smartphone*

4.0 - CONCLUSÃO

Tendo em vista a complexidade e diversidade de características das redes de distribuição, elas acabam impondo grandes dificuldades à operação dentro dos limites estabelecidos de qualidade. Objetivando uma melhora nestas e outras questões, elas estão sofrendo uma intensa modernização, através da instalação de novos equipamentos que permitem o monitoramento e operação de forma remota e em tempo real.

Neste sentido, os sistemas de computação que permitem a análise e operação destas redes terão uma grande importância, principalmente com as iniciativas de redes inteligentes (Smart Grids). Desta forma, esse trabalho apresentou as etapas para o desenvolvimento de um Sistema de Informações Georreferenciadas e Sistema central de controle (o ASW) em três camadas, objetivando fornecer uma melhor análise de alimentadores em uma rede de distribuição. Com o sistema foi possível verificar a topologia de um alimentador de média tensão, bem como visualizar os dados e atributos dos trechos de rede e equipamentos do mesmo, além de analisar seu perfil de tensão através da metodologia de estimação de estado em conjunto à aquisição de dados em tempo real, por meio de um sistema supervisorio.

A abordagem em três camadas em conjunto à utilização da tecnologia Java e frameworks como Google

Web Toolkit e GoogleMaps API, permitiu a construção de uma aplicação de internet com interface georreferenciada. Isto torna possível a sua operação através de qualquer computador que tenha acesso à internet e um navegador instalado, ou até mesmo dispositivos com baixa capacidade de processamento (*tablets* e *smartphones*), graças à capacidade de geração automática de códigos Javascript otimizado pelo GWT.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Zhao Feng, "Research on the WebGIS Space Vector Data Based on the J2EE," Management and Service Science (MASS), 2010 International Conference on, pp.1,4, 24-26 Aug. 2010
- (2) Romero, M.; Pardo, R.; Gallego, L.; Pavas, A., "Web based management system for power quality assessment and detection of critical zones," Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on, pp.1,8, 5-7 Dec. 2011
- (3) He Liduo; Chen Yan, "Design and implementation of Web Content Management System by J2EE-based three-tier architecture: Applying in maritime and shipping business," Information Management and Engineering (ICIME), 2010 The 2nd IEEE International Conference on, pp.513,517, 16-18 April 2010
- (4) Hibernate – Disponível em <http://www.hibernate.org/>
- (5) PostgreSQL – Disponível em <http://www.postgresql.org/>
- (6) Ramos, S.; Taboada, G.L.; Tourino, J.; Doallo, R., "Scalable Java Communication Middleware for Hybrid Shared/Distributed Memory Architectures," High Performance Computing and Communications (HPCC), 2011 IEEE 13th International Conference on , vol., no., pp.221,228, 2-4 Sept. 2011
- (7) Milbradt, R. G. ; Canha, L. N. ; Pereira, P. R. S. ; Abaide, A. R. ; Garcia, L. M. ; Schmaedecke, S.; "Real-Time Evaluation of Voltage Control in Distribution Systems Using Remote Measurements and Smart Meters", EEM - 9th International Conference on the European Energy Market, Florença, 2012.
- (8) Parthasarathy, S.; Kundur, D.; "Bloom filter based intrusion detection for smart grid SCADA," Electrical & Computer Engineering (CCECE), 2012 25th IEEE Canadian Conference on, pp.1-6, April 29 2012- May 2 2012.
- (9) JIANG Bin; L1U Yancheng; SUN Fanjin; TANG Weiwei; "Design of Industrial Control Network Based on Modbus/TCP," Low Voltage Apparatus, 2007, 13, pp.30-33
- (10) Pawlak, P.; Sakowicz, B.; Mazur, P.; Napieralski, Andrzej, "Social network application based on Google Web Toolkit," CAD Systems in Microelectronics, 2009. CADSM 2009. 10th International Conference - The Experience of Designing and Application of, pp.461,464, 24-28 Feb. 2009
- (11) "GWT - Developing with Google Web Toolkit" - Disponível em <https://developers.google.com/web-toolkit/overview?hl=pt-BR> - Acessado em abril de 2013.

1.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael Gressler Milbradt é Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Santa Maria (2004), com mestrado em Engenharia Elétrica (2007) também na Universidade Federal de Santa Maria, onde atualmente cursa o Doutorado em Engenharia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica e na área de Ciência da Computação como Analista de Sistemas e Gerente de Projetos. Sua área de pesquisa atual está relacionada ao desenvolvimento e implantação de sistemas de informação e estimadores de estado para redes de distribuição inteligentes.