



Alexandre Junqueira Barbosa Vianna

**Alocação Inteligente de Quadros de
Distribuição da Indústria**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza
Co- Orientador: Prof. Rodrigo Flora Calili

Rio de Janeiro
Agosto 2015



Alexandre Junqueira Barbosa Vianna

**Alocação Inteligente de Quadros de Distribuição
da Indústria**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Rodrigo Flora Calili

Co-Orientador

Departamento de Metrologia – PUC-Rio

José Francisco Moreira Pessanha

Cepel

Prof. Fernando Luiz Cyrino de Oliveira

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de Agosto de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Alexandre Junqueira Barbosa Vianna

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela EE-UFRJ (Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 1996.

Ficha Catalográfica

Vianna, Alexandre Junqueira Barbosa

Alocação inteligente de quadros de distribuição da indústria / Alexandre Junqueira Barbosa Vianna ; orientador: Reinaldo Castro Souza ; co-orientador: Rodrigo Flora Calili. – 2015.

102 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Alocação Inteligente de quadros de distribuição. 3. Posicionamento de quadros de distribuição. 4. Cabos elétricos. 5. Otimização de custos de cabos. 6. Redes Inteligentes. 6. Algoritmos genéticos. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Calili, Rodrigo Flora. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Agradeço a minha família pela paciência, compreensão e apoio incondicional que tiveram comigo, em especial, a meus filhos Julia, Felipe e André que deixaram de contar com a minha presença e atenção durante muitas e muitas horas por conta dessa iniciativa.

A meu orientador professor Reinaldo Castro Souza pela orientação precisa e experiente que me concedeu nos momentos principais do processo. Agradeço a meu co-orientador professor Rodrigo Flora Calili pela confiança que depositou em mim desde o início e pelas correções detalhadas que fizeram do trabalho final um texto muito melhor do que sua versão original.

Aos amigos e colegas que me incentivaram e ajudaram ao longo desse período, em especial a Fabrício Vianna Calvelli pela avaliação isenta do trabalho, e a turma do laboratório de sistemas de energia da PUC-Rio pelo apoio sempre que necessitei.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, pela qualidade do ensino e excelente infraestrutura, essenciais para a execução do curso de mestrado.

Um agradecimento especial para Alcina Portes pelo seguimento cuidadoso que deu ao processo sem me deixar perder nenhuma data.

A PUC-Rio, pelos auxílios concedidos ao longo do período de estudos.

Resumo

Vianna, Alexandre Junqueira Barbosa; Castro, Reinaldo Souza (Orientador); Calili, Rodrigo Flora (Co-orientador). **Alocação Inteligente de Quadros de Distribuição da Indústria**. Rio de Janeiro, 2015. 102p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nas instalações elétricas de baixa tensão de uma planta industrial está concentrado grande parte do custo necessário para sua construção. Nesse contexto, os cabos elétricos são o item mais relevante e poucas iniciativas visando sua redução têm sido notadas. Apesar dos limites impostos pelas normativas vigentes e pelos próprios usuários dessas plantas, existem medidas que podem levar a redução do custo dos cabos elétricos, entre elas, a alocação inteligente dos quadros de distribuição na baixa tensão. O objetivo desse trabalho é definir uma metodologia para o posicionamento ótimo desses quadros de distribuição, minimizando o custo dos cabos elétricos dentro de uma área onde as cargas a serem alimentadas estão posicionadas de modo fixo. São definidas algumas restrições ao posicionamento dos quadros e também é preparada uma interface gráfica que facilita a interpretação dos resultados. Faz-se então uma comparação dos resultados obtidos com dados reais de uma instalação industrial cujo projeto básico fora realizado da forma tradicional, sem uso de qualquer técnica inteligente para a alocação dos quadros de distribuição. Dessa comparação nota-se que o potencial de redução pode alcançar mais de 40% do custo dos cabos elétricos previsto pelo projeto básico. A redução na quantidade de cabos elétricos trás vários efeitos colaterais positivos, entre eles a redução das perdas por efeito Joule e a redução nas emissões de CO₂ cujos impactos são mensurados também. Por fim, são lançadas ideias para a evolução da metodologia de modo que sua aplicação seja mais abrangente e simples, preparando-a para o uso em qualquer situação, como uma nova ferramenta dos projetos elétricos.

Palavras-chave

Alocação inteligente de quadros de distribuição; posicionamento de quadros de distribuição; cabos elétricos; otimização de custos de cabos; redes inteligentes; algoritmos genéticos.

Abstract

Vianna, Alexandre Junqueira Barbosa; Castro, Reinaldo Souza (Advisor); Calili, Rodrigo Flora (Co-advisor). **Intelligent Allocation for Industry Distribution Boards**. Rio de Janeiro, 2015. 102p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In electrical installations of low voltage of an industrial plant is concentrated much of the cost required for its construction. In this context, the electrical wires are the most important item and few initiatives aimed at their reduction has been noted. Despite the limitations imposed by current regulations and by the users of these plants, there are steps that can lead to reducing the cost of electric cables, among them the intelligent allocation of switchboards at low voltage. The aim of this study is to define a methodology for the optimal positioning of these distribution boards, minimizing the cost of electrical cables within an area where the loads to be fed are positioned permanently. A graphical interface that facilitates the interpretation of results are set some restrictions on placement of tables and is also prepared. Then it makes a comparison of the results with real data of an industrial installation whose basic design was done the traditional way, without using any smart technique for allocation of the switchboard. This comparison we note that the reduction potential can reach more than 40% of the cost of electric cables provided by the basic design. The reduction in the amount of electrical cables behind several positive side effects, including reducing losses by Joule effect and the reduction in CO2 emissions whose impacts are measured as well. Finally, ideas are thrown to the evolution of the methodology so that their application is more comprehensive and simple to prepare it for use in any situation, as a new tool of electrical projects.

Keywords

Intelligent allocation for distribution boards; positioning distribution boards; electrical cables; cost optimization; intelligent networks; genetic algorithms.

Sumário

1	Introdução	12
1.1.	Motivação	12
1.2.	Objetivo	16
1.3.	Organização do trabalho	17
2	Redes Inteligentes	19
2.1.	O papel das redes inteligentes no cenário atual	20
2.2.	Definição de redes inteligentes	21
2.3.	Redes inteligentes na indústria	23
2.3.1.	MicroGrid	24
2.3.2.	Distribuição elétrica inteligente na baixa tensão	27
3	Análise do problema	30
3.1.	Projeto elétrico na indústria	30
3.1.1.	Potencial de economia	31
3.1.2.	Possibilidades de posicionamento	32
3.1.3.	Restrições de posicionamento	33
3.2.	Interferência de normas e padrões construtivos	34
3.2.1.	Dimensionamento de cabos elétricos	35
3.2.2.	Divisão da instalação elétrica	40
3.3.	Alocação inteligente de quadros de distribuição	44
3.3.1.	Ajuste pela localização	45
3.3.2.	Ajuste pela composição e pela quantidade	47
3.3.3.	Considerações sobre o preço dos cabos de cobre	48
3.4.	Efeito Joule e emissões de CO ₂	52
3.4.1.	Efeito Joule	53
3.4.2.	O Efeito Estufa e as emissões CO ₂	54
4	Técnica de otimização	57
4.1.	Características do problema	57
4.1.1.	Espaço de busca	57

4.1.2. Estrutura do problema	58
4.1.3. Quantidade de variáveis	58
4.1.4. Quantidade de parâmetros	59
4.2. Características dos algoritmos genéticos	59
4.3. Razões para a escolha da técnica de otimização	61
5 Detalhamento da solução	63
5.1. Modelagem do algoritmo genético	63
5.2. Metodologia para alocação inteligente	65
5.3. Definição das perdas por efeito Joule e emissões de CO ₂	67
6 Estudo de caso e resultados	69
6.1. Dados do caso estudado	69
6.1.1. Considerações sobre as cargas	72
6.1.2. Considerações sobre as restrições ao posicionamento	73
6.2. Resultados	74
6.3. Análise comparativa dos resultados	78
6.3.1. Algoritmo genético	79
6.3.2. Alocação inteligente	81
6.3.3. Impacto sobre as perdas Joule	86
6.3.4. Impacto sobre as emissões de CO ₂	88
7 Conclusões e trabalhos futuros	90
7.1. Conclusões	90
7.2. Aperfeiçoamentos e trabalhos futuros	93
8 Referências Bibliográficas	95
Anexo A – Informações detalhadas dos resultados	99

Lista de Figuras

Figura 1 - Preço do cobre no mercado internacional.....	15
Figura 2 - Redes inteligentes no cenário atual.	21
Figura 3 - Cabos classe 750V.	50
Figura 4 - Cabos classe 0,6/1kV.	51
Figura 5 - Algoritmos Genéticos	60
Figura 6 - Escolha do método de otimização.	62
Figura 7 - Interface gráfica.	64
Figura 8 – Efeito da frequência sobre a resistência.	68
Figura 9 - Comparação das médias dos resultados.	79
Figura 10 - Dispersão das amostras.	80
Figura 11 - Evolução da otimização da melhor.	80
Figura 12 - Posicionamento antes da alocação inteligente.	82
Figura 13 – Posicionamento depois da alocação inteligente.....	84

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados do projeto básico.....	70
Tabela 2 - Dados dos alimentadores gerais.....	70
Tabela 3 - Dados dos alimentadores de carga.....	71
Tabela 4 - Dimensões principais da planta.	73
Tabela 5 – Restrições de afastamento do perímetro.....	74
Tabela 6 - Resultados do experimento 1.....	75
Tabela 7 - Resultados do experimento 2.....	76
Tabela 8 - Resultados do experimento 3.....	77
Tabela 9 - Resultados do experimento 4.....	78
Tabela 10 - Melhores resultados de cada experimento.....	83
Tabela 11 - Custo detalhado da obra.	85
Tabela 12 - Perdas Joule.	87
Tabela 13 - Redução percentual das perdas Joule	87
Tabela 14 - Redução percentual das emissões CO2	89

Lista de Abreviaturas e Siglas

IED - *Intelligent Eletronic Device*

SCADA – *Supervisory Control and Data Aquisition*

IEC - *International Electrotechnical Comission*

IEEE – *Institute of Electric and Electronic Engineers*

EPRI - *Electric Power Research Institute*

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro

EPE – Empresa Brasileira de Pesquisa Energética

GEE – Gases de Efeito Estufa

ACV – Análise do Ciclo de Vida

CO₂ – Dióxido de Carbono

PMU – *Phasor Measurement Unit*

XLPE – Polietileno reticulado

EPR – Borracha sintética de etileno-propileno

PVC – Policloreto de polivinila

NBR – Norma Técnica Brasileira

SEP – Sistema Especial de Proteção

CDC – Comutador de derivação sob carga

QD – Quadro de Distribuição

THS – Tarifa Horo-Sazonal

DTS – *Decision Tools Suite*

IEA – *International Energy Agency*