

Figura 9.35 – Chaves fusíveis, sem equipamentos existentes – energia não fornecida, por quantidade de equipamentos e diferença de desempenho através do algoritmo de minimização.

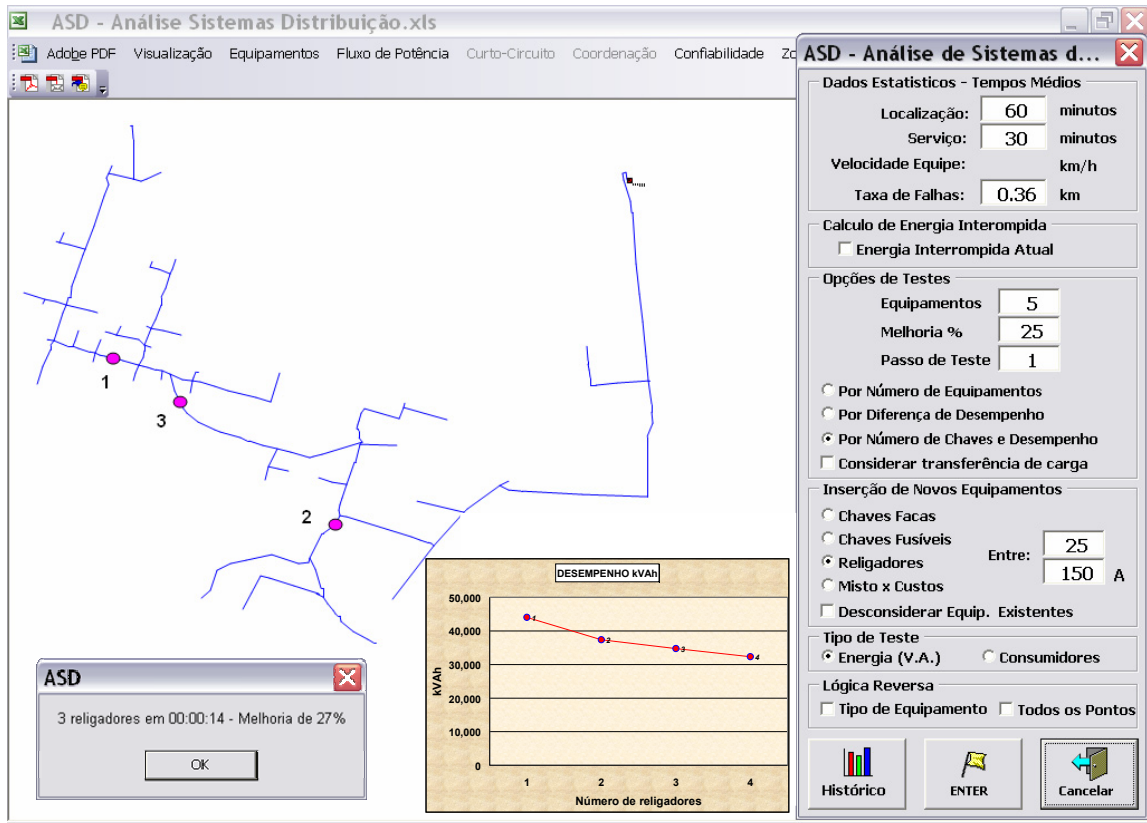


Figura 9.36 – Religadores, com equipamentos existentes – energia não fornecida, por quantidade de equipamentos e diferença de desempenho através do algoritmo de minimização.

A análise será realizada para o critério que insere equipamentos de vários tipos e informa o custo desta medida para melhorar a confiabilidade do alimentador em estudo, para este caso o objetivo de melhoria no desempenho a ser atingido é de 35%. O resultado é apresentado nas Fig. 9.37.

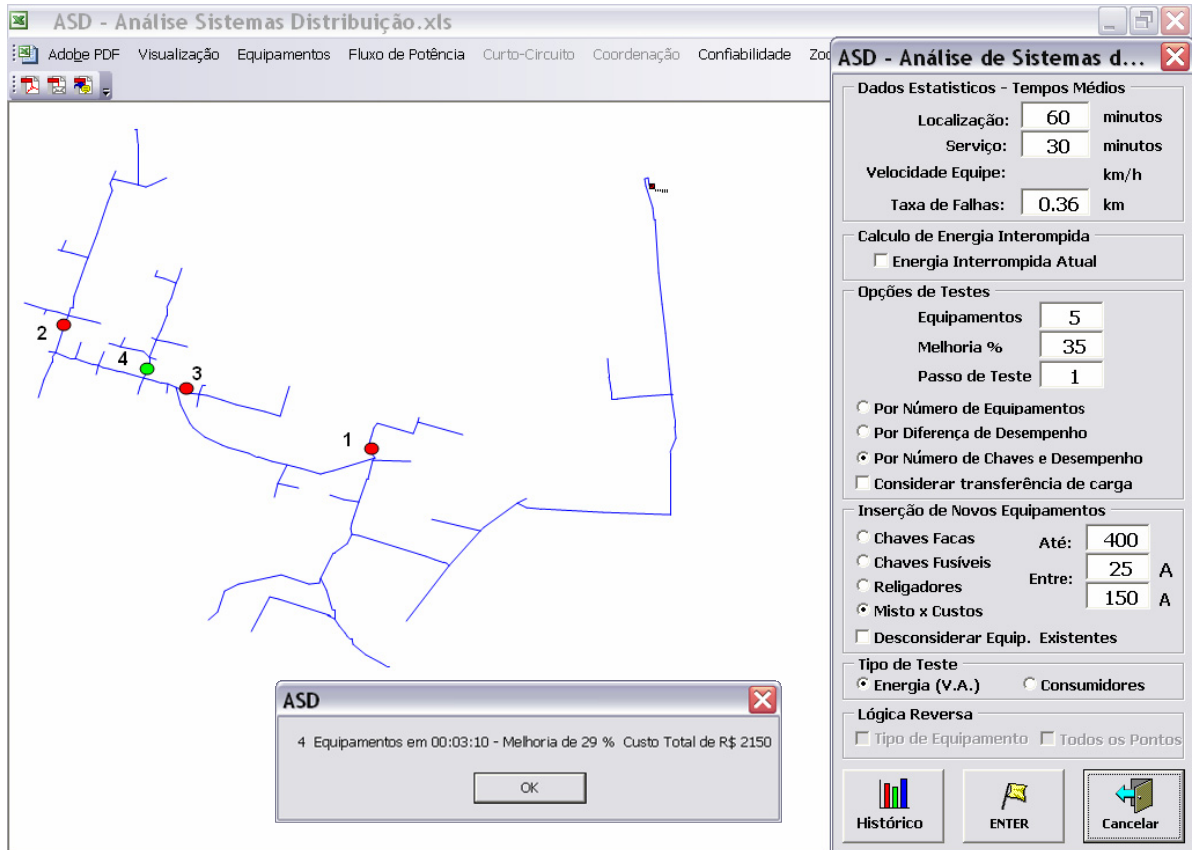


Figura 9.37 – Todos os equipamentos – com equipamentos existentes – energia não fornecida, por quantidade de equipamentos e desempenho através do algoritmo de minimização.

Para a característica de confiabilidade – consumidores-hora sem fornecimento de energia, o resultado foi o mesmo encontrado para a característica de confiabilidade – energia não fornecida considerando os equipamentos existentes, Fig. 9.37. Porém quando os equipamentos instalados no alimentador são desconsiderados o resultado obtido é mostrado na Fig. 9.39.

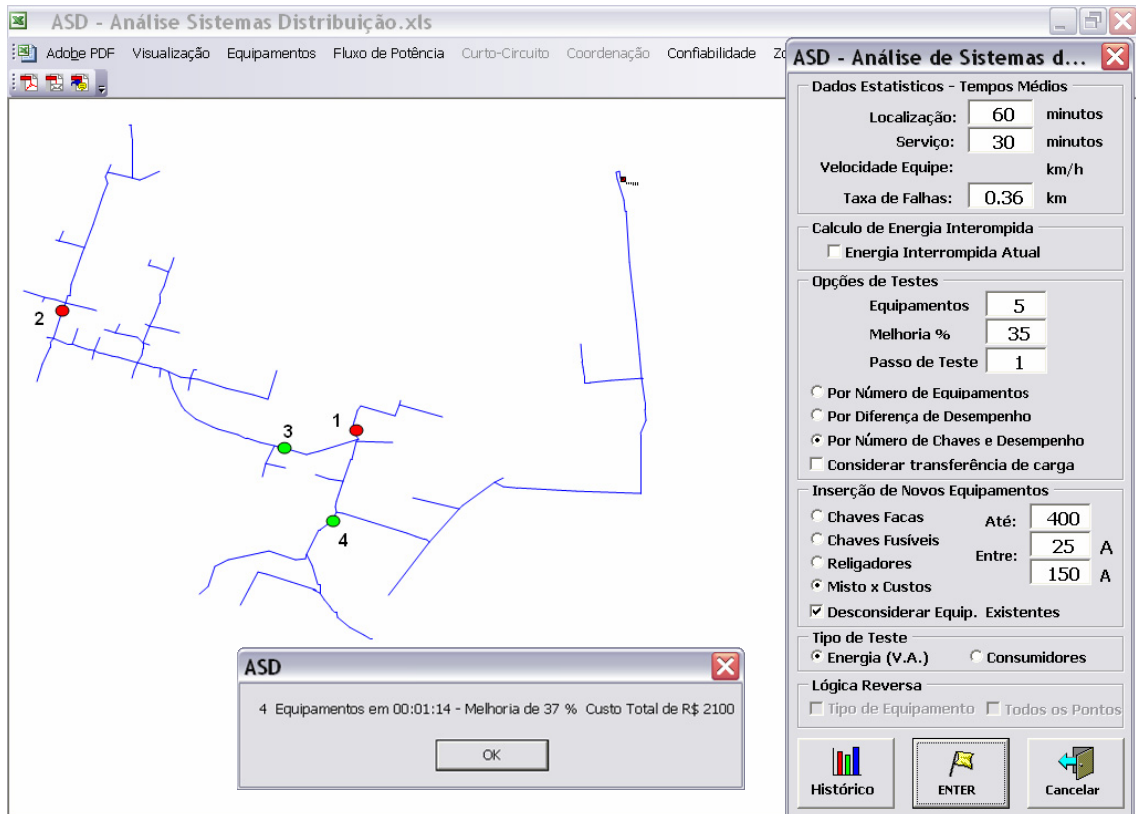


Figura 9.38 – Todos os equipamentos – sem equipamentos existentes – energia não fornecida, por quantidade de equipamentos e desempenho através do algoritmo de minimização.

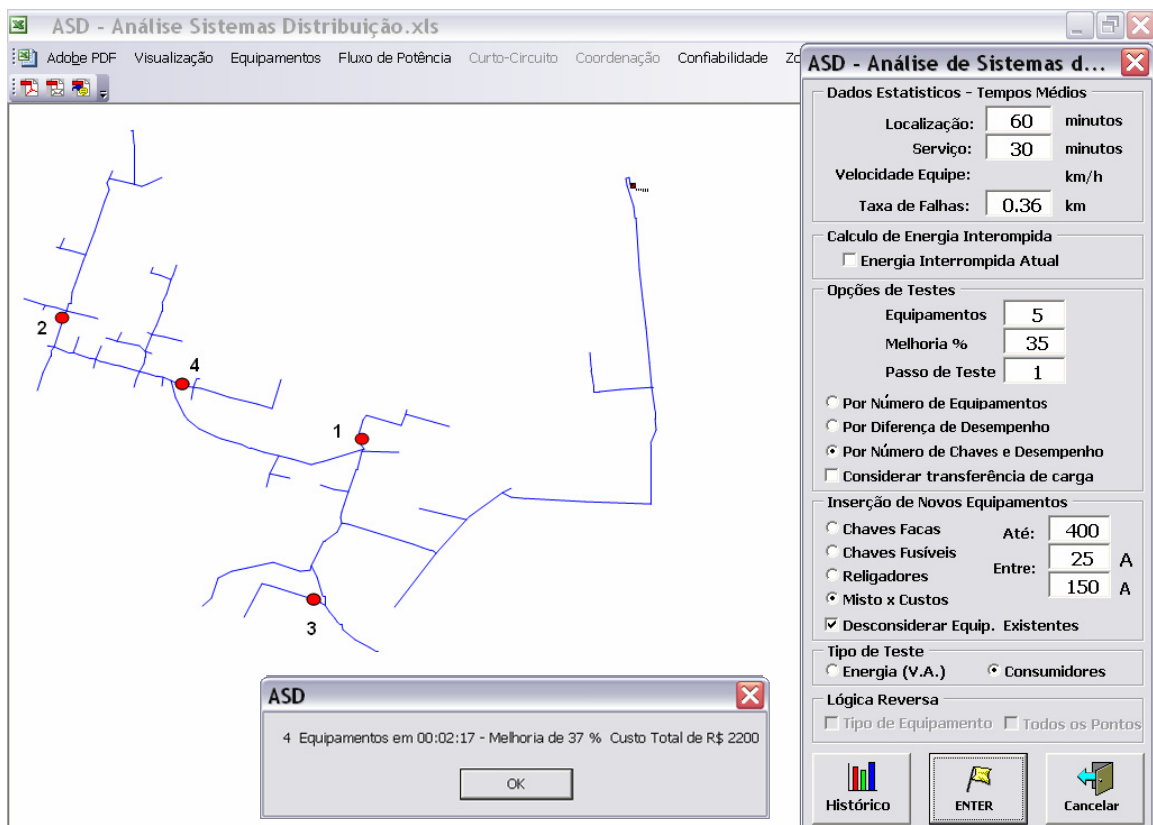


Figura 9.39 – Todos os equipamentos – sem equipamentos existentes – consumidores sem energia, por quantidade de equipamentos e desempenho através do algoritmo de minimização.

Após toda análise realizada conclui-se que cada alimentador tem sua própria localização ótima dos equipamentos de comutação para cada característica integral de confiabilidade dependendo da distribuição de carga e de consumidores, da sua topologia, do tipo de equipamento de comutação a ser instalado, etc.

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

O consumo “per capita” de energia elétrica e o índice de crescimento deste consumo indica o grau de desenvolvimento de um povo, dada a sua ligação direta com a produção industrial e o poder aquisitivo da população. Além disso, um sistema de energia elétrica, moderno deve oferecer aos consumidores uma boa qualidade de serviço com a segurança de um fornecimento contínuo, com o mínimo de interrupções, sejam elas programadas ou não, de curta ou longa duração.

Considerando-se, que os consumidores exigem um serviço com cada vez menos interrupções, que o agente regulador exige das concessionárias de distribuição de energia elétrica indicadores de continuidade de serviço cada vez mais rigorosos, um instrumento que permita uma modelagem e otimização da confiabilidade do seu sistema é extremamente útil. As concessionárias devem ser as principais interessadas em manter um fornecimento de energia confiável, pois no caso de defeito deixam de vender o seu produto e podem ser penalizadas, pelo agente regulador, com a aplicação de multas.

O sistema de distribuição historicamente sempre recebeu menos atenção do que os sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, no entanto é o principal responsável pela interrupção do fornecimento de energia para os consumidores. Nos últimos anos, o sistema de distribuição começou a receber mais cuidado, principalmente durante o processo de reestruturação e privatização do setor elétrico ocorrido em vários países do mundo.

Nesse trabalho, primeiramente foi verificada a situação brasileira, regional e estadual a respeito dos indicadores de continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica, DEC e FEC. Está análise permitiu constatar que o estado do Rio Grande do Sul e conseqüentemente suas concessionárias estão com seu desempenho médio abaixo do contexto

nacional, levando a concluir que medidas precisam ser tomadas de forma a melhorar o desempenho gaúcho quanto ao fornecimento de energia.

Os indicadores DEC e FEC apurados pelas concessionárias não contribuem para a solução dos problemas de modelagem e otimização da confiabilidade, pois não identificam as causas e nem as ações necessárias para melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia. Diante do exposto, foi necessária a criação de características integrais de confiabilidade baseadas na topologia, localização dos equipamentos de comutação, cargas e consumidores atendidos fundamentadas nas informações disponíveis nas concessionárias. Tais características são: valor esperado de energia não fornecida ou número esperado de consumidores-hora sem fornecimento de energia. Estas características integrais de confiabilidade propostas estão de acordo com as características de confiabilidade brasileiras, e as completam como instrumento para solução dos problemas de otimização de confiabilidade.

Para a determinação das características integrais de confiabilidade é necessária a aquisição de dados primários, tais como: frequência de falhas, taxa de falhas e as parcelas do tempo de restabelecimento do fornecimento de energia. Estes dados que são obtidos da base de dados da concessionária e precisam ser validados de forma que as características de confiabilidade tenham valores confiáveis.

Para a estimativa das características integrais de confiabilidade foi utilizada a matriz-lógico estrutural que permite determinar de forma analítica a função objetivo e restrições, limitando o custo do aumento da confiabilidade às condições impostas pela disponibilidade financeira da concessionária ou níveis requeridos de confiabilidade.

A solução do problema de localização ótima dos equipamentos de comutação, utilizando os métodos exatos de otimização inteira ou discreta provoca dificuldades computacionais, especialmente levando-se em conta a dimensão do modelo a ser analisado, neste caso, os alimentadores do sistema de distribuição onde existe a possibilidade de instalação de um equipamento de comutação em cada trecho da rede.

Com a finalidade de superar as dificuldades citadas foi sugerida uma combinação de algoritmos heurísticos e formais de otimização que levam a uma solução ótima ou quase ótima sem as desvantagens peculiares dos métodos exatos de otimização.

Para a localização ótima dos equipamentos de comutação através do procedimento proposto pode ser utilizado tanto o algoritmo de minimização como o de maximização.

A abordagem proposta permite, depois da solução do problema de localização ótima do equipamento de comutação, analisar a eficiência de redistribuição das cargas elétricas entre alimentadores com o objetivo de redução das perdas de potência.

10.3 Contribuições

As etapas desenvolvidas neste trabalho foram:

1. Estabelecer as formulações do problema de otimização da confiabilidade em sistemas de distribuição considerando-se os interesses da concessionária e as informações disponíveis;
2. Analisar os dados estatísticos das interrupções do fornecimento de energia de uma concessionária gaúcha;
3. Modelar os indicadores de confiabilidade utilizando a matriz lógico-estrutural;
4. Analisar os métodos de otimização e algoritmos de adaptação da função objetivo e restrições para utilização de métodos de otimização discreta.
5. Desenvolver métodos heurísticos de otimização discreta, para a localização ótima de equipamentos de comutação em redes de distribuição.
6. Implementar os algoritmos desenvolvidos através de uma ferramenta computacional de forma a visualizar a topologia da rede e localizar os equipamentos instalados no alimentador.
7. Avaliar a eficiência das soluções propostas pela ferramenta computacional.
8. Aplicar os métodos e algoritmos desenvolvidos no projeto de P&D de uma concessionária gaúcha de energia elétrica.

Através da utilização da ferramenta computacional desenvolvida foi possível verificar a configuração de cada alimentador e as várias alternativas para reduzir o valor esperado de energia não fornecida ou o número esperado de consumidores-hora sem fornecimento de energia. Constatou-se, que com investimentos relativamente pequenos é possível melhorar de forma significativa o desempenho dos alimentadores de distribuição, através da localização ótima de equipamentos de comutação.

A localização ótima dos equipamentos de comutação é uma solução relativamente simples e com baixo custo que permitirá a concessionária melhorar sua atuação do ponto de vista da confiabilidade no fornecimento de energia.

10.2 Prosseguimento do trabalho

A pesquisa futura deve concentrar-se em três áreas principais:

- Analisar a incerteza das informações e sua influência para adequação da avaliação dos indicadores de confiabilidade e decisões tomadas através da utilização dos métodos de otimização propostos neste trabalho;
- Implementar através da ferramenta computacional a possibilidade da escolha dos melhores pontos de interligações entre alimentadores;
- Ampliar a pesquisa econômica de forma a verificar o custo/benefício da instalação dos equipamentos comparados ao prejuízo causado pela interrupção no fornecimento de energia.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. BILLINTON, R.; ALLAN R.; **Reliability evaluation of power systems**. Pitmann book. N.Y., London, 1984.
- [2]. BILLINTON, R.; CUI, L.; PAN, Z.; **Quantitative reliability considerations in the determination of performance-based rates and customer service disruption payments**. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, v. 149 Issue: 6, pp. 640 -644, Nov. 2002.
- [3]. BILLINTON, R.; GAN, L.; **Monte Carlo Simulation model for multiarea generation system reliability studies**. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, v. 140 Issue: 6, pp. 532 –538, Nov. 1993 C.
- [4]. WANG Z., SHOKOOH F.; OIU J.; **An efficient algorithm for assessing reliability indexes of general distribution system**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 17, n. 3, pp. 608-614, 2002.
- [5]. CHANG W. F.; WU Y. C.; **Optimal reliability design in an electrical distribution system via a polynomial-time algorithm**. Electric Power and Energy Systems, n. 25, pp. 659-666, 2003.
- [6]. GOEL L.; OU Y.; **Reliability worth assessment in radial distribution systems using the Monte Carlo simulation technique**. Electric Power System Research, n. 51, pp. 43-53, 1999.
- [7]. TSAO T.; CHANG H. C.; **Composite reliability evaluation model for different types of distribution systems**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 18, n. 2, pp. 924-930, 2003.

- [8]. ALLAN, R.; BILLINTON, R.; **Power system reliability and its assessment III. Distribution systems and economic considerations.** Power Engineering Journal [see also Power Engineer], v. 7 Issue: 4, pp. 185 –192, Aug. 1993.
- [9]. BILLINTON, R.; SINGH, G.D.; **Reliability assessment of transmission and distribution systems considering repair in adverse weather conditions.** Electrical and Computer Engineering, 2002. Canadian Conference on IEEE CCECE 2002, v.1, 12-15, pp. 88 –93, May 2002.
- [10].BILLINTON R.; WANG P.; **Distribution system reliability cost/worth analysis using analytical and sequential simulation technique.** IEEE Transaction on Power Systems, v. 13, n. 3, pp. 1245-1250, 1998.
- [11].BROWN R.; OCHOA J.; **Distribution system reliability: default data and model validation.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 13, n. 2, pp. 704-709, 1998.
- [12].WARREN C., AMMON R.; WELCH G.; **A survey of distribution reliability measurement practices in the USA.** IEEE Transaction on Power Delivery, v. 14, n. 1, pp. 250-257, 1999.
- [13].HORTON W., GOLDBERG S.; HARTWELL R.; **A cost/benefit analysis in feeder reliability studies.** IEEE Transaction on Power Delivery, v. 4, n. 1, pp. 446-452, 1989.
- [14].RODRIGUEZ, R.A.; VARGAS, A.; **Penalty costs by electric service quality as real time decision making criteria on load restoration in MV networks.** IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001, v. 1 , 28 Oct.-2 pp.287 – 292, Nov. 2001.
- [15].WARREN, C.A.; PEARSON, D.J.; SHEEHAN, M.T.; **A nationwide survey of recorded information used for calculating distribution reliability indices.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 18 Issue: 2, April 2003.

- [16]. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Legislação Normativa – Resolução N° 24 de 27.01.2000 – Continuidade de Serviço. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/biblioteca.cfm?target=indexren>. Acesso em 15 mar. 2004.
- [17]. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução N° 75 de 13.02.2003 – Altera dispositivos da Resolução N° 24 de 27.01.2000 – Continuidade de Serviço. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/biblioteca.cfm?target=indexren>. Acesso em 15 mar. 2004.
- [18]. KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; **Goal planning and risk analysis for distribution reliability indices**. Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482), v. 2 , 18-21 pp. 6, June 2001.
- [19]. GILLIGAN, S. R.; **A method for estimating the reliability of distribution circuits**. IEEE Transactions on Power Delivery, V. 7 Issue: 2, pp. 694 –698, April 1992.
- [20]. BILLINTON, R.; WIJARN WANGDEE; **Customer outage cost evaluation of an actual failure event**. Electrical and Computer Engineering, 2002. IEEE CCECE 2002. Canadian Conference on May 2002, v.1, pp. 94 -99.
- [21]. FUMAGALLI, E.; BLACK, J.W.; ILIC, M.; VOGELSANG, I.; **A reliability insurance scheme for the electricity distribution grid**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1, v. 1, pp.:261 – 266, July 2001.
- [22]. RAMIREZ-ROSADO, I. J.; BERNAL-AGUSTIN, J. L.; **Reliability and costs optimization for distribution networks expansion using an evolutionary algorithm**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 16, Issue: 1, pp. 111 –118, Feb 2001.
- [23]. KJOLLE G., ROLFSENG L. DAHL E.; **The economic aspect of reliability in distribution systems**. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 5, n. 2, pp. 1153-1157, 1990.

- [24].GOEL L.; BILLINTON R.; **Determination of reliability worth for distribution system planning.** IEEE Transaction on Power Delivery, v. 9, n. 3, pp. 1574-1583, 1994.
- [25].LEVITIN G., MAZAL-TOV S.; ELMAKIS D.; **Reliability indices of a radial distribution system with sectionalizing as a function of network structure parameters.** Electric Power System Research, n. 36, pp. 73-80, 1996.
- [26].MAKINEN, A.; PARTANEN, J.; LAKERVI, E.; **A practical approach for estimating future outage costs in power distribution networks.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5 Issue: 1, pp. 311 –316, Jan. 1990.
- [27].KUNTZ, P.A.; CHRISTIE, R.D.; VENKATA, S.S.; **A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders.** IEEE Transactions on Power Delivery,, v.16, Issue: 4, pp. 718 –723, Oct. 2001.
- [28].EICKHOFF F., HANDSHIN E.; HOFFMANN W.; **Knowledge based alarm handling and fault location in distribution networks.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 7, n. 2, pp. 770-776, 1992.
- [29].TINE, J.G.; WALDER, D.A.; **Improved distribution system reliability at northeast utilities: a case history.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, Issue: 2, pp. 689-696, Apr 1993.
- [30].ALLAN, R.N.; DA SILVA, M.G.; **Evaluation of reliability indices and outage costs in distribution systems.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 10 Issue: 1, pp. 413 –419, Feb. 1995.
- [31].BILLINTON R.; JOUNAWITHULA S.; **Optimal switching devices placement in radial distribution systems.** IEEE Transactions on Power Delivery, V. 11, N. 4, 1991, pp. 1646-1651
- [32].LEVITIN S., MAZAL-TOV S.; ELMAKIS D.; **Optimal allocation of sectionalizers in radial distribution networks.** Proceedings of the 1995 Stockholm Power Tech. Conference, PS25-01-0034, pp. 761-764, 1995.

- [33].LONGO C.; PUNTEL W.; **Evaluation of distribution system enhancement using value-based reliability planning procedures.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 15, n. 4, pp. 1148-1153, 2000.
- [34].TOLLEFSON G., BILLINTON R.; WACKER G.; **Comprehensive bibliography on reliability worth and electrical service consumer interruption costs: 1980-1990.** IEEE Transaction on Power Systems, v. 6, n. 4, pp. 1508-1514, 1991.
- [35].SANGHVI A.; **Measurement and application of customer interruption cost/value of service for cost-benefit reliability evaluation: some commonly raised issues.** IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1333-1344, 1990.
- [36].SULLIVAN M., VARDELL T.; **Interruption cost, customer satisfaction and expectations for service reliability.** IEEE Transaction on Power Systems, v. 11, n. 2, pp. 989-995, 1996.
- [37].GATES J., BILLINTON R.; WACKER G.; **Electrical service reliability worth evaluation for government, institutions and office buildings.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 1, pp. 43-50, 1999.
- [38].BILLINTON R.; WANG P.; **Reliability worth of distribution system network reinforcement considering dispersed customer cost data.** IEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution, v. 146, n. 3, pp. 318-324, 1999.
- [39].TOLLEFSON G., BILLINTON R., WAKER G., CHAN E.; AWEYA J.; **A Canadian customer survey to assess power system reliability worth.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 9, n. 1, pp. 443-450, 1994.
- [40].KOS P., BILLINTON R.; WACKER G.; **Cost of electric power interruptions in the agricultural sector–statistical analysis.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 6, n. 4, pp. 1432-1438, 1991.

- [41].BILLINTON R.; PANDEY M.; **Reliability worth assessment in a developing country-residential survey results**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 4, pp. 1226-1231, 1999.
- [42].PANDEY M.; BILLINTON R.; **Reliability worth assessment in a developing country-commercial and industrial survey results**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 4, pp. 1232-1237, 1999.
- [43].BILLINTON R., TOLLEFSON G.; WACKER G.; **Assessment of electric service reliability worth**. Electric Power and Energy Systems, v. 15, n. 2, pp. 95-100, 1993.
- [44].KARIUKI K., ALLAN R.; **Factors affecter customer outage cost due to electric service interruption**. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, v. 143, n. 6, pp.521-528, 1996.
- [45].SANGHVI A.; **Measurement and application of customer interruption cost/value of service for cost - benefit reliability evaluation: some commonly realised issues**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 5 n. 4, pp. 1333 – 1344, 1990.
- [46].KARIUKI K., ALLAN R.; **Assessment of customer outage cost due to electric service interruption: residential sector**. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, v. 143, n. 2, pp. 163-167, 1996.
- [47].KARIUKI K.; ALLAN R.; **Application of customer outage cost in system planning design and operation**. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, v. 143, n. 4, pp. 305-312, 1996.
- [48].CHEN R. L., ALLEN K.; BILLINTON R.; **Value-based distribution reliability assessment and planning**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 1, pp. 421-429, 1995.
- [49].BURNS S.; GROSS G.; **Value of service reliability**. IEEE Transaction on Power Systems, v. 5, n. 3, pp. 825-834, 1990.

- [50].GOEL L.; BILLINTON R.; **Evaluation of interrupted energy assessment rates in distribution systems.** IEEE Transaction on Power Delivery, v. 6, n. 4, pp. 1876-1882, 1991.
- [51].KARIUKI K.; ALLAN R.; **Evaluation of reliability worth and value of lost load.** IEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution, v. 143, n. 2, pp. 171-180, 1996.
- [52].WANG, P., BILLINTON, R.; **Optimum load-shedding technique to reduce the total customer interruption cost in a distribution system.** , IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution,, v. 147 Issue: 1, pp. 51 –56, Jan. 2000.
- [53].WANG P.; BILLINTON R.; **Time sequential distribution system reliability worth analysis considering time varying load and cost models.**, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14 Issue: 3, pp. 1046 –1051, July 1999.
- [54].BROWN R.; GUPTA S.; CRISTIE R.; VENKATA S.; FLATCHER R. **Automated primary distribution system design: reliability and cost optimization.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 2, pp 1017 – 1022, 1997.
- [55].MAKINEN A., PARTANEN J.; LAKARVI, E.; **A practical approach for estimating future outage cost in power distribution networks.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 1, pp. 311-315, 1990.
- [56].BILLINTON R.; WANG P.; **Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 2, pp. 397-403, 1999.
- [57].ALLAN R.; BILLITON R.; BREIPOHL A.; GRIGG G.; **Bibliography of the application of probability methods in power systems reliability evaluation.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 9, n.1, pp. 41-49, 1994.
- [58].CHOWN M. Y.; TAYLOR L. S.; CHOW M. S.; **Time of outage restoration analysis in distribution system.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 3, pp 1652 1659, 1996.

- [59].MOMOH J.; DIAS L.; LAIRD D.; **An implementation of a hybrid intelligent tool for distribution system fault diagnosis.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 2, pp. 1035-1040, 1997.
- [60].BILLINTON R.; WANG P.; **Reliability network equivalent approach to distribution system reliability evaluation.** IEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution. v. 145 n. 2, p 149 – 153, 1998.
- [61].KJOLLE G.; D SAUD K.; **REL RAD –An analytical approach for distribution system reliability assessment.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 2, pp. 809-814, 1992.
- [62].GOEL L.; OU Y.; **Reliability worth assessment in radial distribution systems using Monte Carlo simulation technique.** Electric Power System Research, n. 51, pp.43-53, 1999.
- [63].OU Y.; GOEL L.; **Using Monte Carlo simulation for overall distribution system reliability assessment.** IEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution, v. 146, n. 5, pp. 535-540, 1999.
- [64].TATIETSE T.; VILLENEUVE P.; NDONG E.; KENFACK F.; **Interruption modelling in medium voltage electric network.** Electric Power and Energy Systems, No. 24, 2002, pp. 859-865.
- [65].GOEL L.; BILLINTON R.; **Monte Carlo simulation applied to distribution feeder reliability evaluation.** Electric Power System Research, n. 29, pp. 193-202, 1994.
- [66].BILLINTON R.; CHAN E.; WACKER G.; **Probability distribution approach to describe customer cost due to electric supply interruptions.** IEE Proceedings: Generation, Transmission, Distribution, v. 141, n. 6, pp. 594-598, 1994.

- [67]. YPSILANTIS J.; YEE H.; TEO C.; **Adaptive rule-based fault diagnostician for power networks**. IEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution, v. 139, n. 6, pp. 461-468, 1992.
- [68]. VENETSKIY I.; VENETSKAYA V.; **Basic mathematical-statistic notions and formulas in economical analysis**. Statistics. Moscow, 447 p (in Russian), 1979.
- [69]. KLOEPPEL F.; ADLER G.; ZORIN W.; TISLENKO V.; **Zuverlässigkeit von elektroenergieversorgungs-systemen**. VEB Deutscher Verlag, Leipzig, 192 p., 1984.
- [70]. LEVITIN A.; MAZAL-TOV SH.; ELMAKIS D.; **Optimal allocation of sectionalizers in radial distribution networks**. Proceedings of the 1995 Stockholm Power Tech. Conference, PS25-01-0034, pp. 761-764, 1995.
- [71]. BILLINTON R.; JOUNAVITHULA S.; **Optimal switching device placement in radial distribution systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 3, pp. 1646-1651, 1996.
- [72]. LEITE DA SILVA; A.M.; CASSULA, A.M.; BILLINTON, R.; MANSO, L.A.F.; **Optimum load shedding strategies in distribution systems**. Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, v. 2, 10-13. pp. 6, Sept. 2001.
- [73]. TENG J.; LU C.; **Feeder switch relocation for customer interruption costs minimization**. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 17, n. 1, pp. 254-259, 2002.
- [74]. EKEL P., POPOV V.; TKACHENKO V., **Discrete optimisation methods in problem of decision making in a fuzzy environment**, in Proceedings of the Fifth International Fuzzy System Association World Congress, Seoul, Korea, v. 1, pp. 733-736, 1993.
- [75]. ZORIN V.; POPOV V.; EKEL P.; **Models of reliability optimisation in distribution systems**, Energetics and Electrification, n. 3, pp. 38-42, 1988.
- [76]. GAREY M.; JOHNSON D.; **Computers and intractability: a guide to the theory of NP completeness**, W. Freeman and Co., San Francisco. 1979.

- [77].TENG J.; LIU Y.; **A novel ACS based optimum switch relocation method.**, IEEE Transaction on Power Systems, v. 18, n. 1, pp. 113-120, 2003.
- [78].LEVITIN G.; MAZAL-TOV S.; ELMAKIS D.; **Optimal switch allocation in electrical distribution systems by genetic algorithm.** Electric Power System Research, n. 31, pp. 97-102, 1994.
- [79].GELLI G.; PILO F., **Optimal sectionalizing switches allocation in distribution systems**, IEEE Transaction on Power Delivery, v. 11, n. 3, pp. 1167-1172, 1999.
- [80].BILLINTON, R.; AWEYA, J.; WACKER, G.; **Value-based reliability evaluation of electric distribution systems** WESCANEX 93. 'Communications, Computers and Power in the Modern Environment.' Conference Proceedings, IEEE , 17-18 May 1993, pp. 107 –114, 1993.
- [81].TAHA H.; **Operations research**, Macmillan Publishing, Co., Inc., N.Y., 1982.
- [82].TSAI L.; **Network reconfiguration to enhance reliability of electrical distribution systems.** Electric Power System Research, n. 27, pp.135-140, 1993.
- [83].CHEN R.; ALLEN K.; BILLINTON R.; **Value based distribution reliability assessment and planning.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 1, pp. 421-429, 1995.
- [84].CHOWDHURY A.; KOVAL D.; **Value-based power system reliability planning.** IEEE Transactions on Industry Applications, v.34, n. 1, pp.23-29, 1998.
- [85].ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Continuidade de Serviço. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em 30 abr. 2005.
- [86].BERZIN E.; **Optimal resource allocation and elements of system synthesis.** Sovetskoe Radio, Moscow, 1974 (in Russian).

- [87].EKEL P.; **Approach to decision making in fuzzy environment.** Computers and Mathematics with Application, n. 37, pp. 59-71, 1999.
- [88].MO-YUEN CHOW; TAYLOR, L.S.; **A novel approach for distribution fault analysis.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8 Issue: 4, pp. 1882 –1889, Oct. 1993.
- [89].ASGARPOOR, S.; MATHINE, M. J.; **Reliability evaluation of distribution systems with no-exponential down times** IEEE Transactions on Power Systems, v. 12 Issue: 2, pp. 579 – 584, May 1997.
- [90].SAND K.; KJOLLE G.; BILBERG J.; **Reliability aspects concerning distribution systems expansion planning.** Electricity Distribution, 1989., 10th International Conference on CIRED 1989, 8-12 May 1989, pp 530 – 534.
- [91].CAIXETA-FILHO, J. V. **Pesquisa Operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais.** São Paulo: Atlas, 2001.
- [92].MACULAN FILHO, N.; FERRAZ P.; VEIGA M. **Programação Linear.** São Paulo: Atlas, 1980.
- [93].PUCCINI, A. L.; **Introdução à Programação Linear.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1975.
- [94].FRITZSCHE, H. **Programação não-linear: análise e métodos.** São Paulo: Edgard Blücher: Ed. Universidade de São Paulo, 1978.
- [95].POPOV, V. A., ABAIDE, A. R., CANHA, L. N., BERNARDON, D. P., COMASSETTO, L., RODRIGUES, M. G., FARRET, F. A., KÖNIG, A. L., LICHT, A. P. **“Algorithm of Reliability Optimization for Operational Planning of Distribution Systems.”** IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, pp. 523 – 528, 2004.

APÊNDICE A – Frequência de falhas

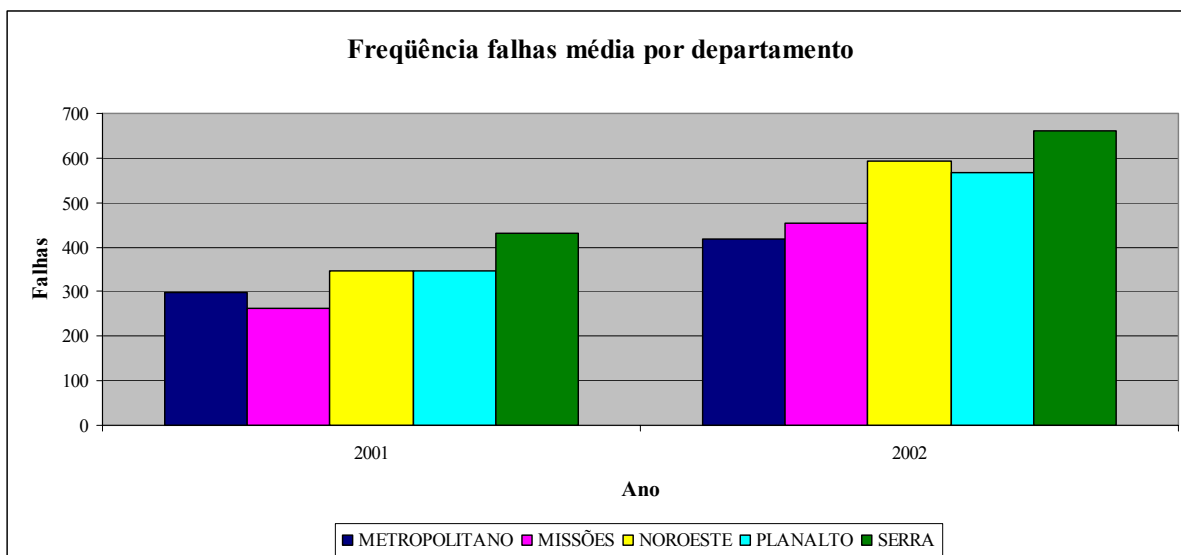


Gráfico 1 – Frequência de falhas média por departamento para os anos de 2001 e 2002.

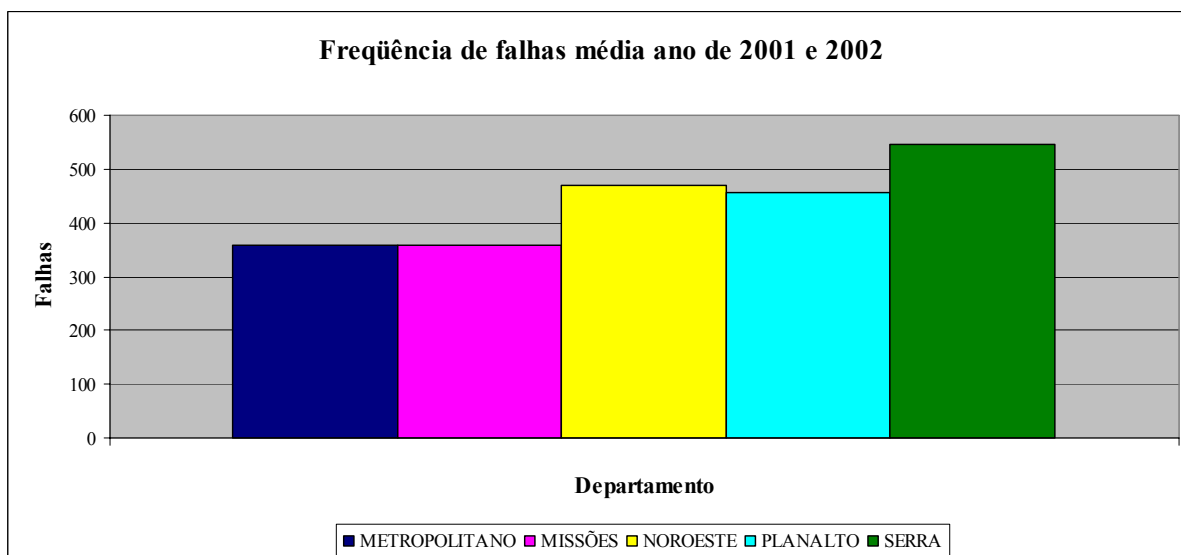


Gráfico 2 – Frequência média por departamento para o conjunto formado pelos anos de 2001 e 2002.

APÊNDICE B – Taxa de falhas

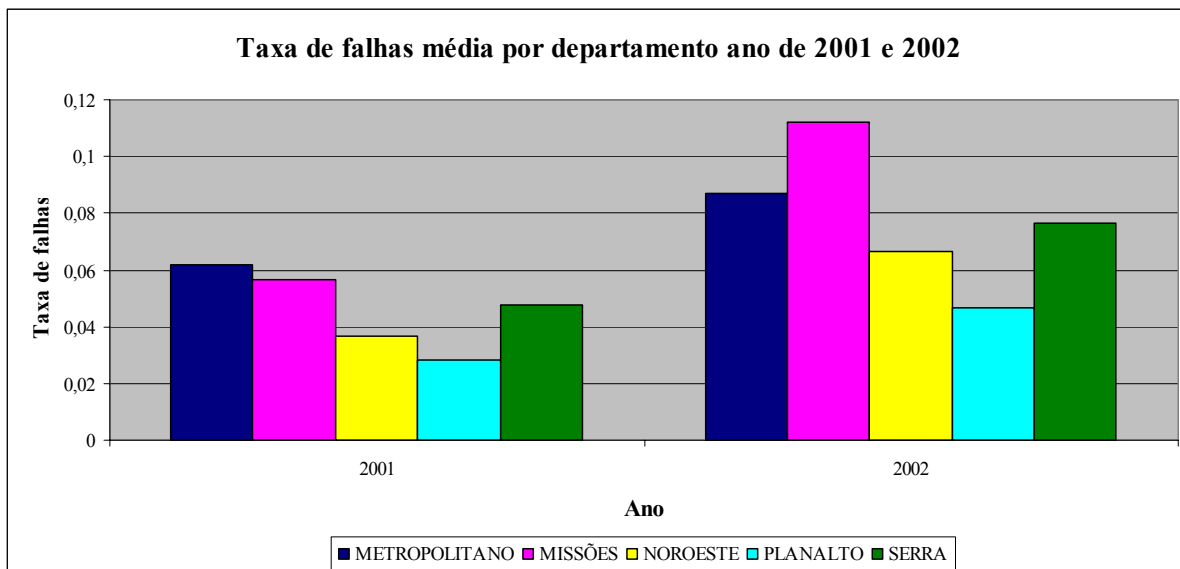


Gráfico 1 – Taxa de falhas entre departamento para o conjunto formado pelos anos de 2001 e 2002.

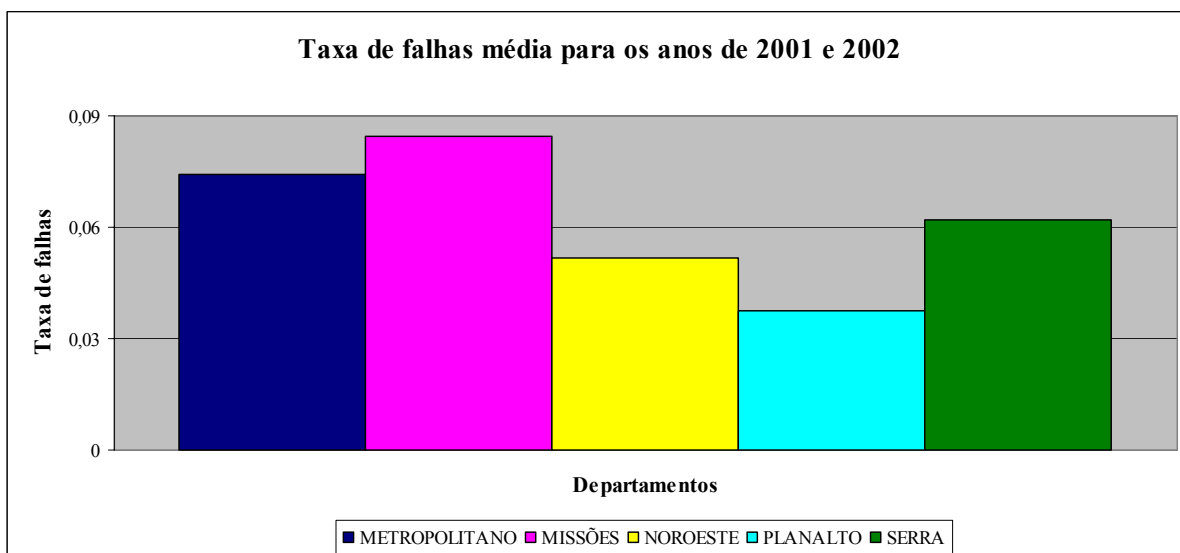


Gráfico 2 – Taxa de falhas entre departamentos para o conjunto formado pelos anos de 2001 e 2002.

APÊNDICE C – Tempo médio de restabelecimento do fornecimento de energia

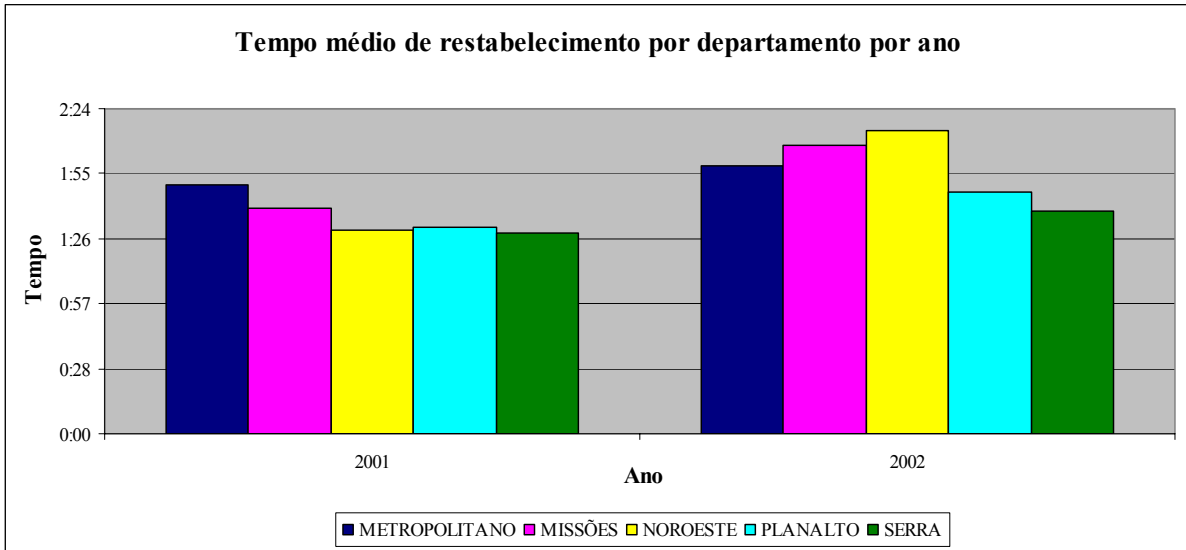


Gráfico 1 – Tempo médio de restabelecimento do fornecimento energia para os anos de 2001 e 2002.

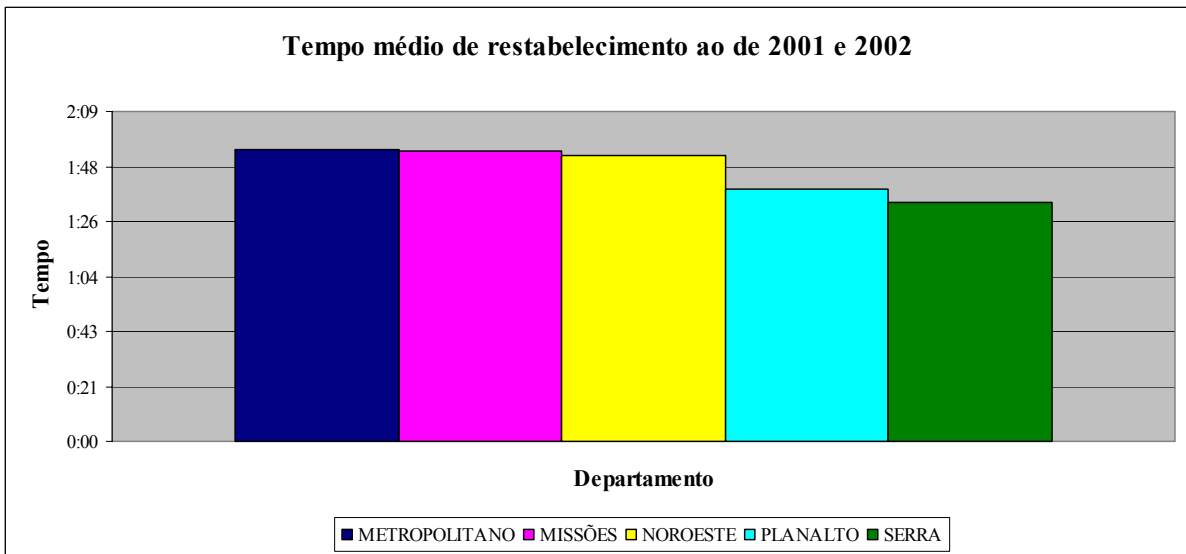


Gráfico 2 – Tempo médio de restabelecimento do fornecimento de energia para conjunto formado pelos anos de 2001 e 2002.

APÊNDICE D – frequência de falhas médias, comparação entre períodos dos anos

Tabela 1 – Frequência de falhas média para os departamentos da RGE, por períodos do ano.

| Metropolitano | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|------------------------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| 2001 por semestre | 248,67 | 337,30 | 10 | 1,9 | 955 | 9,00 |
| 2002 por semestre | 363,67 | 475,50 | 10 | 2,0 | 962 | 7,60 |
| 2001+2002 por semestre | 612,33 | 812,83 | 10 | 3,2 | 995 | 1,00 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 60,611 | 363,70 | 10 | 2,4 | 980 | 4,00 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 337,33 | 475,50 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| 2001 e 2002 | 293,00 | 419,60 | 22 | 3,1 | 997 | 0,60 |
| Missões | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 199,50 | 322,33 | 10 | 2,9 | 991 | 1,80 |
| 2002 por semestre | 296,30 | 610,17 | 10 | 4,9 | 999 | 0,20 |
| 2001+2002 por semestre | 495,80 | 932,5 | 10 | 4,7 | 999 | 0,20 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 199,50 | 296,33 | 10 | 2,3 | 977 | 4,60 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 322,30 | 610,17 | 10 | 4,5 | 999 | 0,20 |
| 2001 e 2002 | 260,90 | 453,25 | 22 | 3,1 | 997 | 0,60 |
| Noroeste | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 294,00 | 398,67 | 10 | 1,3 | 887 | 22,60 |
| 2002 por semestre | 447,17 | 740,00 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| 2001+2002 por semestre | 741,17 | 1138,67 | 10 | 2,6 | 986 | 2,80 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 294,00 | 447,17 | 10 | 2,1 | 967 | 6,60 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 49,00 | 740,00 | 10 | 3,0 | 993 | 1,40 |
| 2001 e 2002 | 346,33 | 593,58 | 22 | 3,1 | 997 | 0,60 |
| Planalto | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 300,17 | 393,17 | 10 | 1,4 | 902 | 19,60 |
| 2002 por semestre | 396,50 | 738,83 | 10 | 5,5 | 999 | 0,20 |
| 2001+2002 por semestre | 696,67 | 1132,00 | 10 | 4,5 | 999 | 0,20 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 300,17 | 396,50 | 10 | 1,8 | 947 | 10,60 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 393,17 | 738,83 | 10 | 4,8 | 999 | 0,20 |
| 2001 e 2002 | 346,67 | 567,67 | 22 | 3,2 | 998 | 0,40 |
| Serra | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 347,83 | 513,83 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| 2002 por semestre | 465,33 | 858,17 | 10 | 5,2 | 999 | 0,20 |
| 2001+2002 por semestre | 813,17 | 1418,60 | 10 | 2,2 | 972 | 5,60 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 347,83 | 465,33 | 10 | 2,4 | 980 | 4,00 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 513,83 | 858,17 | 10 | 4,0 | 998 | 0,40 |
| 2001 e 2002 | 430,83 | 661,75 | 22 | 2,9 | 996 | 0,80 |

APÊNDICE E – Taxa de falhas média, comparação entre departamentos da RGE

Tabela 1 – Taxa de falhas média, comparação entre os departamentos para o ano de 2001.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 0,319 | 0,296 | 10 | 0,4 | 651 | 69,80 |
| Metropolitano | Noroeste | 0,319 | 0,172 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| Metropolitano | Planalto | 0,319 | 0,147 | 10 | 3,8 | 998 | 0,40 |
| Metropolitano | Serra | 0,319 | 0,214 | 10 | 1,7 | 938 | 12,40 |
| Missões | Noroeste | 0,296 | 0,172 | 10 | 1,8 | 947 | 10,60 |
| Missões | Planalto | 0,296 | 0,147 | 10 | 2,7 | 2,655 | 2,40 |
| Missões | Serra | 0,296 | 0,214 | 10 | 1,1 | 850 | 30,00 |
| Noroeste | Planalto | 0,172 | 0,147 | 10 | 0,5 | 685 | 63,00 |
| Noroeste | Serra | 0,172 | 0,214 | 10 | 0,6 | 721 | 55,80 |
| Planalto | Serra | 0,147 | 0,214 | 10 | 1,2 | 870 | 26,00 |

Tabela 2 – Taxa de falhas média comparação entre os departamentos para o ano de 2001.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 0,420 | 0,381 | 10 | 0,5 | 685 | 63,00 |
| Metropolitano | Noroeste | 0,420 | 0,268 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| Metropolitano | Planalto | 0,420 | 0,193 | 10 | 4,9 | 999 | 0,20 |
| Metropolitano | Serra | 0,420 | 0,357 | 10 | 1,2 | 870 | 26,00 |
| Missões | Noroeste | 0,681 | 0,268 | 10 | 2,6 | 986 | 2,80 |
| Missões | Planalto | 0,381 | 0,193 | 10 | 2,4 | 980 | 4,00 |
| Missões | Serra | 0,381 | 0,357 | 10 | 0,3 | 615 | 77,00 |
| Noroeste | Planalto | 0,268 | 0,193 | 10 | 1,5 | 916 | 16,80 |
| Noroeste | Serra | 0,268 | 0,357 | 10 | 1,6 | 928 | 14,40 |
| Planalto | Serra | 0,193 | 0,357 | 10 | 4,098 | 999 | 0,20 |

Tabela 3 – Taxa de falhas média comparação entre os departamentos para o ano de 2002.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 0,453 | 0,440 | 10 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Metropolitano | Noroeste | 0,453 | 0,301 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| Metropolitano | Planalto | 0,453 | 0,194 | 10 | 5,8 | 999 | 0,20 |
| Metropolitano | Serra | 0,453 | 0,323 | 10 | 2,9 | 991 | 1,80 |
| Missões | Noroeste | 0,440 | 0,301 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| Missões | Planalto | 0,440 | 0,194 | 10 | 0,0 | 999 | 0,20 |
| Missões | Serra | 0,440 | 0,323 | 10 | 3,0 | 993 | 1,40 |
| Noroeste | Planalto | 0,301 | 0,194 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| Noroeste | Serra | 0,301 | 0,323 | 10 | 0,561 | 718 | 56,40 |
| Planalto | Serra | 0,194 | 0,323 | 10 | 6,448 | 999 | 0,20 |

Tabela 4 – Taxa de falhas médias, comparação entre os departamentos para o ano de 2002.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 0,593 | 0,907 | 10 | 3,0 | 993 | 1,40 |
| Metropolitano | Noroeste | 0,593 | 0,497 | 10 | 1,2 | 870 | 26,00 |
| Metropolitano | Planalto | 0,593 | 0,362 | 10 | 3,8 | 998 | 0,40 |
| Metropolitano | Serra | 0,593 | 0,596 | 10 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| Missões | Noroeste | 0,907 | 0,497 | 10 | 3,8 | 998 | 0,40 |
| Missões | Planalto | 0,907 | 0,362 | 10 | 5,8 | 999 | 0,20 |
| Missões | Serra | 0,907 | 0,596 | 10 | 3,0 | 993 | 1,40 |
| Noroeste | Planalto | 0,497 | 0,362 | 10 | 2,0 | 962 | 7,60 |
| Noroeste | Serra | 0,497 | 0,596 | 10 | 1,231 | 870 | 26,00 |
| Planalto | Serra | 0,362 | 0,596 | 10 | 4,095 | 999 | 0,20 |

Tabela 5 – Taxa de falhas média, comparação entre departamentos para a média dos anos de 2001 e 2002.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 0,074 | 0,084 | 22 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| Metropolitano | Noroeste | 0,074 | 0,052 | 22 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| Metropolitano | Planalto | 0,074 | 0,037 | 22 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Metropolitano | Serra | 0,074 | 0,062 | 22 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| Missões | Noroeste | 0,084 | 0,052 | 22 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| Missões | Planalto | 0,084 | 0,037 | 22 | 0,9 | 811 | 37,80 |
| Missões | Serra | 0,084 | 0,062 | 22 | 0,4 | 653 | 69,40 |
| Noroeste | Planalto | 0,052 | 0,037 | 22 | 0,4 | 653 | 69,40 |
| Noroeste | Serra | 0,052 | 0,062 | 22 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| Planalto | Serra | 0,037 | 0,062 | 22 | 0,6 | 722 | 55,60 |

APÊNDICE F – Frequência de falhas média, comparação entre subestações da RGE

Tabela 1 – Frequência de falhas média por subestações.

| Metropolitano | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| TAQ | 35,67 | 36,00 | 10 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| GRA1 | 41,83 | 53,67 | 10 | 1,5 | 916 | 16,80 |
| CAC2 | 25,17 | 25,83 | 10 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| UBUG | 10,33 | 11,00 | 10 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Missões | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| GIR | 8,17 | 8,50 | 10 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| CLA | 14,50 | 31,17 | 10 | 3,1 | 994 | 1,20 |
| SLG | 27,50 | 50,67 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| UIVA° | 33,67 | 47,00 | 10 | 1,1 | 850 | 30,00 |
| Noroeste | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| FWE | 40,83 | 52,17 | 10 | 1,2 | 870 | 26,00 |
| CNO | 55,00 | 74,50 | 10 | 0,9 | 804 | 39,20 |
| PMI | 20,67 | 19,83 | 10 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| SAU | 7,83 | 15,00 | 10 | 1,9 | 955 | 9,00 |
| Planalto | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| ERE1 | 56,00 | 51,33 | 10 | 0,4 | 651 | 69,80 |
| CAS | 12,00 | 32,17 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| GPR | 35,83 | 39,17 | 10 | 0,4 | 651 | 69,80 |
| SOL | 12,67 | 32,00 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| Serra | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| BGO1 | 17,50 | 26,00 | 10 | 1,5 | 916 | 16,80 |
| CAX1 | 13,67 | 22,67 | 10 | 2,6 | 986 | 2,80 |
| NPE | 17,33 | 23,67 | 10 | 1,6 | 928 | 14,40 |
| FAR | 27,33 | 34,00 | 10 | 0,9 | 804 | 39,20 |

Tabela 2 – Frequência de falhas na subestação de Taquara, ano de 2001

| SE | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TAQ | 60 | 28 | 32 | 24 | 35 | 35 | 44 | 13 | 30 | 41 | 43 | 45 |

Tabela 3 – Frequência de falhas média para ano de 2002.

| Metropolitano | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| TAQ | 41,33 | 58,33 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| GRA1 | 53,00 | 51,50 | 10 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| CAC2 | 32,17 | 32,00 | 10 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| UBUG | 3,17 | 8,17 | 10 | 1,0 | 828 | 34,40 |
| Missões | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| GIR | 11,83 | 20,83 | 10 | 2,3 | 977 | 4,60 |
| CLA | 28,33 | 49,83 | 10 | 4,3 | 999 | 0,20 |
| SLG | 47,50 | 92,00 | 10 | 2,9 | 991 | 1,80 |
| UIVA | 50,50 | 88,67 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| Noroeste | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| FWE | 49,83 | 99,67 | 10 | 3,8 | 998 | 0,40 |
| CNO | 86,17 | 110,83 | 10 | 1,0 | 828 | 34,40 |
| PMI | 27,83 | 51,17 | 10 | 2,8 | 990 | 2,00 |
| SAU | 19,83 | 19,33 | 10 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| Planalto | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| ERE1 | 73,00 | 131,17 | 10 | 3,7 | 998 | 0,40 |
| CAS | 31,33 | 49,33 | 10 | 2,6 | 986 | 2,80 |
| GPR | 33,50 | 68,83 | 10 | 3,7 | 998 | 0,40 |
| SOL | 20,83 | 44,67 | 10 | 5,9 | 999 | 0,20 |
| Serra | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| BGO1 | 25,17 | 40,33 | 10 | 1,4 | 902 | 19,60 |
| CAX1 | 20,33 | 40,17 | 10 | 3,7 | 998 | 0,40 |
| NPE | 23,00 | 45,17 | 10 | 2,4 | 980 | 4,00 |
| FAR | 28,50 | 62,33 | 10 | 3,1 | 994 | 1,20 |

Tabela 4 – Frequência de falhas média para os anos de 2001 e 2002.

| Metropolitano | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| TAQ | 35,83 | 49,83 | 22 | 2,6 | 991 | 1,80 |
| GRA1 | 47,75 | 52,25 | 22 | 0,7 | 754 | 49,20 |
| CAC2 | 25,50 | 32,08 | 22 | 1,7 | 948 | 10,40 |
| UBUG1 | 10,67 | 5,67 | 22 | 1,7 | 948 | 10,40 |
| Missões | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| GIR | 8,33 | 16,33 | 22 | 3,0 | 997 | 0,60 |
| CLA | 22,83 | 39,08 | 22 | 3,0 | 997 | 0,60 |
| SLG | 39,08 | 69,75 | 22 | 2,7 | 993 | 1,40 |
| UIVA | 40,33 | 69,58 | 22 | 2,8 | 995 | 1,00 |
| Noroeste | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| FWE | 46,50 | 74,75 | 22 | 2,6 | 991 | 1,80 |
| CNO | 64,75 | 98,50 | 22 | 2,1 | 976 | 4,80 |
| PMI | 20,25 | 39,50 | 22 | 3,3 | 998 | 0,40 |
| SAU | 11,42 | 19,58 | 22 | 2,8 | 995 | 1,00 |
| Planalto | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| ERE1 | 53,67 | 102,08 | 22 | 3,7 | 999 | 0,20 |
| CAS | 22,08 | 40,33 | 22 | 2,8 | 995 | 1,00 |
| GPR | 37,50 | 51,17 | 22 | 1,7 | 948 | 10,40 |
| SOL | 22,33 | 32,75 | 22 | 1,7 | 948 | 10,40 |
| Serra | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| BGO1 | 21,75 | 32,75 | 22 | 1,7 | 948 | 10,40 |
| CAX1 | 18,17 | 30,25 | 22 | 2,7 | 993 | 1,40 |
| NPE | 20,50 | 34,08 | 22 | 2,3 | 984 | 3,20 |
| FAR | 30,67 | 45,42 | 22 | 1,8 | 956 | 8,80 |

APÊNDICE G – Frequência de falhas média, comparação entre dia útil e fim semana

Tabela 5 - Frequência de falhas média, comparação entre dia útil e final de semana para todos os departamentos da RGE, ano de 2001.

| Metropolitano 2001 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|------------|
| JAN | 10,57 | 17,38 | 29 | 1,7 | 951 | 9,80 |
| FEV | 5,42 | 4,75 | 25 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| MAR | 9,82 | 7,63 | 28 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 8,71 | 7,22 | 28 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| MAI | 9,04 | 5,00 | 28 | 1,6 | 940 | 12,00 |
| JUN | 9,24 | 5,78 | 28 | 1,3 | 899 | 20,20 |
| JUL | 13,32 | 6,67 | 29 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| AGO | 6,83 | 5,00 | 29 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| SET | 9,70 | 12,80 | 28 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| OUT | 13,09 | 6,88 | 29 | 1,5 | 928 | 14,40 |
| NOV | 13,82 | 19,00 | 27 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| DEZ | 10,48 | 13,90 | 29 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| Missões 2001 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 11,52 | 11,63 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| FEV | 6,40 | 4,75 | 26 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| MAR | 6,09 | 7,11 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 7,33 | 4,56 | 28 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| MAI | 6,26 | 4,00 | 29 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| JUN | 2,81 | 5,00 | 28 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| JUL | 13,09 | 4,44 | 29 | 2,4 | 989 | 2,20 |
| AGO | 7,74 | 7,00 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| SET | 8,40 | 12,40 | 28 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| OUT | 12,65 | 7,00 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| NOV | 15,32 | 9,00 | 28 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| DEZ | 11,81 | 7,60 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |

| Noroeste 2001 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|------------|
| JAN | 17,30 | 16,00 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| FEV | 8,45 | 9,00 | 26 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| MAR | 8,95 | 7,22 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 9,76 | 5,56 | 28 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| MAI | 9,96 | 5,13 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| JUN | 6,43 | 8,33 | 28 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| JUL | 11,59 | 4,00 | 29 | 1,9 | 967 | 6,60 |
| AGO | 6,65 | 7,38 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| SET | 16,40 | 13,50 | 28 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| OUT | 14,70 | 13,88 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| NOV | 20,68 | 26,25 | 28 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| DEZ | 10,24 | 9,70 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Planalto 2001 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 17,61 | 10,88 | 29 | 1,3 | 899 | 20,20 |
| FEV | 10,55 | 6,63 | 26 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| MAR | 8,64 | 7,67 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 12,19 | 13,00 | 28 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| MAI | 8,35 | 5,25 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| JUN | 6,10 | 5,67 | 28 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| JUL | 17,36 | 7,44 | 29 | 1,3 | 899 | 20,20 |
| AGO | 6,39 | 4,50 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| SET | 12,80 | 19,30 | 28 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| OUT | 14,17 | 7,00 | 29 | 1,0 | 838 | 32,40 |
| NOV | 18,00 | 14,38 | 28 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| DEZ | 14,38 | 8,30 | 29 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| Serra 2001 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 18,30 | 15,75 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| FEV | 9,15 | 7,88 | 26 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| MAR | 9,55 | 7,89 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 13,24 | 13,33 | 28 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| MAI | 10,43 | 6,50 | 29 | 1,5 | 928 | 14,40 |
| JUN | 11,38 | 9,33 | 28 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| JUL | 21,36 | 12,56 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| AGO | 11,22 | 9,75 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| SET | 17,55 | 27,50 | 28 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| OUT | 21,65 | 6,25 | 29 | 1,8 | 959 | 8,20 |
| NOV | 20,27 | 17,50 | 28 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| DEZ | 14,76 | 9,40 | 29 | 1,4 | 915 | 17,00 |

Tabela 6 - Freqüência de falhas média comparação entre dia útil e final de semana para todos os departamentos da RGE, ano de 2002.

| Metropolitano 2002 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|------------|
| JAN | 11,39 | 8,75 | 29 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| FEV | 19,85 | 16,13 | 26 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| MAR | 11,81 | 11,50 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 9,59 | 17,63 | 28 | 1,3 | 899 | 20,20 |
| MAI | 10,13 | 7,00 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| JUN | 10,20 | 11,60 | 28 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| JUL | 11,61 | 7,75 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| AGO | 16,23 | 10,11 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| SET | 20,71 | 8,78 | 28 | 1,5 | 928 | 14,40 |
| OUT | 21,52 | 19,88 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| NOV | 17,52 | 12,00 | 28 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| DEZ | 14,82 | 11,78 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| Missões 2002 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 12,96 | 10,50 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| FEV | 8,30 | 5,75 | 26 | 0,8 | 783 | 43,40 |
| MAR | 11,48 | 9,10 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| ABR | 9,77 | 8,38 | 28 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| MAI | 10,52 | 8,38 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| JUN | 8,85 | 8,40 | 28 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| JUL | 17,22 | 12,38 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| AGO | 20,18 | 9,56 | 29 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| SET | 24,76 | 7,56 | 28 | 1,9 | 967 | 6,60 |
| OUT | 25,83 | 32,25 | 29 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| NOV | 25,67 | 19,89 | 28 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| DEZ | 17,14 | 11,22 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| Noroeste 2002 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 18,70 | 13,38 | 29 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| FEV | 13,00 | 9,38 | 26 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| MAR | 17,14 | 13,70 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| ABR | 12,18 | 12,00 | 28 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| MAI | 22,04 | 17,75 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| JUN | 8,50 | 13,10 | 28 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| JUL | 14,61 | 14,50 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| AGO | 29,64 | 10,67 | 29 | 1,6 | 940 | 12,00 |
| SET | 27,24 | 6,89 | 28 | 1,9 | 967 | 6,60 |
| OUT | 37,00 | 36,50 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| NOV | 24,81 | 21,78 | 28 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| DEZ | 25,41 | 20,78 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |

| Planalto 2002 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|------------|
| JAN | 16,17 | 10,88 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| FEV | 11,60 | 9,38 | 26 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| MAR | 15,10 | 13,10 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 12,23 | 13,88 | 28 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| MAI | 16,48 | 9,63 | 29 | 1,0 | 838 | 32,40 |
| JUN | 10,70 | 11,50 | 28 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| JUL | 20,26 | 8,50 | 29 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| AGO | 25,23 | 15,56 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| SET | 26,52 | 9,78 | 28 | 1,8 | 959 | 8,20 |
| OUT | 28,04 | 28,63 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| NOV | 30,48 | 23,33 | 28 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| DEZ | 26,36 | 28,33 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Serra 2002 | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 17,35 | 12,75 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| FEV | 14,15 | 12,63 | 26 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| MAR | 18,19 | 14,30 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| ABR | 15,91 | 16,88 | 28 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| MAI | 17,04 | 9,75 | 29 | 1,3 | 899 | 20,20 |
| JUN | 13,15 | 16,40 | 28 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| JUL | 22,78 | 13,25 | 29 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| AGO | 25,82 | 22,78 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| SET | 40,33 | 21,67 | 28 | 1,0 | 838 | 32,40 |
| OUT | 34,87 | 34,00 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| NOV | 31,33 | 26,33 | 28 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| DEZ | 23,86 | 23,33 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |

APÊNDICE H – Tempo de restabelecimento médio, comparação entre departamentos da RGE

Tabela 7 – Tempo médio de restabelecimento para todos os departamentos da RGE.

| Metropolitano | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|------------------------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|------------|
| 2001 por semestre | 111 | 143 | 10 | 3,3 | 995 | 1,00 |
| 2002 por semestre | 125 | 158 | 10 | 2,3 | 977 | 4,60 |
| 2001+2002 por semestre | 118 | 150,5 | 10 | 3,6 | 997 | 0,60 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 111 | 125 | 10 | 1,5 | 916 | 16,80 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 143 | 158 | 10 | 1,0 | 828 | 34,40 |
| 2001 e 2002 | 127 | 141 | 22 | 1,3 | 896 | 20,80 |
| Missões | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 89 | 119 | 10 | 2,8 | 990 | 2,00 |
| 2002 por semestre | 103 | 134 | 10 | 2,3 | 977 | 4,60 |
| 2001+2002 por semestre | 96 | 127 | 10 | 3,2 | 995 | 1,00 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 89 | 103 | 10 | 1,7 | 938 | 12,40 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 119 | 134 | 10 | 1,0 | 828 | 34,40 |
| 2001 e 2002 | 104 | 119 | 22 | 1,1 | 858 | 28,40 |
| Noroeste | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 92 | 110 | 10 | 1,9 | 955 | 9,00 |
| 2002 por semestre | 178 | 161 | 10 | 1,1 | 850 | 30,00 |
| 2001+2002 por semestre | 135 | 135 | 10 | 0,1 | 539 | 100,00 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 92 | 178 | 10 | 7,3 | 999 | 0,20 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 110 | 161 | 10 | 3,7 | 998 | 0,40 |
| 2001 e 2002 | 101 | 169 | 22 | 4,3 | 999 | 0,20 |
| Planalto | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 102 | 113 | 10 | 1,1 | 850 | 30,00 |
| 2002 por semestre | 119 | 152 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| 2001+2002 por semestre | 140 | 133 | 10 | 0,6 | 718 | 56,40 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 102 | 119 | 10 | 2,0 | 962 | 7,60 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 113 | 152 | 10 | 2,7 | 988 | 2,40 |
| 2001 e 2002 | 107 | 166 | 22 | 3,8 | 999 | 0,20 |
| Serra | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| 2001 por semestre | 89 | 119 | 10 | 2,8 | 990 | 2,00 |
| 2002 por semestre | 103 | 134 | 10 | 2,3 | 977 | 4,60 |
| 2001+2002 por semestre | 96 | 127 | 10 | 3,2 | 995 | 1,00 |
| 1º sem. 2001 e 2002 | 89 | 103 | 10 | 1,7 | 938 | 12,40 |
| 2º sem. 2001 e 2002 | 119 | 134 | 10 | 1,0 | 828 | 34,40 |
| 2001 e 2002 | 104 | 119 | 22 | 1,1 | 858 | 28,40 |

APÊNDICE I – Tempo de restabelecimento médio, comparação entre departamentos da RGE

Tabela 8 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre departamentos para o ano de 2001.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 110 | 100 | 22 | 2,3 | 984 | 3,20 |
| Metropolitano | Noroeste | 110 | 90 | 22 | 3,7 | 999 | 0,20 |
| Metropolitano | Planalto | 110 | 91 | 22 | 3,9 | 999 | 0,20 |
| Metropolitano | Serra | 110 | 89 | 22 | 4,3 | 999 | 0,20 |
| Missões | Noroeste | 100 | 90 | 22 | 1,0 | 835 | 33,00 |
| Missões | Planalto | 100 | 91 | 22 | 1,7 | 948 | 10,40 |
| Missões | Serra | 100 | 89 | 22 | 2,1 | 976 | 4,80 |
| Noroeste | Planalto | 90 | 91 | 22 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Noroeste | Serra | 90 | 89 | 22 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Planalto | Serra | 91 | 89 | 22 | 0,4 | 653 | 69,40 |

Tabela 9 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre departamentos para o ano de 2002.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 124 | 128 | 22 | 0,4 | 653 | 69,40 |
| Metropolitano | Noroeste | 124 | 134 | 22 | 1,3 | 896 | 20,80 |
| Metropolitano | Planalto | 124 | 107 | 22 | 2,0 | 970 | 6,00 |
| Metropolitano | Serra | 124 | 99 | 22 | 3,0 | 997 | 0,60 |
| Missões | Noroeste | 128 | 134 | 22 | 0,4 | 653 | 33,00 |
| Missões | Planalto | 128 | 107 | 22 | 2,6 | 991 | 1,80 |
| Missões | Serra | 128 | 99 | 22 | 3,7 | 999 | 0,20 |
| Noroeste | Planalto | 134 | 107 | 22 | 5,6 | 999 | 0,20 |
| Noroeste | Serra | 134 | 99 | 22 | 8,3 | 999 | 0,20 |
| Planalto | Serra | 107 | 99 | 22 | 1,4 | 912 | 17,60 |

Tabela 10 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre departamentos para o ano de 2001 – primeiro semestre.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 104 | 94 | 10 | 1,6 | 928 | 14,40 |
| Metropolitano | Noroeste | 104 | 89 | 10 | 2,3 | 977 | 4,60 |
| Metropolitano | Planalto | 104 | 92 | 10 | 2,5 | 983 | 3,40 |
| Metropolitano | Serra | 104 | 85 | 10 | 3,7 | 998 | 0,40 |
| Missões | Noroeste | 94 | 89 | 10 | 0,9 | 804 | 39,20 |
| Missões | Planalto | 94 | 92 | 10 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Missões | Serra | 94 | 85 | 10 | 2,2 | 972 | 5,60 |
| Noroeste | Planalto | 89 | 92 | 10 | 0,8 | 778 | 44,40 |
| Noroeste | Serra | 89 | 85 | 10 | 0,6 | 718 | 56,40 |
| Planalto | Serra | 92 | 85 | 10 | 0,8 | 778 | 44,40 |

Tabela 11 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre departamentos para o ano de 2001 – segundo semestre.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 117 | 105 | 10 | 2,3 | 977 | 4,60 |
| Metropolitano | Noroeste | 117 | 92 | 10 | 3,0 | 993 | 1,40 |
| Metropolitano | Planalto | 117 | 90 | 10 | 4,2 | 999 | 0,20 |
| Metropolitano | Serra | 117 | 93 | 10 | 2,2 | 972 | 5,60 |
| Missões | Noroeste | 105 | 92 | 10 | 1,4 | 902 | 19,60 |
| Missões | Planalto | 105 | 90 | 10 | 2,6 | 986 | 2,80 |
| Missões | Serra | 105 | 93 | 10 | 1,7 | 938 | 12,40 |
| Noroeste | Planalto | 92 | 90 | 10 | 1,0 | 828 | 34,40 |
| Noroeste | Serra | 92 | 93 | 10 | 0,3 | 615 | 77,00 |
| Planalto | Serra | 90 | 93 | 10 | 0,65 | 718 | 56,40 |

Tabela 12 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre departamentos para o ano de 2002 – primeiro semestre.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 111 | 115 | 10 | 0,4 | 651 | 69,80 |
| Metropolitano | Noroeste | 111 | 135 | 10 | 2,8 | 990 | 2,00 |
| Metropolitano | Planalto | 111 | 101 | 10 | 2,1 | 967 | 6,60 |
| Metropolitano | Serra | 111 | 92 | 10 | 3,5 | 997 | 0,60 |
| Missões | Noroeste | 115 | 135 | 10 | 3,5 | 997 | 0,60 |
| Missões | Planalto | 115 | 101 | 10 | 2,2 | 972 | 5,60 |
| Missões | Serra | 115 | 92 | 10 | 4,6 | 999 | 0,20 |
| Noroeste | Planalto | 135 | 101 | 10 | 6,7 | 999 | 0,20 |
| Noroeste | Serra | 135 | 92 | 10 | 10,1 | 999 | 0,20 |
| Planalto | Serra | 101 | 92 | 10 | 1,8 | 947 | 10,60 |

Tabela 13 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre departamentos para o ano de 2002 – segundo semestre.

| DEP 1 | DEP 2 | \tilde{x}_1 | \tilde{x}_2 | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|---------------|----------|---------------|---------------|-----|------------|---------------|---------|
| Metropolitano | Missões | 138 | 141 | 10 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| Metropolitano | Noroeste | 138 | 133 | 10 | 0,5 | 685 | 63,00 |
| Metropolitano | Planalto | 138 | 112 | 10 | 1,0 | 828 | 34,40 |
| Metropolitano | Serra | 138 | 105 | 10 | 1,8 | 947 | 10,60 |
| Missões | Noroeste | 141 | 133 | 10 | 0,7 | 749 | 50,20 |
| Missões | Planalto | 141 | 112 | 10 | 2,1 | 967 | 6,60 |
| Missões | Serra | 141 | 105 | 10 | 2,8 | 990 | 2,00 |
| Noroeste | Planalto | 133 | 112 | 10 | 2,6 | 986 | 2,80 |
| Noroeste | Serra | 133 | 105 | 10 | 4,1 | 999 | 0,20 |
| Planalto | Serra | 112 | 105 | 10 | 0,8 | 778 | 44,40 |

APÊNDICE J – Tempo de restabelecimento médio, comparação entre departamentos para dia útil e fim de semana

Tabela 1 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre dia útil e final de semana para todos os departamentos da RGE, ano de 2001.

| Metropolitano | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|------------|
| JAN | 110 | 130 | 29 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| FEV | 85 | 88 | 26 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| MAR | 112 | 113 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| ABR | 102 | 135 | 28 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| MAI | 98 | 117 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| JUN | 86 | 109 | 28 | 0,9 | 813 | 28,00 |
| JUL | 101 | 146 | 29 | 3,2 | 998 | 0,40 |
| AGO | 117 | 99 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| SET | 114 | 123 | 28 | 0,2 | 654 | 69,20 |
| OUT | 122 | 119 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| NOV | 124 | 109 | 28 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| DEZ | 104 | 140 | 29 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| Missões | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 98 | 136 | 29 | 2,5 | 991 | 1,80 |
| FEV | 100 | 72 | 26 | 1,5 | 928 | 14,40 |
| MAR | 84 | 131 | 29 | 1,9 | 967 | 6,60 |
| ABR | 84 | 106 | 28 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| MAI | 81 | 75 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| JUN | 90 | 108 | 28 | 1,3 | 899 | 28,00 |
| JUL | 125 | 79 | 29 | 2,4 | 989 | 2,20 |
| AGO | 99 | 91 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| SET | 91 | 95 | 28 | 1,4 | 578 | 84,40 |
| OUT | 119 | 84 | 29 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| NOV | 121 | 126 | 28 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| DEZ | 85 | 126 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |

| Noroeste | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|------------|
| JAN | 100 | 99 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| FEV | 91 | 95 | 26 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| MAR | 86 | 88 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| ABR | 69 | 75 | 28 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| MAI | 88 | 91 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| JUN | 101 | 82 | 28 | 1,3 | 899 | 62,20 |
| JUL | 64 | 91 | 29 | 2,7 | 995 | 1,00 |
| AGO | 75 | 59 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| SET | 82 | 103 | 28 | 0,1 | 993 | 1,40 |
| OUT | 99 | 98 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| NOV | 121 | 140 | 28 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| DEZ | 91 | 95 | 29 | 1,0 | 838 | 32,40 |
| Planalto | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 100 | 122 | 29 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| FEV | 117 | 127 | 26 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| MAR | 89 | 90 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| ABR | 73 | 105 | 28 | 2,0 | 973 | 5,40 |
| MAI | 70 | 117 | 29 | 2,8 | 996 | 0,80 |
| JUN | 73 | 78 | 28 | 0,3 | 616 | 5,40 |
| JUL | 99 | 94 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| AGO | 77 | 77 | 29 | 0,0 | 500 | 100,00 |
| SET | 84 | 95 | 28 | 0,3 | 689 | 62,20 |
| OUT | 92 | 87 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| NOV | 98 | 109 | 28 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| DEZ | 84 | 92 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| Serra | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 99 | 117 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| FEV | 90 | 103 | 26 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| MAR | 74 | 68 | 29 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| ABR | 73 | 84 | 28 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| MAI | 89 | 74 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| JUN | 85 | 69 | 28 | 0,8 | 785 | 37,40 |
| JUL | 98 | 91 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| AGO | 68 | 67 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| SET | 85 | 101 | 28 | 1,2 | 838 | 32,40 |
| OUT | 113 | 84 | 29 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| NOV | 90 | 105 | 28 | 1,0 | 838 | 32,40 |
| DEZ | 101 | 111 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |

Tabela 2 – Tempo de restabelecimento médio comparação entre dia útil e final de semana para todos os departamentos da RGE, ano de 2002.

| Metropolitano | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|-------------|
| JAN | 106 | 114 | 29 | 0,4 | 653 | 69,40 |
| FEV | 94 | 133 | 26 | 1,6 | 940 | 12,00 |
| MAR | 110 | 114 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| ABR | 94 | 98 | 28 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| MAI | 96 | 98 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| JUN | 148 | 151 | 28 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| JUL | 99 | 126 | 29 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| AGO | 111 | 133 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| SET | 148 | 201 | 28 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| OUT | 147 | 236 | 29 | 2,0 | 973 | 5,40 |
| NOV | 120 | 131 | 28 | 0,6 | 724 | 55,20 |
| DEZ | 133 | 155 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| Missões | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 123 | 102 | 29 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| FEV | 125 | 117 | 26 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| MAR | 125 | 139 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| ABR | 88 | 108 | 28 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| MAI | 118 | 106 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| JUN | 106 | 121 | 28 | 0,6 | 724 | 17,00 |
| JUL | 89 | 128 | 29 | 1,7 | 951 | 9,80 |
| AGO | 131 | 137 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| SET | 142 | 151 | 28 | 0,5 | 616 | 76,80 |
| OUT | 170 | 190 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| NOV | 178 | 140 | 28 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| DEZ | 119 | 146 | 29 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| Noroeste | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 144 | 101 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| FEV | 132 | 175 | 26 | 1,0 | 838 | 32,40 |
| MAR | 141 | 144 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |
| ABR | 113 | 159 | 28 | 1,6 | 940 | 12,00 |
| MAI | 127 | 159 | 29 | 0,9 | 813 | 37,40 |
| JUN | 132 | 140 | 28 | 0,2 | 578 | 12,00 |
| JUL | 117 | 152 | 29 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| AGO | 129 | 102 | 29 | 1,3 | 899 | 20,20 |
| SET | 118 | 154 | 28 | 0,7 | 860 | 28,00 |
| OUT | 150 | 132 | 29 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| NOV | 136 | 140 | 28 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| DEZ | 127 | 169 | 29 | 0,1 | 539 | 92,20 |

| Planalto | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-----|------------|---------------|------------|
| JAN | 109 | 95 | 29 | 0,6 | 722 | 55,60 |
| FEV | 101 | 94 | 26 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| MAR | 109 | 130 | 29 | 1,3 | 899 | 20,20 |
| ABR | 94 | 77 | 28 | 1,4 | 915 | 17,00 |
| MAI | 91 | 96 | 29 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| JUN | 94 | 132 | 28 | 2,4 | 989 | 17,00 |
| JUL | 91 | 87 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| AGO | 90 | 103 | 29 | 0,7 | 756 | 48,80 |
| SET | 111 | 108 | 28 | 0,4 | 539 | 92,20 |
| OUT | 123 | 133 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| NOV | 128 | 118 | 28 | 0,3 | 616 | 76,80 |
| DEZ | 125 | 140 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| Serra | \tilde{x}_1 dia útil | \tilde{x}_2 final semana | n | α_f | $S(\alpha_f)$ | Prob. % |
| JAN | 100 | 94 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| FEV | 92 | 78 | 26 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| MAR | 107 | 88 | 29 | 1,1 | 860 | 28,00 |
| ABR | 94 | 75 | 28 | 1,6 | 940 | 12,00 |
| MAI | 85 | 74 | 29 | 1,2 | 881 | 23,80 |
| JUN | 88 | 111 | 28 | 2,5 | 991 | 12,00 |
| JUL | 96 | 93 | 29 | 0,2 | 578 | 84,40 |
| AGO | 89 | 99 | 29 | 0,8 | 785 | 43,00 |
| SET | 130 | 119 | 28 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| OUT | 98 | 103 | 29 | 0,4 | 654 | 69,20 |
| NOV | 101 | 110 | 28 | 0,5 | 689 | 62,20 |
| DEZ | 116 | 117 | 29 | 0,5 | 689 | 62,20 |

APÊNDICE K – Solução gráfica do problema de otimização inteira utilizando algoritmo Gomory

É analisado como ilustração, um exemplo onde é necessário definir o ótimo da função objetivo a seguir:

$$Z = 7x_1 + 9x_2 \rightarrow \text{máx}$$

Com as seguintes restrições:

$$-x_1 + 3x_2 \leq 6 \quad \text{R1}$$

$$7x_1 + x_2 \leq 35 \quad \text{R2}$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad \text{R3}$$

x_1 e x_2 são valores inteiros.

De acordo com o algoritmo, primeiramente deve ser resolvido o problema, sem considerar a exigência de que as variáveis devam ser inteiras, levando em conta somente às restrições R1, R2 e R3. A solução deste problema definiu a região viável ABCD (Fig. 1) sem as exigências de que todas as variáveis devam ser inteiras. Nos passos seguintes introduzem-se sucessivamente as restrições adicionais R4 e R5, que transformam a região viável da seguinte maneira: ABCD \rightarrow ABEFD \rightarrow ABEGHD. Um dos vértices de polígono convexo da região viável construída (G) com coordenadas $x_1 = 4$, $x_2 = 3$, é a solução do problema inicial de otimização inteira.

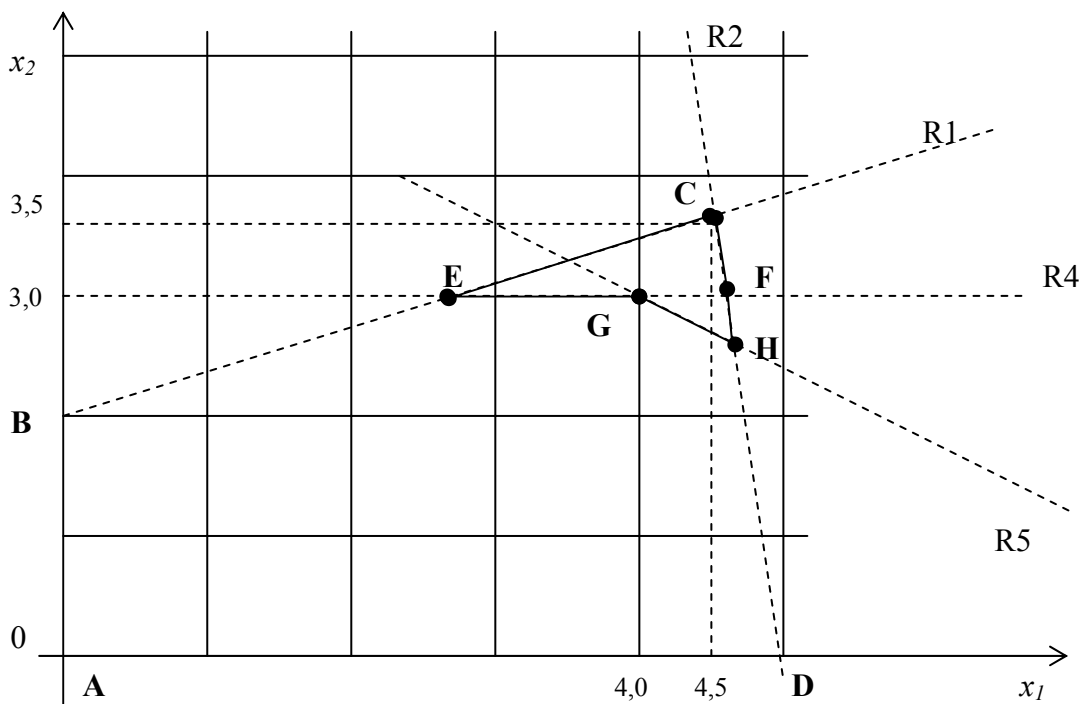


Figura 1 - Solução gráfica do problema de otimização inteira de acordo com o algoritmo Gomory.

É claro que o número de iterações necessárias no processamento deste algoritmo aumenta bruscamente com o aumento do número de variáveis e restrições.

APÊNDICE L – Programação linear

O objetivo da presente análise é encontrar os valores de x_1, x_2, \dots, x_n , que maximizem ou minimizem a função linear (função objetivo),

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n,$$

Sabendo-se que x_1, x_2, \dots, x_n devem satisfazer o seguinte sistema de inequações lineares (restrições):

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_n$$

e que

$$x_1 \geq x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

As considerações necessárias para solucionar um problema através da programação linear são as seguintes:

a) A solução do problema de minimização pode ser encontrada a partir da suposição que minimizar uma função equivale a maximizar o negativo de seus coeficientes, portanto:

| | |
|-----------|---|
| Minimizar | $Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$, equivale a |
|-----------|---|

| | |
|-----------|---|
| Maximizar | $Z = (-c_1)x_1 + (-c_2)x_2 + \dots + (-c_n)x_n$ |
|-----------|---|

b) Se houverem desigualdades (inequações) em vez de equações, devem ser introduzidas novas variáveis, conhecidas como variáveis de folga, de maneira a obter-se uma igualdade.

Exemplos:

$$\text{I.} \quad 4x_1 + 2x_2 \leq 5$$

A variável de folga $s_1 (s_1 \geq 0)$ deve ser introduzida para obter-se:

$$4x_1 + 2x_2 + s_1 = 5$$

Logo, para as desigualdades (inequações) do tipo \leq , a variável de folga deverá ter sinal positivo.

$$\text{II.} \quad 4x_1 + 2x_2 \geq 5$$

Acrescentando a variável de folga para obter-se:

$$4x_1 + 2x_2 - s_1 = 5$$

Então, para as desigualdades (inequações) do tipo \geq , a variável de folga deverá ter sinal negativo.

É necessário colocar uma variável de folga diferente para cada restrição. Se a mesma variável de folga for usada, se “forçará” uma relação entre as desigualdades (inequações) que não existe no problema e o novo conjunto de equações não seria equivalente ao original.

c) Se uma variável é considerada livre (x_j), ou seja, sem restrição de sinal, esta variável pode ser substituída por duas variáveis da seguinte forma: $x_j = x'_j - x''_j$

Exemplo:

$Z = 6x_1 - 5x_2 - 4x_3 \rightarrow \text{mín}$, sujeita as seguintes restrições (R):

$$x_1 + x_2 - x_3 = 4 \quad \text{R1}$$

$$2x_1 + x_2 - x_3 = 6 \quad \text{R2}$$

$$-x_1 + x_2 - 2x_3 \leq 5 \quad \text{R3}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad \text{R4}$$

x_3 é uma variável livre, não faz parte da restrição (R4), então deverá ser substituída por:

$$x_3 = x_3' - x_3''$$

Como a restrição (R3) é uma desigualdade, deverá ser introduzida uma variável de folga de acordo com o item b).

O exemplo anterior tornar-se-á: $Z = 6x_1 - 5x_2 - 4x_3' + 4x_3'' \rightarrow \min$

$$x_1 + x_2 - x_3' + x_3'' = 4 \quad \text{R1}$$

$$2x_1 + x_2 - x_3' + x_3'' = 6 \quad \text{R2}$$

$$-x_1 + x_2 - 2x_3' + 2x_3'' + x_4 = 5 \quad \text{R3}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0 \quad \text{R4}$$

Para melhor esclarecer o método de solução, é interessante buscar a solução gráfica e a solução analítica do mesmo problema.

Primeiramente, será apresentada a solução gráfica do seguinte exemplo de programação linear:

$Z = 5x_1 + 2x_2 \rightarrow \text{máx}$, sujeita as seguintes restrições:

$$x_1 \leq 3 \quad \text{R1}$$

$$x_2 \leq 4 \quad \text{R2}$$

$$x_1 + 2x_2 \leq 9 \quad \text{R3}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \quad \text{R4}$$

As restrições R1 e R2 indicam que as soluções esperadas devem ser maiores que 3 e 4 respectivamente. A restrição R4 informa que não são admitidos valores negativos.

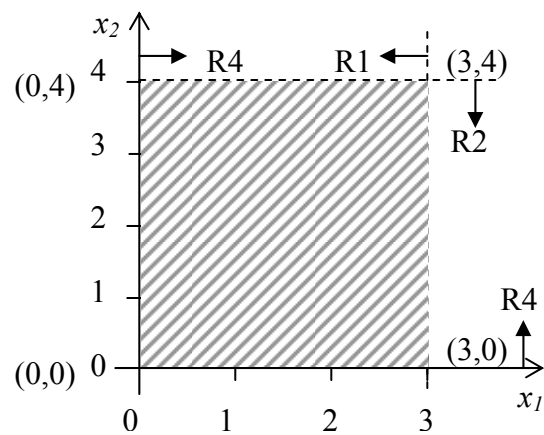


Figura 2 – Representação gráfica das restrições R1, R2 e R4.

Finalmente, marca-se a restrição R3 ($x_1 + 2x_2 \leq 9$), obtendo-se:

$$\text{Ponto } (3,0) \rightarrow x_1 = 3 \quad 3 + 2x_2 = 9 \rightarrow x_2 = 3 \quad \text{Novo ponto } (3,3)$$

$$\text{Ponto } (0,4) \rightarrow x_2 = 4 \quad x_1 + 2 \cdot 4 = 9 \rightarrow x_1 = 1 \quad \text{Novo ponto } (1,4)$$

Estes dois novos pontos determinam uma reta, que será inserida na resolução gráfica definindo o polígono convexo.

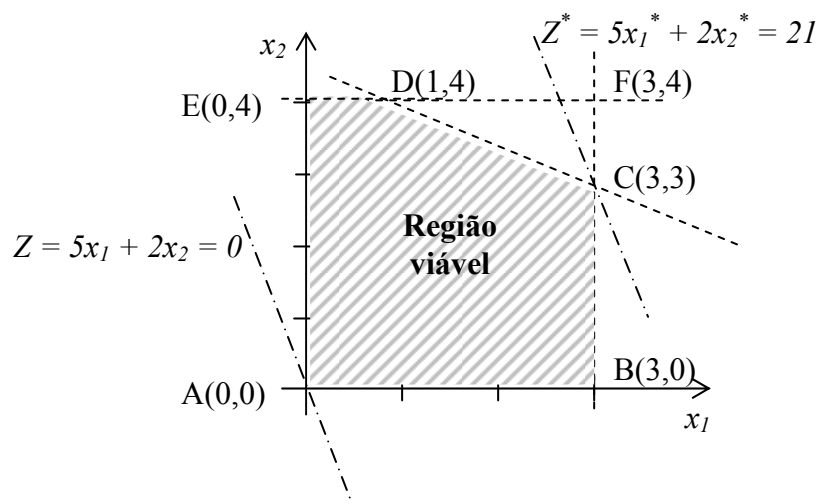


Figura 3 – Representação da região viável e do ponto de máximo.

Para achar a solução ótima, marca-se a reta $5x_1 + 2x_2 = 0$, que passa pelos pontos (0, 0) e (1, -2,5). Traça-se uma reta paralela procurando afastá-la o máximo possível da origem dos eixos.

O ponto máximo é o ponto C (3, 3) resultando em um valor máximo igual a 21 para a função objetivo.

O ponto ótimo (máx. ou mín.) sempre será obtido nos vértices do polígono ABCD, isto é, a função objetivo sempre passa por um ótimo num dos pontos extremos do conjunto das soluções compatíveis.

Analisando o exemplo gráfico, destacam-se as seguintes propriedades:

a) O conjunto de todas as soluções compatíveis com o modelo de programação linear é um conjunto convexo (região viável – área delimitada pelas restrições), e tem um número finito de vértices, que são normalmente chamados de pontos extremos. Analisando o exemplo gráfico da Fig. 2 conclui-se que o valor da função objetivo no ponto C é maior que os valores da função objetivo nos pontos B e D, adjacentes a C. Pode-se, então, garantir que a solução ótima é o ponto C, pois o conjunto de soluções compatíveis (A,B,C,D,E) é convexo.

b) Se o valor ótimo da função for limitado por restrições, pelo menos um vértice do conjunto convexo de soluções viáveis ótimo pode ser alcançado, movendo-se de um vértice a um vértice adjacente. Como se trata de um polígono convexo (número limitado de vértices) a solução ótima é um ponto extremo do polígono e o número de iterações para achar a solução é finito.

Em segundo lugar, a solução analítica do exemplo gráfico mostrado acima será apresentada através do Método Simplex, que é um procedimento algébrico e iterativo que fornece a solução exata de qualquer problema de programação linear através de um número finito de iterações. O processo de cálculo inicia-se a partir de um ponto inicial (geralmente $x_1 = 0$), ou seja, um dos pontos do polígono ABCDE. (Fig. 2). Realizam-se deslocamentos consecutivos de um vértice da região viável para outro até encontrar o ponto que corresponda à solução ótima.

A primeira solução a ser testada está normalmente associada à origem do sistema de eixos, ponto A do exemplo.

O método simplex verifica se a presente solução é ótima. Se for, o processo está encerrado. Se não for, é porque um dos pontos extremos adjacentes ao ponto “A” fornece para a função objetivo um valor maior do que o atual. No caso, do exemplo gráfico, tanto “B” como “E” são melhores que A.

O método simplex faz então a mudança do ponto A para o ponto extremo adjacente (vértice), que mais aumente o valor da função objetivo, neste caso é o ponto B. Então o processo é refeito, agora, para o ponto B. O processo finaliza quando, estando-se num ponto extremo, todos os pontos extremos adjacentes fornecem valores menores para a função objetivo.

O algoritmo do Método Simplex constitui-se na seguinte série de passos:

1º) Encontrar uma solução compatível básica inicial.

2º) Verificar se a solução atual é ótima. A solução é ótima quando todos os valores dos coeficientes da linha Z, na solução através de tabelas, forem positivos. Neste caso, é o final do processo de cálculo e a solução ótima foi encontrada. Caso contrário, a busca da solução continua através do 3º passo.

3º) Determinar a variável não básica que deve entrar na base.

4º) Determinar a variável básica que deve sair da base.

5º) Achar a nova solução compatível básica e voltar ao 2º passo.

Para melhor esclarecer o algoritmo acima exposto, o exemplo gráfico, será solucionado analiticamente.

Exemplo:

$Z = 5x_1 + 2x_2 \rightarrow \text{máx}$, sujeito as seguintes restrições:

$$x_1 \leq 3 \quad \text{R1}$$

$$x_2 \leq 4 \quad \text{R2}$$

$$x_1 + 2x_2 \leq 9 \quad \text{R3}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad \text{R4}$$

Tabela 1 – Equações com a introdução das variáveis de folga.

| | | | | | | |
|---|-----------|-----------|---------|---------|---------|-----|
| Z | - 5 x_1 | - 2 x_2 | | | | = 0 |
| | x_1 | | + x_3 | | | = 3 |
| | | x_2 | | + x_4 | | = 4 |
| | x_1 | + 2 x_2 | | | + x_5 | = 9 |

Representando o sistema de maneira esquemática para a solução inicial por:

Variáveis não básicas: $x_1 = x_2 = 0$

Variáveis básicas $x_3 = 3, x_4 = 4, x_5 = 9$

A tabela é preenchida com os coeficientes das equações, incluindo as variáveis de folga:

Tabela 2 – Coeficiente das equações incluindo as variáveis de folga.

| BASE | Z | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | b |
|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Z | 1 | -5 | -2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| x_3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 → |
| x_4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| x_5 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 9 |

A função objetivo já se encontra em termos das variáveis não-básicas x_1 e x_2 . Esta não é uma solução ótima, pois de acordo com o passo 2, ainda existem coeficientes negativos na linha Z.

Para melhorar a qualidade da solução, mecanismos de “troca” ou de “pivoteamento” entre as variáveis deve ser efetuado por meio dos seguintes passos:

Escolher a variável não básica, coluna de x_1 que será pivô. Esta coluna será escolhida por possuir o maior coeficiente com sinal negativo, na linha Z.

Para a determinação da variável que será excluída da linha pivô, é necessário definir a relação entre os elementos da última coluna, formada pelos coeficientes do vetor independente “**b**” e os valores da coluna pivô. Assim,

$$\text{alterar } x_1 \text{ para } \begin{array}{l} \nearrow x_3 \leq 3/1 \\ \searrow x_5 \leq 9/1 \end{array}$$

O menor valor da relação corresponde a variável de saída da base, x_3 . A variável x_1 tomará o valor 3. A variável não básica x_1 entrará no lugar da variável básica x_3 , ou seja x_3 sai da base e x_1 entra no lugar de x_3 .

Determina-se uma nova linha pivô, repetindo a linha da variável de saída x_3 , dividindo-a pelo elemento pivô (intersecção entre coluna e linha de saída),

| | | | | | | | |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| x_3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|

Dividir pelo elemento pivô, neste caso = 1

| | | | | | | | |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|
| x_1 nova | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|

Obtém-se desta forma a nova linha x_1 que substituirá a linha x_3 , na Tabela 2, sendo está a linha pivô nova. Determina-se então a nova linha Z, aplicando-se a seguinte transformação:

$Z_{\text{novo}} = Z_{\text{antigo}} - [(\text{elemento da intersecção do } Z_{\text{antigo}} \text{ com a coluna pivô antiga}) \times (\text{linha pivô nova})]$

Z antiga

| | | | | | | | |
|---|---|----|----|---|---|---|---|
| Z | 1 | -5 | -2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
|---|---|----|----|---|---|---|---|

-

(- 5) multiplicando

| | | | | | | | |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|
| x_1 nova | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|

Z antiga

| | | | | | | | |
|---|---|----|----|---|---|---|---|
| Z | 1 | -5 | -2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
|---|---|----|----|---|---|---|---|

-

| | | | | | | | |
|-------|---|----|---|----|---|---|-----|
| x_1 | 0 | -5 | 0 | -5 | 0 | 0 | -15 |
|-------|---|----|---|----|---|---|-----|

=

| | | | | | | | |
|-------------------|---|---|----|---|---|---|----|
| Z_{novo} | 1 | 0 | -2 | 5 | 0 | 0 | 15 |
|-------------------|---|---|----|---|---|---|----|

Determina-se a nova linha x_4 através da transformação:

$x_4 \text{ novo} = x_4 \text{ antigo} - [(\text{elemento da intersecção da linha } x_4 \text{ com a coluna pivô}) \times (\text{linha pivô nova})]$

| | | | | | | | |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|
| x_4 antiga | | | | | | | |
| x_4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| - | | | | | | | |
| 0 multiplicando | | | | | | | |
| x_1 nova | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| - | | | | | | | |
| x_4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| - | | | | | | | |
| x_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| = | | | | | | | |
| x_4 nova | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |

Para a determinação da nova linha x_5 :

x_5 novo = x_5 antigo - [(elemento da intersecção da linha x_5 com a coluna pivô) x (linha pivô nova)]

| | | | | | | | |
|-----------------|---|---|---|----|---|---|---|
| x_5 antiga | | | | | | | |
| x_5 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 9 |
| - | | | | | | | |
| 1 multiplicando | | | | | | | |
| x_1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| - | | | | | | | |
| x_5 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 9 |
| - | | | | | | | |
| x_1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| = | | | | | | | |
| x_5 nova | 0 | 0 | 2 | -1 | 0 | 1 | 6 |

Resultando na primeira iteração apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado do primeiro processo iterativo.

| BASE | Z | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | b |
|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Z | 1 | 0 | -2 | 5 | 0 | 0 | 15 |
| x_1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| x_4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| x_5 | 0 | 0 | 2 | -1 | 0 | 1 | 6 |

Pelo coeficiente “-2” na linha Z, Tabela 3, pode-se afirmar que a solução não é ótima. A variável que entrará na base será x_2 .

Reiniciando-se o algoritmo, da Tabela 3, obtém-se:

$$\text{alterar } x_2 \text{ para } \begin{cases} x_4 \leq 4/1 \\ x_5 \leq 6/2 \end{cases}$$

O menor valor da relação corresponde a variável que sairá da base, x_5 . A variável x_2 tomará o valor 3. A variável não básica x_2 substituirá a variável básica x_5 , ou seja, x_5 sai da base e x_2 entra no lugar de x_5 .

As operações descritas a seguir deverão ser realizadas baseadas na Tabela 3.

Para a determinação da nova linha pivô, repetir a linha da variável de saída x_5 e dividi-la pelo elemento pivô, intersecção da coluna com a linha de saída. A linha pivô nova deverá ocupar o lugar da antiga linha x_5 .

| | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|------|---|-----|---|
| x_5 | 0 | 0 | 2 | -1 | 0 | 1 | 6 |
| Dividir por 2 (elemento pivô) | | | | | | | |
| x_2 nova | 0 | 0 | 1 | -1/2 | 0 | 1/2 | 3 |

A linha Z nova é determinada, fazendo-se as seguintes operações:

Z antigo

| | | | | | | | |
|---|---|---|----|---|---|---|----|
| Z | 1 | 0 | -2 | 5 | 0 | 0 | 15 |
|---|---|---|----|---|---|---|----|

(-2) multiplicando

| | | | | | | | |
|------------|---|---|---|------|---|-----|---|
| x_2 nova | 0 | 0 | 1 | -1/2 | 0 | 1/2 | 3 |
|------------|---|---|---|------|---|-----|---|

Obtém-se:

Z antigo

| | | | | | | | |
|---|---|---|----|---|---|---|----|
| Z | 1 | 0 | -2 | 5 | 0 | 0 | 15 |
|---|---|---|----|---|---|---|----|

| | | | | | | | |
|------------|---|---|----|---|---|----|----|
| x_2 nova | 0 | 0 | -2 | 1 | 0 | -1 | -6 |
|------------|---|---|----|---|---|----|----|

| | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|----|
| Z_{novo} | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 21 |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|----|

A linha x_1 nova é encontrada a partir das seguintes operações: x_1 antiga

| | | | | | | | |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| x_1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|

1 multiplicado pela linha pivô

| | | | | | | | |
|------------|---|---|---|------|---|-----|---|
| x_2 nova | 0 | 0 | 1 | -1/2 | 0 | 1/2 | 3 |
|------------|---|---|---|------|---|-----|---|

| | | | | | | | |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|
| x_1 nova | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|

A seguir será determinada a nova linha x_4 , assim o segundo processo iterativo ficará concluído,

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|---|---|------|---|------|---|
| x_4 antiga | | | | | | | |
| x_4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| - | | | | | | | |
| 1 multiplicado pela linha pivô novo | | | | | | | |
| x_2 nova | 0 | 0 | 1 | -1/2 | 0 | 1/2 | 3 |
| = | | | | | | | |
| x_4 nova | 0 | 0 | 0 | 1/2 | 1 | -1/2 | 1 |

O resultado da segunda iteração é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado da segunda iteração.

| BASE | Z* | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | b |
|--------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Z* | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 21 |
| x_1* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| x_4* | 0 | 0 | 0 | 1/2 | 1 | -1/2 | 1 |
| x_2* | 0 | 0 | 1 | -1/2 | 0 | 1/2 | 3 |

A presente solução é ótima, pois não existe nenhum coeficiente negativo na linha de Z na Tabela 4. Os valores finais são: $x_1 = 3$ e $x_2 = 3$. Substituindo os valores de x_1 e x_2 na equação $Z = 5x_1 + 2x_2 \rightarrow \text{máx}$, obtém-se 21. Resultado idêntico ao obtido na solução gráfica.

APÊNDICE M – Método branch and bound

O algoritmo de branch and bound pode ser ilustrado através do seguinte exemplo.

Considerando a função objetivo:

$$Z = 2x_1 + 3x_2 \rightarrow \text{máx}$$

Com as restrições:

$$5x_1 + 7x_2 \leq 35$$

$$4x_1 + 9x_2 \leq 36$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

x_1 e x_2 são valores inteiros

A solução deste problema com base no Método Simplex sem considerar a exigência que todos os valores devam ser inteiros é a seguinte solução:

$$x_1 = 3\frac{12}{17}, \quad x_2 = 2\frac{6}{17}, \quad Z = 14\frac{8}{7}$$

O processo de solução deste problema está representado na Figura 1 a seguir.

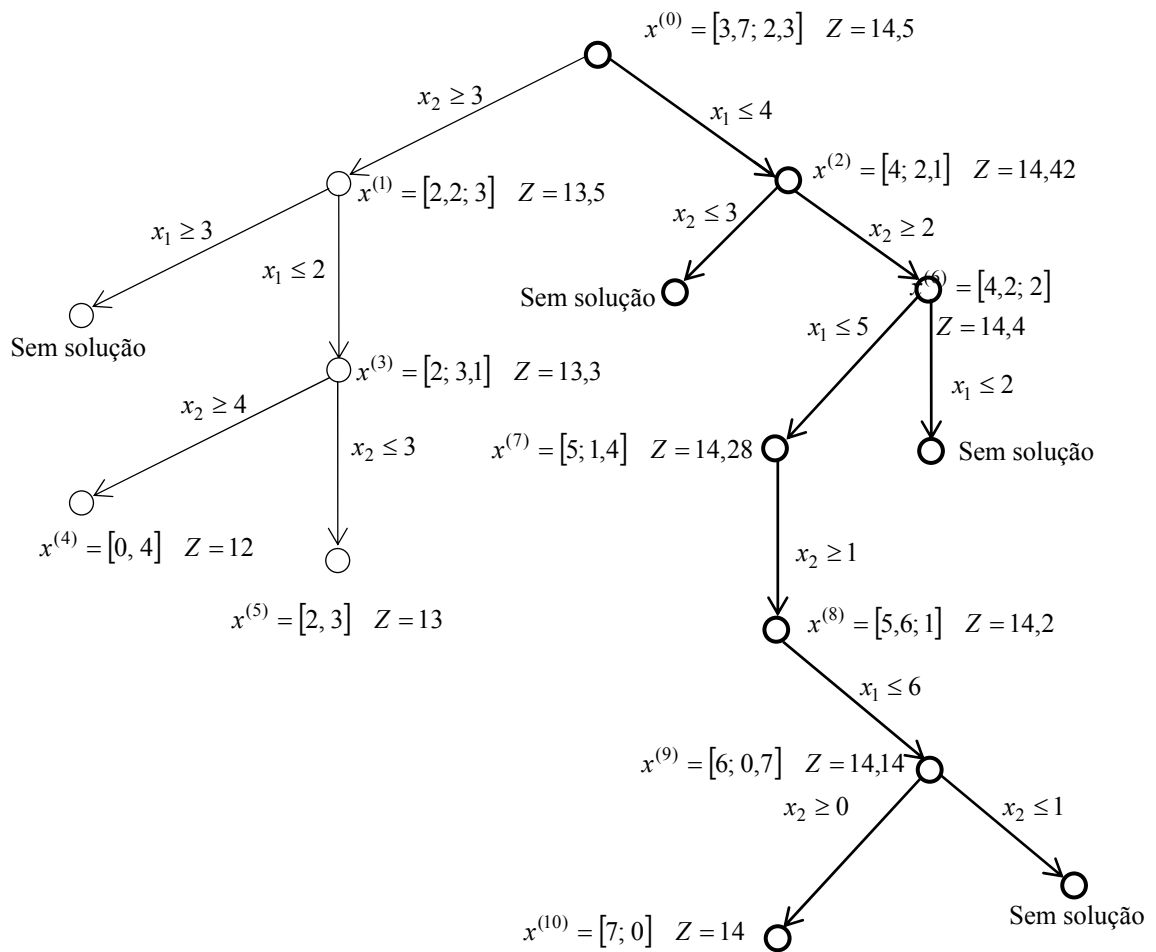


Figura 4 - Ilustração de resolução do problema de otimização inteira através do algoritmo “branch and bound”.

Então, como solução final do problema inicial considera-se $x [7, 0]$ onde $Z = 14$.

APÊNDICE N – Variação da energia não fornecida

Aqui, está apresentado um exemplo que pode servir como ilustração para a definição da redução do valor esperado de energia não fornecida, no caso de instalação de equipamento de comutação.

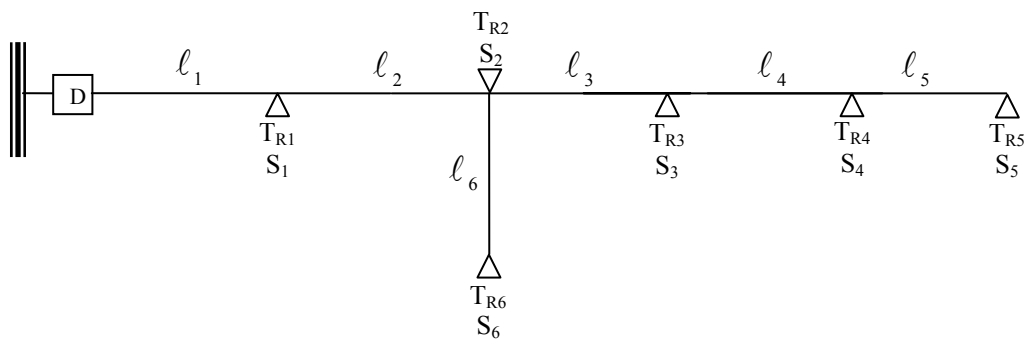


Figura 1 - Diagrama unifilar de um alimentador sem a presença de nenhum equipamento de comutação.

No caso da ausência de qualquer equipamento de comutação na rede, o valor esperado de energia não fornecida (W_n^a) fica definido através do fato de que qualquer falha na rede provoca uma interrupção no fornecimento de energia para o tempo (τ_{tot}) necessário para a realização da manutenção. Por isso, o valor de W_n^a para o exemplo da Fig. 1 será calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 W_n^a = & \lambda_0 [S_1 \tau_{tot} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\
 & + S_2 \tau_{tot} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\
 & + S_3 \tau_{tot} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\
 & + S_4 \tau_{tot} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\
 & + S_5 \tau_{tot} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\
 & + S_6 \tau_{tot} (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6)]
 \end{aligned}$$

Agora, supondo que no começo dos trechos ℓ_3 e ℓ_4 estejam instaladas as chaves x_1 e x_2 , Fig. 2.

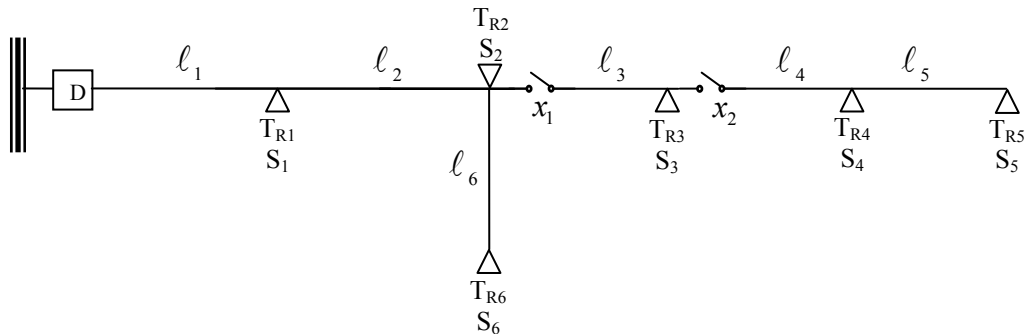


Figura 8 - Diagrama unifilar do alimentador com a presença das chaves x_1 e x_2 .

Esta situação faz com que, no caso de falhas nos trechos ℓ_3 , ℓ_4 e ℓ_5 , o tempo de restabelecimento do fornecimento de energia para os transformadores S_1 e S_2 e S_6 , defina-se como o tempo necessário para o chaveamento na rede (τ_{parc}) com o objetivo de isolar os trechos com falha. Calcula-se, neste caso, o novo valor esperado de energia não fornecida:

$$\begin{aligned}
 W_n^b = & \lambda_0 \{ S_1 [\tau_{tot} (\ell_1 + \ell_2 + \ell_6) + \tau_{parc} (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5)] \\
 & + S_2 [\tau_{tot} (\ell_1 + \ell_2 + \ell_6) + \tau_{parc} (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5)] \\
 & + S_3 [\tau_{tot} (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_6) + \tau_{parc} (\ell_4 + \ell_5)] \\
 & + S_4 [\tau_{tot} (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5 + \ell_6)] \\
 & + S_5 [\tau_{tot} (\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5 + \ell_6)] \\
 & + S_6 [\tau_{tot} (\ell_1 + \ell_2 + \ell_6) + \tau_{parc} (\ell_3 + \ell_4 + \ell_5)] \}
 \end{aligned}$$

É claro que a redução do valor de energia não fornecida obtém-se através da instalação de chaves nas redes e define-se através da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\Delta W_n &= \lambda_0 \{ [S_1(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_3 + l_4 + l_5)] \\ &\quad + [S_2(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_3 + l_4 + l_5)] \\ &\quad + [S_3(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_4 + l_5)] \\ &\quad + [S_6(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_3 + l_4 + l_5)] \end{aligned}$$

Calcula-se,

$$\begin{aligned}W_n^a - \Delta W_n &= \lambda_0 [S_1\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_2\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_3\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_4\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_5\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_6\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6)] \\ &\quad - \lambda_0 \{ [S_1(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_3 + l_4 + l_5)] \\ &\quad + [S_2(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_3 + l_4 + l_5)] \\ &\quad + [S_3(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_4 + l_5)] \\ &\quad + [S_6(\tau_{tot} - \tau_{parc})(l_3 + l_4 + l_5)] \end{aligned}$$

Então,

$$\begin{aligned}W_n^a - \Delta W_n &= \lambda_0 [S_1\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_2\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_3\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_4\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_5\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6) \\ &\quad + S_6\tau_{tot}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6)] \\ &\quad + \lambda_0 \{ -S_1\tau_{tot}(l_3 + l_4 + l_5) + S_1\tau_{parc}(l_3 + l_4 + l_5) \} \\ &\quad + [-S_2\tau_{tot}(l_3 + l_4 + l_5) + S_2\tau_{parc}(l_3 + l_4 + l_5)] \\ &\quad + [-S_3(\tau_{tot}(l_4 + l_5) + \tau_{parc}S_3(l_4 + l_5))] \\ &\quad + [-S_6\tau_{tot}(l_3 + l_4 + l_5) + \tau_{parc}S_6(l_3 + l_4 + l_5)] \end{aligned}$$

Logo,

$$\begin{aligned}
W_n^a - \Delta W_n = & \lambda_0 \{ S_1 [\tau_{tot}(\ell_1 + \ell_2 + \ell_6) + \tau_{parc}(\ell_3 + \ell_4 + \ell_5)] \\
& + [S_2 \tau_{tot}(\ell_1 + \ell_2 + \ell_6) + \tau_{parc}(\ell_3 + \ell_4 + \ell_5)] \\
& + [S_3 \tau_{tot}(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_6) + \tau_{parc}(\ell_4 + \ell_5)] \\
& + S_4 [\tau_{tot}(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5 + \ell_6)] \\
& + S_5 \tau_{tot}[(\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4 + \ell_5 + \ell_6)] \\
& + S_6 \tau_{tot}(\ell_1 + \ell_2 + \ell_6)] + \tau_{parc}(\ell_3 + \ell_4 + \ell_5) \} = W_n^b
\end{aligned}$$

Então,

$$W_n^b = W_n^a - \Delta W_n$$

Estes resultados justificam a utilização da expressão (7.2) para a definição do valor esperado da energia não fornecida, no processo de instalação de equipamentos de comutação em redes elétricas.

APÊNDICE O – Matriz lógico-estrutural para o cálculo dos valores da energia não fornecida para o algoritmo de maximização

Tabela 1 – Cálculo da energia não fornecida com chaves em todos os trechos.

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|--------|
| T _{R1} | 112,4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 24,80 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 108,84 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 48,38 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 67,33 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 31,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 37,67 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 318,70 |

Tabela 2 – Energia não fornecida com a retirada da chave x_l .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 24,87 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 116,94 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 51,98 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 67,33 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 34,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 39,83 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 335,64 |

Tabela 3 – Energia não fornecida com a retirada da chave x_2 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 24,99 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 115,93 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 51,53 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 72,84 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 31,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 39,56 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 336,54 |

Tabela 4 – Energia não fornecida com a retirada da chave x_3 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 25,36 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 108,84 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 48,38 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 90,96 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 42,94 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 37,67 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 354,14 |

Tabela 5 – Energia não fornecida com a retirada da chave x_4 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 24,80 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 141,24 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 62,78 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 67,33 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 31,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 37,67 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 365,50 |

Segunda Iteração – Sem a chave x_7 .

Tabela 6 – Energia não fornecida com a retirada da chave x_7 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 24,87 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 116,94 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 51,98 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 67,33 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 34,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 39,83 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 335,64 |

Tabela 7– Energia não fornecida com a retirada das chaves x_1 e x_2 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 25,14 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 124,03 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 55,13 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 72,84 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 34,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 353,54 |

Tabela 8 – Energia não fornecida com a retirada da chave x_1 e x_3

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 25,51 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 116,94 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 51,98 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 90,96 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 45,94 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 39,83 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 371,15 |

Tabela 9 — Energia não fornecida com a retirada da chave x_1 e x_4

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 25,14 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 156,43 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 69,53 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 72,84 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 34,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 400,34 |

Terceira Iteração – Sem as chaves x_1 e x_2 .

Tabela 10 – Energia não fornecida com a retirada da chave x_1 e x_2 e x_3

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 25,78 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 124,03 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 55,13 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 96,47 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 45,94 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 389,06 |

Tabela 11 – Energia não fornecida com a retirada da chave x , x_2 e x_4 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 25,14 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 156,43 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 69,53 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 72,84 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 34,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 400,34 |

**APÊNDICE P – Matriz lógico-estrutural para o cálculo dos valores
da energia não fornecida para o algoritmo de minimização**

Tabela 12 – Energia não fornecida sem nenhuma chave

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 26,26 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 156,43 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 69,53 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 121,67 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 57,94 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 473,54 |

Tabela 13 – Energia não fornecida com apenas a chave x_l

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 26,03 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 148,33 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 65,93 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 121,67 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 54,94 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 39,56 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 456,45 |

Tabela 14 – Energia não fornecida com apenas a chave x_2

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 25,67 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 149,34 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 66,38 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 116,16 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 57,94 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 39,83 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 455,31 |

Tabela 15 - Energia não fornecida com apenas a chave x_3

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 25,14 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 156,43 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 69,53 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 72,84 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 34,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 400,34 |

Tabela 16 – Energia não fornecida com apenas a chave x_4

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T_{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 25,78 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T_{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 124,03 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T_{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 55,13 |
| T_{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 96,47 |
| T_{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 45,94 |
| T_{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 389,06 |

Segunda Iteração, apenas chave x_4 instalada.

Tabela 17 – Energia não fornecida com a chave x_4 instalada e acrescentando a chave x_I .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T_{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 25,55 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T_{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 115,93 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T_{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 51,53 |
| T_{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 96,47 |
| T_{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 42,94 |
| T_{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 39,56 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 371,97 |

Tabela 7 – Energia não fornecida com a chave x_4 instalada e acrescentando a chave x_2 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 25,51 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 116,94 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 51,98 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 90,96 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 45,94 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 39,83 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 371,15 |

Tabela 8 – Energia não fornecida com a chave x_4 instalada e acrescentando a chave x_3 .

| | Potência do Tr | L0-1 | L1-2 | L2-3 | L3-4 | L4-5 | L5-6 | L2-7 | L3-8 | L5-9 | Wn |
|-----------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|--------|
| T _{R1} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 25,14 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R4} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 124,03 |
| 0 | 0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,00 |
| T _{R6} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 55,13 |
| T _{R2} | 112,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 72,84 |
| T _{R3} | 75 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 34,69 |
| T _{R5} | 45 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 41,72 |
| | | | | | | | | | | Wn total | 353,54 |

**APÊNDICE Q – Eficiência da solução do problema de chaveamento
ótimo sob o ponto de vista das perdas**

Considerando-se o deslocamento do equipamento NA para um trecho adjacente da rede de acordo com as Fig. 8.8 e 8.9, apresentadas no Capítulo 8,

$$\delta(\Delta P_I)^d = \Delta P_I' - \Delta P_I = 3 \sum_{i=1}^{z+1} R_i \left(\sum_{j=1}^{z+1} I_j \right)^2 - 3 \sum_{i=1}^z R_i \left(\sum_{j=1}^z I_j \right)^2$$

como a parcela,

$$3 \sum_{i=1}^{z+1} R_i \left(\sum_{j=1}^{z+1} I_j \right)^2 = 3 \sum_{i=1}^z R_i \left(\sum_{j=1}^{z+1} I_j \right)^2 + 3 R_{z+1} I_{z+1}^2$$

obtem-se,

$$\delta(\Delta P_I)^d = 3 \sum_{i=1}^z R_i \left[\left(\sum_{\substack{j=1 \\ i \leftarrow j}}^{z+1} I_j \right)^2 - \left(\sum_{\substack{j=1 \\ i \leftarrow j}}^z I_j \right)^2 \right] + 3 R_{z+1} I_{z+1}^2 =$$

$$(a^2 - b^2) = (a - b)(a + b)$$

então,

$$= 3 \sum_{i=1}^z R_i \left[\left(\sum_{j=1}^{z+1} I_j \right) - \left(\sum_{j=1}^z I_j \right) \right] \left[\left(\sum_{j=1}^{z+1} I_j \right) + \left(\sum_{j=1}^z I_j \right) \right] + 3 R_{z+1} \cdot I_{z+1}^2$$

$$= 3 \sum_{i=1}^z R_i \left\{ \left[\left(\sum_{j=1}^{z+1} I_j \right) - \left(\sum_{j=1}^z I_j \right) \right] \cdot \left[\left(\sum_{j=1}^{z+1} I_j \right) + \left(\sum_{j=1}^z I_j \right) \right] \right\} + 3 R_{z+1} I_{z+1}^2$$

$$= 3 \sum_{i=1}^z R_i \cdot \left\{ \left[\left(\sum_{j=1}^z I_j + I_{z+1} \right) - \left(\sum_{j=1}^z I_j \right) \right] \cdot \left[\left(\sum_{j=1}^z I_j + I_{z+1} \right) + \left(\sum_{j=1}^z I_j \right) \right] \right\} + 3 R_{z+1} I_{z+1}^2$$

$$\begin{aligned}
 &= 3 \sum_{i=1}^z R_i \cdot \left\{ [I_{z+1}] \cdot \left[2 \sum_{j=1}^z I_j + I_{z+1} \right] \right\} + 3R_{z+1} I_{z+1}^2 \\
 &= 3 \sum_{i=1}^z R_i \cdot \left\{ I_{z+1}^2 + 2I_{z+1} \sum_{j=1}^z I_j \right\} + 3R_{z+1} I_{z+1}^2 \\
 &= \underbrace{3I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^z R_i}_{\downarrow} + 6I_{z+1} \sum_{i=1}^z R_i \sum_{j=1}^z I_j + \underbrace{3R_{z+1} I_{z+1}^2}_{\downarrow} \\
 &= I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^{z+1} R_i
 \end{aligned}$$

$$\delta(\Delta P_I)^d = 3I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^{z+1} R_i + 6I_{z+1} \sum_{i=1}^z R_i \sum_{j=1}^z I_j$$

Considera o valor de R do trecho onde está instalada a chave.

Porção do alimentador “*antes*” da chave

$$\delta(\Delta P_{II})^d = -3I_{z+1}^2 \sum_{i=z+2}^{n+1} R_i - 6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j$$

Considera o valor de R do trecho onde está instalada a chave.

Porção do alimentador “*depois*” da chave

$$\delta(\Delta P)^d = [\delta(\Delta P_I)^d - \delta(\Delta P_{II})^d]$$

$$\delta(\Delta P)^d = \boxed{3I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^{z+1} R_i} + 6I_{z+1} \sum_{i=1}^z R_i \sum_{\substack{j=1 \\ i \leftarrow j}}^z I_j - 3I_{z+1}^2 \sum_{\substack{j=z+2 \\ i \leftarrow j}}^{n+1} R_j - 6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j$$

onde

$$\boxed{3I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^{z+1} R_i} = 3I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^z R_i + 3I_{z+1}^2 R_{z+1}$$

$$\delta(\Delta P)^d = 3I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^z R_i + 3I_{z+1}^2 R_{z+1} + 6I_{z+1} \sum_{i=1}^z R_i \sum_{j=1}^z I_j - 3I_{z+1}^2 \sum_{i=z+2}^{n+1} R_i - 6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j$$

$$-6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j = -6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j + 6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i I_{z+1}$$

Equivale à retirada do trecho para onde foi deslocada a chave

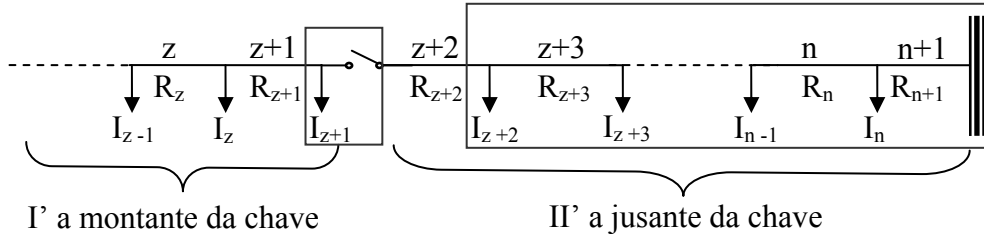


Figura 1 – Instalação da chave no trecho z+2.

$$\delta(\Delta P)^d = 6I_{z+1} \sum_{i=1}^z R_i \sum_{j=1}^z I_j + 3I_{z+1}^2 \sum_{i=1}^z R_i + 3I_{z+1}^2 R_{z+1} - 6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j + 6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i I_{z+1} - 3I_{z+1}^2 \sum_{i=z+2}^{n+1} R_i$$

$$-6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j = -6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i \sum_{j=z+1}^n I_j + 6I_{z+1} R_{z+2} \sum_{j=z+1}^n I_j$$

Neste caso, foi incluído no intervalo do somatório o trecho R_{z+2} onde está colocada a chave ($z + 2$)

$$+6I_{z+1} \sum_{i=z+3}^{n+1} R_i I_{z+1} = 6I_{z+1}^2 \sum_{i=z+2}^{n+1} R_i - 6I_{z+1}^2 R_{z+2}$$

Considerando,

$$\begin{aligned}
 R_{z+1} &= R_p \\
 I_{z+1} &= I_p, \\
 M_I &= \sum_{i=1}^z R_i \sum_{j=1}^z I_j \\
 M_{II} &= \sum_{i=z+2}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j \\
 R_I &= \sum_{i=1}^z R_i \\
 R_{II} &= \sum_{i=z+2}^{n+1} R_i \sum_{j=z+2}^n I_j \\
 R_{\Sigma} &= R_I + R_{II} + R_p
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta(\Delta P)^d &= 6I_p M_I + 3I_p^2 R_I + 3I_p^2 R_p - 6I_p M_{II} \\
 &\quad \cancel{+ 6I_p^2 R_{z+2} + 6I_p^2 R_{II} - 6I_p^2 R_{z+2} - 3I_p^2 R_{II}}
 \end{aligned}$$

$$\delta(\Delta P)^d = 6I_p (M_I - M_{II}) + 3I_p^2 \cdot R_{\Sigma}$$

ou

$$\delta(\Delta P)^d = 6I_p \left[\sum_{j=1}^z I_j \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \in \alpha_j}}^z R_i \right) - \sum_{j=z+2}^n I_j \left(\sum_{\substack{i=z+2 \\ i \in \alpha_j}}^{n+1} R_i \right) \right] + 3I_p^2 \sum_{i=1}^{n+1} R_i$$

Por analogia,

$$\delta(\Delta P)^e = 6I_p (M_{II} - M_I) + 3I_p^2 \cdot R_{\Sigma}$$

$$\delta(\Delta P)^e = 6I_p \left[\sum_{j=z+1}^n I_j \left(\sum_{\substack{i=z+2 \\ i \in \alpha_j}}^{n+1} R_i \right) - \sum_{j=1}^z I_j \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \in \alpha_j}}^z R_i \right) \right] + 3I_p^2 \sum_{i=1}^{n+1} R_i$$

Como exemplo, será analisado um alimentador simplificado onde é proposta de mudança de posição da chave NA do trecho 8-11 (Fig. 2) para o trecho 6-7 (Fig. 3).

Primeiramente a análise será realizada para a situação 1, Fig. 8.2.

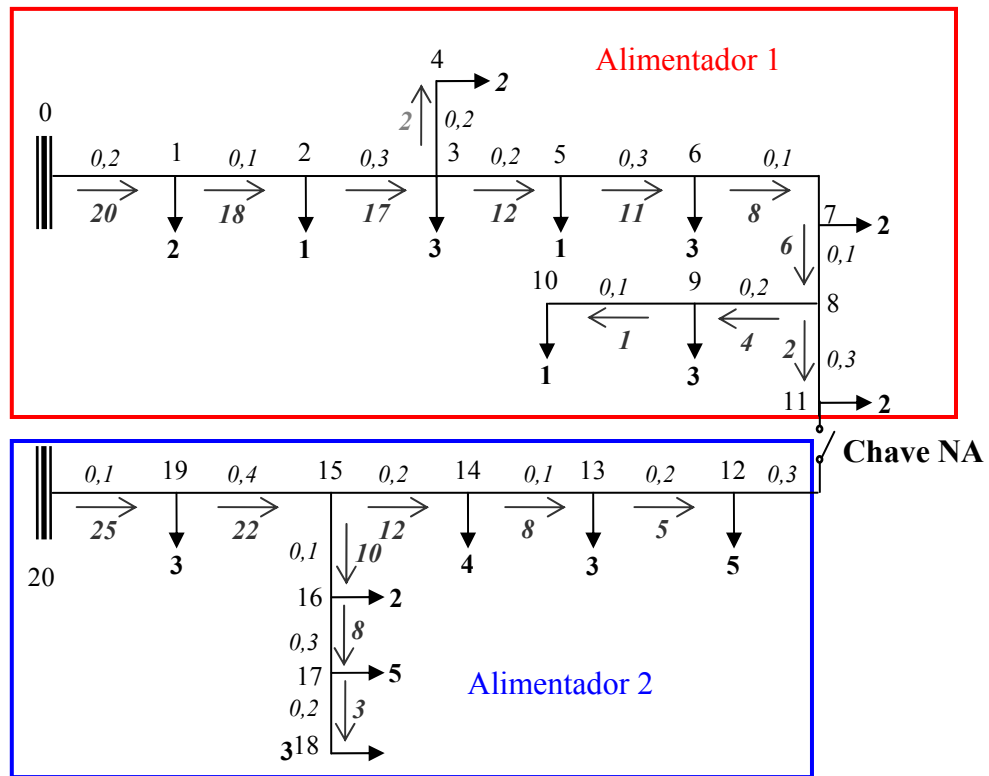


Fig. 2 – Situação 1 – Trecho de alimentador com a chave no trecho 11 – 12.

Cálculos diretos de perdas da potência da rede apresentada na Fig. 2, fornecem os seguintes resultados:

$$\Delta P_I = 838,5$$

$$\Delta P_{II} = 981,9$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 1820,4$$

Supõe-se que no processo de solução do problema de chaveamento ótimo foi indicado a instalação de chave faca no trecho 6-7. Verifica-se eficiência de redistribuição de cargas entre alimentadores 1 e 2 através do fechamento da chave localizada no trecho 11-12 e abertura da chave localizada no trecho 6-7.

Para a nova topologia da rede Fig. 3 tem-se:

$$\Delta P'_I = 209,4$$

$$\Delta P'_{II} = 2019$$

$$\Delta P'_{\Sigma} = 2228,4$$

Então, a alteração de perdas de potência nesta situação apresenta o seguinte valor:

$$\delta(\Delta P) = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P'_{\Sigma}$$

$$\delta(\Delta P) = 1820,4 - 2228,4$$

$$\delta(\Delta P) = -408$$

Agora, a mesma análise é realizada utilizando características equivalentes definidas anteriormente para a primeira situação, Fig. 2.

$$M_I = 24,3$$

$$M_{II} = 15,5$$

$$R_I = 2,3$$

$$R_{II} = 1,0$$

$$R_{\Sigma} = 2,9$$

Analisando a possibilidade de mudança da chave NA para o trecho 6 – 7, Fig. 3.

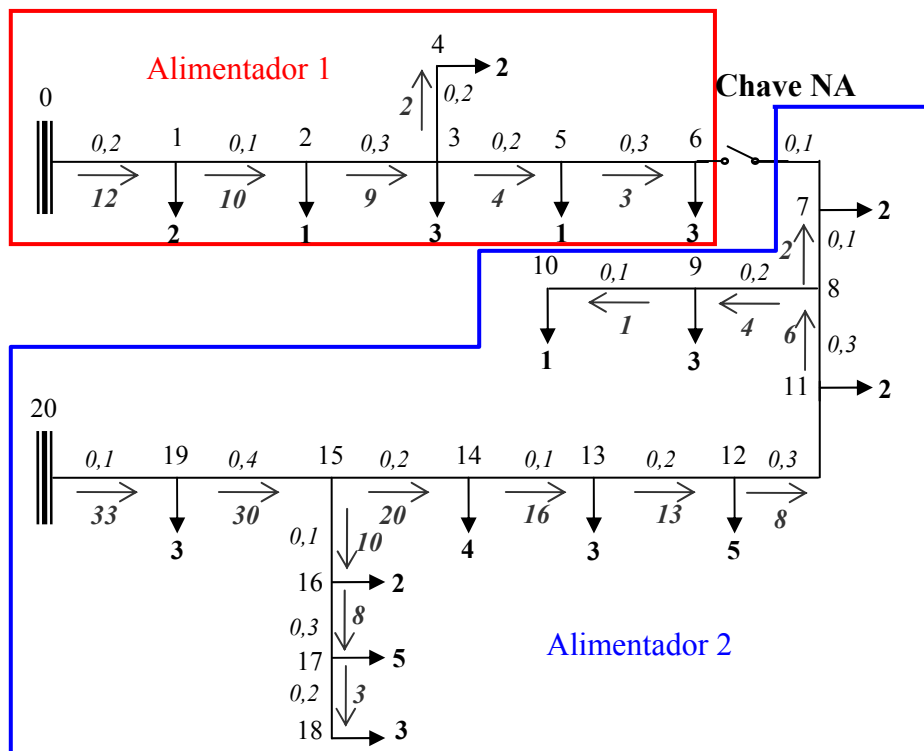


Fig. 3 – situação 2 – Trecho de alimentador com a chave no trecho 6 -7.

Agora através da equação 8.24 (alterações de chave NA para o lado esquerdo) definem-se as alterações das perdas de potência, considera-se que para o exemplo apresentado $I_p = 8$

$$\begin{aligned} \delta(\Delta P)^e &= 6I_p(M_{II} - M_I) + 3I_p^2 \cdot R_\Sigma \\ &= 6 \cdot 8(15,5 - 24,3) + 3 \cdot 8^2 \cdot 2,9 \\ &= 134,4 \end{aligned}$$

A condição para verificar a eficiência da mudança do ponto de interligação entre os alimentadores é: se $\delta(\Delta P)^e < 0$ mudar a chave NA para a esquerda, conforme definido no Capítulo 8.

O resultado verdadeiro ou falso de $\delta(\Delta P)^e < 0$ corresponde: falso à ineficiência da mudança da chave NA, ou verdadeiro à eficiência da alteração do ponto de abertura do alimentador em regime de operação normal.

$$M_I - M_{II} > \frac{I_P \cdot R_{\Sigma}}{2}$$

$$8,8 > 11,6$$

A condição para mudança do ponto de abertura do alimentador é: se $M_I - M_{II} > \frac{I_P \cdot R_{\Sigma}}{2}$ mudar a chave NA para a esquerda. Esta condição, para o exemplo em análise, também não é verdadeira.

Como nenhuma das condições se verifica como verdadeira, então sob o ponto de vista das perdas não é conveniente mudar o local de instalação da chave NA.

Os resultados idênticos comprovam a possibilidade de utilização de características equivalentes para este tipo de análise.