

Sistema de Seleção Multicritério de Tecnologia de Conexão da Fazenda Inteligente

Hugo Terceiro Colares¹, Cecilia de Azevedo Castro César¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
Estado São Paulo - SP – Brasil

hugoterceiro@gmail.com, cecilia@ita.br

Abstract. *Choosing an efficient communication technology among the many options available for a farm is a complex task. Technical and non-technical criteria, as objective and subjective criteria, must be considered. Thus, decisions are multi-criteria. In this work, we build a decision system using the analytical method of decision AHP (Analytical Hierarchy Process) to support the choice of technology to deploy in a Smart Farm. We applied the technique to a long-range scenario to connect the central office to different farm regions. We analyzed six connectivity options from the perspective of eleven criteria. Additionally, we evaluate the result according to the priority given to cost.*

Resumo. *Escolher uma tecnologia de comunicação eficiente entre tantas opções disponíveis para uma fazenda é tarefa complexa. Devem ser considerados critérios técnicos e não técnicos, critérios objetivos e subjetivos. Assim, as decisões tendem a ser multicritério. Neste trabalho, construímos um sistema de decisão através do método analítico de decisão AHP (Analytical Hierarchy Process) para apoiar a escolha da tecnologia a implantar em uma fazenda inteligente. Aplicamos o método a um cenário de longo alcance para conectar o escritório central a diferentes regiões da fazenda. Analisamos 6 opções de conectividade sob a perspectiva de 11 critérios. Adicionalmente avaliamos o resultado em função da prioridade dada ao custo.*

1. Introdução

A agricultura digital está promovendo uma mudança nos métodos empregados na agricultura tradicional, e também grande melhoria nos resultados obtidos. O Brasil, com forte vocação agrícola, se empenha em aderir à transformação digital que muitas vezes requer vultosos investimentos. Esta transformação usando as técnicas de Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*) requer os pontos de interesse conectados via uma rede de comunicação o que é um grande desafio para o Brasil com suas dimensões continentais. O ministério da Agricultura conduziu um estudo que mapeou o estado da arte da conectividade no Brasil comprovando que é insatisfatório [Ministério da Agricultura 2021]. A Figura 1 mostra as grandes discrepâncias da cobertura 4G nas regiões brasileiras, sobretudo nas regiões Norte e Centro-Oeste. Não obstante a opção 4G ainda não completamente disponível, surge o 5G que, no curto prazo, não será a melhor solução para todos os cenários. E como a tecnologia continua o ritmo acelerado de evolução, os pesquisadores já lidam com o 6G para cenários não totalmente suportados pelo 5G.

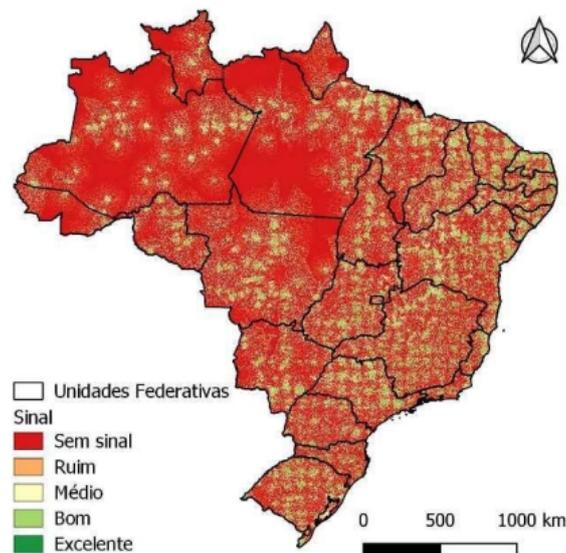


Figure 1. Tecnologia 4G no Brasil - Fonte: [Ministério da Agricultura 2021]

Os fornecedores e as combinações de tecnologias tendem a crescer. Não obstante toda esta evolução, há falta de qualquer opção de conectividade para 73% dos produtores brasileiros ¹.

Embora exista um plano nacional em ação para aumentar a cobertura brasileira, muitas ações ficam a cargo de decisores locais que devem considerar questões técnicas e objetivas, mas também questões subjetivas. As decisões envolvem parâmetros de telecomunicações, mas também parâmetros de custo. Determinada fazenda em determinada região pode empregar uma tecnologia, e uma outra fazenda com as mesmas demandas em outra região pode empregar outra solução devido a questões, por exemplo dos preços praticados por prestadores de serviço locais.

Para combinar questões técnicas e não técnicas, que podem envolver elementos tangíveis ou intangíveis, um sistema de decisão multicritério pode ser de grande auxílio. Este trabalho teve como objetivo construir um sistema de decisão flexível capaz de expressar as diferentes considerações no processo de escolha da tecnologia de conectividade no campo. Para isso, foi empregado o método AHP (Analytical Hierarchy Process) que constrói uma hierarquia de parâmetros de diferentes naturezas, relacionando-os ao problema global. Assim, as principais contribuições deste trabalho são:

- A escolha de 11 critérios para avaliar conectividade ainda não considerados em conjunto em trabalhos anteriores;
- A avaliação de 6 tecnologias sem fio para links de longo alcance na aplicação Smart-Farm;
- A construção de um sistema hierárquico de decisão contendo os principais elementos e suas respectivas prioridades;
- Um estudo de caso para aplicação do sistema de decisão.

¹<https://www.portaldoagronegocio.com.br/tecnologia/conectividade-e-digital/noticias/falta-de-conectividade-na-area-rural-atinge-73-dos-produtores>

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: trabalhos relacionados ao nosso encontram-se na Seção 2; o sistema de seleção proposto na Seção 3; os resultados da aplicação do sistema de seleção na Seção 4 e a conclusão na Seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

Inúmeros problemas complexos se beneficiam do uso de múltiplos critérios no processo de busca de soluções. O AHP tem sido adotado em diversos domínios. No contexto da transformação digital, Uslu et al. discutem a transição de uma empresa de médio porte para a Internet das Coisas [Uslu et al. 2019]. O estudo mostrou a importância do uso do AHP como ferramenta matemática primária para a tomada de decisão. Embora a comunicação faça parte do processo, não foi o foco principal e é apenas um critério de alto nível. Assim, os autores não forneceram um julgamento sobre a melhor tecnologia.

Fuzzy e AHP (FAHP) é uma combinação típica de técnicas, como mostrado por [Ly et al. 2018]. FAHP julgou os fatores influentes no entanto, a solução não especifica a tecnologia de comunicação, cabendo ao designer decidir posteriormente. Em domínios mais próximos da Fazenda Inteligente, vemos o uso das técnicas de múltiplos critérios em IoT. AHP se mostrou muito versátil no trabalho de Wang et al. onde serve como componente de um sistema dinâmico, o roteamento [Wang et al. 2019]. O sistema mesmo em ambiente computacionalmente exigente apresentou um tempo factível. Esta exigência não é necessária no problema que estamos tratando.

Um trabalho precursor do nosso usou também dados de custo e QoS para resolver problemas ligados a modelagem de dados [Li et al. 2020]. Neste caso, a modelagem dos dados integrada ao sistema trouxe grande complexidade.

Os sistemas IoT interligam sistemas por natureza, e muitas combinações e arranjos são possíveis. Silva et al. apresentam critérios para ajudar a avaliar os sistemas IoT de acordo com o cenário de aplicação [Silva et al. 2017]. Esse trabalho lança luz sobre a definição de ferramentas para apoiar a tomada de decisão mais rápida no desenvolvimento de sistemas IoT. O estudo de [Kondratenko et al. 2018] usou o AHP para selecionar a plataforma IoT. Seu modelo continha sete critérios de seleção e filtrou cinco plataformas compatíveis convencionais. Empregou duas abordagens para coeficientes de peso a fim de proceder o julgamento.

Singla et al. combina fuzzy com AHP e TOPSIS para selecionar serviços em nuvem para diminuir o poder de processamento, e a tomada de decisão considera mobilidade e custos [Singla et al. 2018]. No entanto, a tecnologia de conectividade não é objeto de estudo, considerando apenas métricas de alto nível, como velocidade.

A decisão de tecnologia de conectividade considerando múltiplos critérios aparece no trabalho de [Vannieuwenborg et al. 2018], porém sem o uso de AHP. Eles propõem uma metodologia de 2 etapas para escolher a conectividade IoT levantando pontos técnicos relevantes para o julgamento da tecnologia de comunicação. A principal deficiência dessa abordagem é a inflexibilidade, ou seja, se um usuário deseja adicionar uma nova opção, todo o processo precisa começar do início. Com o AHP, [Martinez et al. 2020] estudaram conectividade de longo alcance em regiões rurais e tecnologias SigFox, LoRaWAN e NB-IoT no Equador. A principal restrição foi o custo, e ali SigFox foi a opção escolhida.

O trabalho de [Liang Zhou 2021] usa AHP para decisão de tecnologia de rede com uma hierarquia de 4 alternativas de solução e 4 critérios para selecionar a rede em ambiente marítimo. Em nosso sistema usamos mais alternativas de solução e mais critérios que permitam detalhar aspectos relevantes da comunicação em ambiente terrestre.

3. Sistema de Seleção Múltiplos Critérios

O declínio dos recursos naturais e a imprevisibilidade das condições ambientais motivou ainda mais o setor agrícola a usar a IoT [VK et al. 2022]. Uma arquitetura comumente usada nas fazendas digitais emprega duas categorias de conectividade: curto alcance e longo alcance. É importante agrupar estas categorias pois as demandas de cada grupo são de natureza diferente e assim é possível melhorar o desempenho de aplicativos e as decisões na fase de projeto [Ding et al. 2020]. Mesmo escolhendo uma categoria, a análise ainda apresenta inúmeros padrões para a escolha, cada um com seus indicadores de desempenho específicos e com seu particular custo. A Figura 2 mostra uma arquitetura frequentemente usada onde há demanda de conectividade de curto-alcance em estufas ou em espaços fisicamente próximos e há também a ligação destes espaços com um escritório central da fazenda, usando para isso a conectividade de longo-alcance. As estufas são o ambiente onde se pode controlar parâmetros como umidade, ingredientes nutricionais do solo, luz, temperatura, etc.//

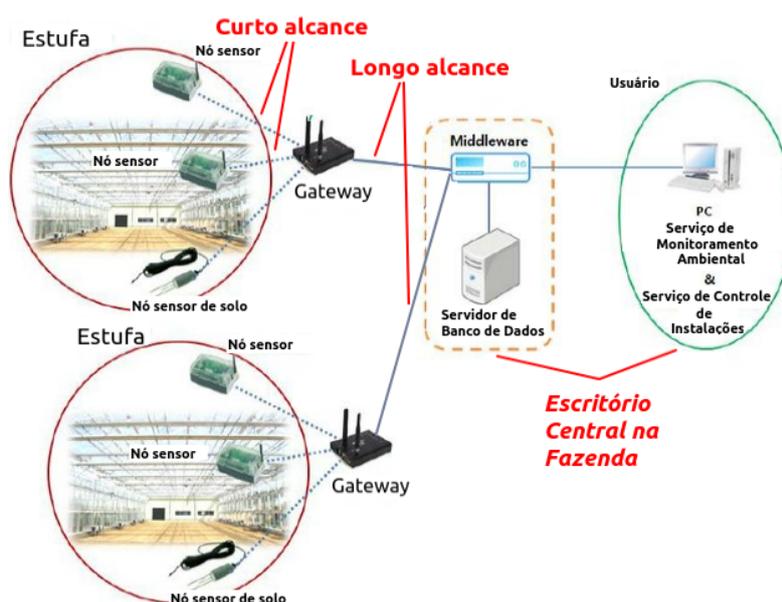


Figure 2. Fazenda inteligente com sub-regiões conectadas.
Adaptado de [Hwang and Yoe 2011]

O foco deste trabalho é a comunicação de longo alcance. Para fazer esta análise escolhemos 6 tecnologias que poderiam ser implantadas na fazenda para a comunicação entre o escritório central e as regiões internas da fazenda ou as estufas. As tecnologias avaliadas são as que têm se destacado por parâmetros de desempenho e/ou custo: Sigfox, Weightless-P, LoraWan, LTE CAT-M1, NB-IoT e 5G. A tecnologia LTE CAT-M1 citada não é a 4G normalmente utilizada nos centros urbanos, mas uma categoria para redes menos complexas com menor consumo de energia. Apesar do 5G não estar ainda

totalmente disponível nos centros urbanos, foi incluído na análise considerando a opção 5G Privativo. Uma fazenda pode investir em ter internamente uma rede 5G para processar seus próprios dados com alto desempenho e enviar à nuvem um volume menor de dados já pré-processados. Esta é uma opção para casos de grandes volumes de dados e/ou urgência na entrega. A comunicação entre o escritório e a nuvem não foi avaliada neste estudo, mas diversas considerações são igualmente válidas. Para criar o sistema de análise das soluções, foram realizadas quatro etapas:

1. Criação da hierarquia: correlacionar critérios e subcritérios;
2. Comparação entre pares: priorizar os critérios e subcritérios de acordo com a importância de cada um;
3. Síntese de julgamentos: normalizar as saídas e classificá-las em ordem crescente;
4. Verificação de consistência: verificar se a correlação entre as opções segue as prioridades estabelecidas com coerência.

3.1. Criação da Hierarquia

No topo da hierarquia, o AHP define o objetivo da análise que no nosso caso é "Determinar a melhor tecnologia de conectividade de longo alcance na fazenda".

No segundo nível da hierarquia definimos os macro critérios de interesse:

- (A) Requisitos de Custo: aspectos econômicos das alternativas;
- (B) Requisitos de Link: parâmetros com impacto no desempenho das alternativas;
- (C) Requisitos Gerais: elementos complementares aos parâmetros do link;

No terceiro nível da hierarquia agrupamos alguns subcritérios foram vinculados aos critérios do nível superior, estruturando a análise. Esta estrutura foi adaptada de [Mekki et al. 2019]. A forma como foi estruturada a hierarquia permite atribuir pesos separadamente a cada elemento permitindo a comparação mais detalhada entre os critérios e sub-critérios.

Os sub-critérios agrupados por critério são:

1. Relacionados a Custo:
 - (a) CapEx (Capital Expenditure): custo da aquisição dos dispositivos;
 - (b) OpEx (Operational Expenditure): custo operacional anual;
2. Relacionados aos Requisitos de Link:
 - (a) Latencia: tempo típico de latência da transmissão;
 - (b) Taxa de dados: quantidade de bits por segundo para transportar os dados;
 - (c) Max. tamanho do payload: máximo de bytes enviados em uma mensagem;
 - (d) Downlink: Capacidade do Downlink, restrita ou não;
3. Relacionados aos Requisitos Gerais:
 - (a) Banda ISM: Faixa de Frequencia - licenciada ou não;
 - (b) Alcance: Alcance espacial típico;
 - (c) Mobilidade: possibilidade de alta velocidade e suporte a perda de pacotes;
 - (d) Bateria: Duração da bateria;
 - (e) Penetração do Sinal: indica o nível de penetração em obstáculos exigida;

No último nível da herarquia, o AHP coloca as escolhas, que no nosso caso são as 6 tecnologias. Realizamos um extenso levantamento para obter informações relevantes para cada tecnologia em relação aos critérios indicados na modelagem. A Tabela 1 mostra esses dados. Obtivemos esses parâmetros das especificações oficiais dos protocolos ou datasheets. Algumas considerações sobre os parâmetros levantados:

- Alguns critérios são numéricos e precisos, enquanto outros são qualitativos como a Penetração que admite Fraca ou Forte. Essa diferença ilustra a flexibilidade do sistema, que, ao final, é capaz de hierarquizar os valores;
- O parâmetro da bateria 5G está em transição. O 5G permite grandes melhorias de desempenho, mas coloca requisitos de energia mais exigentes em dispositivos móveis. Dispositivos e redes estão lançando melhorias, e a meta é chegar a pelo menos três dias para smartphones e até 15 anos para dispositivos IoT. Sendo conservadores, no cenário atual, colocamos a duração na ordem de dias [O. et al. 2021];
- Seguimos o método de [Lin 2019] para estimar o subcritério CapEx (custo), por isso consultamos os valores nos portais de varejo online dos Estados Unidos. Os custos de aluguel do local, eletricidade, transmissão, operação e manutenção são considerados parte do OpEx [Ray 2017]. Custos são as quantidades mais voláteis na lista de critérios, e a tabela de comparação Capex e Opex deve ser atualizada no momento da seleção da tecnologia para apoiar a decisão.

Table 1. Critérios e subcritérios por tecnologia

Tecnologia	Custo (USD)		Requisitos de Link				Requisitos Gerais				
	CapEx	OpEx	Latencia*	Taxa de Dados	Tamanho do Payload	Downlink	Banda ISM	Alcance	Bateria	Mobilidade	Penetração
SigFox	2.47	12	High	100bps	12B	Constrain.	yes	25km	Years	Low speed	Strong
Weightless-P	21.94	0	Low	100kbps	48B	ok	yes	2km	Years	High speed	Strong
LoRaWAN	6.02	3	Medium	50kbps	256B	ok	yes	15km	Years	Low speed	Strong
LTE-CAT-M1	18.53	36	Low	1Mbps	256B	ok	no	30km	Months	High speed	Weak
NB-IoT	16.7	12	Very Low	50kbps	1600B	ok	no	20km	Years	Low speed	Weak
5G	515.2	17.8	Ultra Low	300Mbps	1056B	ok	no	250m	Days	Ultra High	Weak

(*) Labels: Ultra low \simeq 1 ms, Very low $<$ 10 ms, Low $<$ 100 ms, Medium $<$ 1 s, High $<$ 10 s, Very high $>$ 10 s.

3.2. Comparação entre pares

Na segunda etapa, realizamos comparações entre pares de tecnologias, estabelecendo prioridades entre os elementos da hierarquia.

O primeiro passo é a atribuição de valores numéricos inteiros sequenciais a cada alternativa de forma crescente de prioridade no parâmetro dado. Valores mais baixos são atribuídos a escolhas “ruins” e valores mais altos a escolhas “boas”.

Considere por exemplo o critério CapEx. A Tabela 2 apresenta um rank das tecnologias baseado no preço: o maior valor recebe o peso 1, o próximo 2 e assim por diante até o sexto lugar. Note que o Sigfox com peso 6 é a opção mais barata e o 5G com peso 1 é a opção mais cara.

Seja n o total de tecnologias ($n = 13$), C_i corresponde a i -ésima linha no rank da Tabela 2. Para construir a matriz de comparação, $a_{i,j}$, $i, j \in [1, n]$ é a célula na linha i e coluna j recebendo o seguinte valor

$$a_{ij} = \begin{cases} C_i - C_j + 1, & \text{if } C_i \geq C_j \\ \frac{1}{C_j - C_i + 1}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

O elemento a_{ij} da matriz de comparação representa o grau de preferência entre a linha i e a j [Saaty 2008]. Existe uma reciprocidade entre os elementos das matrizes resultante da coerência da comparação, ou seja, $a_{ij} = 1/a_{ji}$, $\forall i, j \in [1, n]$.

Table 2. Ranking no critério CapEx

Technology	CapEx (USD)	Rank
SigFox	2.47	6
Weightless-P	21.94	2
LoRaWAN	6.02	5
LTE CAT-M1	18.53	3
NB-IoT	16.7	4
5G	515.2	1

A Tabela 3 apresenta a matriz de comparação resultante para o subcritério CapEx como exemplo. Repetimos esses passos para todos os critérios e construímos onze matrizes de comparação com dimensões 6 x 6 referentes às 6 tecnologias apresentadas no estudo.

Table 3. Comparação par-a-par quanto ao critério CapEx

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
SigFox (Q1)	1	5	2	4	3	6
Weightless-P (Q2)	1/5	1	1/4	1/2	1/3	2
LoRaWAN (Q3)	1/2	4	1	3	2	5
LTE-CAT-M1 (Q4)	1/4	2	1/3	1	1/2	3
NB-IoT (Q5)	1/3	3	1/2	2	1	4
5G (Q6)	1/6	1/2	1/5	1/3	1/4	1

3.3. Síntese de julgamentos

Na terceira etapa, os julgamentos são sintetizados para chegar ao resultado. Com as matrizes de comparação consistentes do sistema de seleção, o algoritmo calcula as prioridades entre as opções considerando cada nível hierárquico, criando um vetor de prioridades normalizado que inclui todas as alternativas. Para cada matriz de comparação, calculamos seu autovetor que terá componentes estritamente positivos para ser normalizado e usado como vetor prioritário. Assim, ao determinar as matrizes de comparação e seus respectivos vetores de prioridade, é gerada uma escolha final entre as alternativas, a que contribui mais para as especificações de entrada fornecidas pelo usuário. Como são muitas matrizes e muitos cálculos a serem feitos, automatizamos o processo através do uso de uma biblioteca escrita em Python chamada pyAHP [Mishra 2017].

3.4. Verificação da consistência

Na quarta etapa, avaliamos a consistência dos julgamentos. As matrizes de comparação de critérios e subcritérios podem apresentar anomalias de consistência porque o usuário pode as ter preenchido subjetivamente. O método propõe o cálculo de um Índice de Consistência (CI) para avaliar a consistência das escolhas, definido como

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}. \quad (2)$$

Onde λ_{max} é o maior autovalor real da matriz em consideração e n é a dimensão da matriz. O índice CI mede o quão longe a matriz está da consistência total; CI = 0 indica consistência total. O método utiliza um valor adicional — Índice de Inconsistência Aleatória (RI) - para confrontar o caso corrente com outros extensamente estudados onde

houve consistência [Saaty and Vargas 2012]. Para concluir o cheque de consistência, o método propõe o cálculo de uma relação entre o CI calculado e o RI mencionado, chamada de Relação de Consistência (CR)

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (3)$$

Se o CR for menor que 10% as matrizes de comparação tem consistência razoável; caso contrário é melhor revisar os julgamentos. Calculamos estes índices para todas as nossas matrizes. No caso da matriz de Capex da tabela 3 obtivemos $CI = 0.0244$. Para esta dimensão de matriz, o RI tabulado é 1.24 e portanto o $CR = 1.96\%$, ou seja, consistente.

4. Resultados

O primeiro caso em que rodamos nosso sistema de seleção refere-se a uma fazenda com a prioridade de diminuição de Custo, atendendo aos Requisitos de link e os critérios gerais menos prioritários. Dentro dos Requisitos de Link, a taxa de dados e latência foram consideradas as mais importantes. Estas decisões estão assinaladas na Tabela 4. Com estas decisões o resultado foi a escolha da tecnologia Weightless-P com 19.7% de preferência, seguido de LoRaWAN com 17.48% como ilustrado na Tabela 5. De fato, ao escolher o custo como prioridade máxima, ao observar a tabela 1 nota-se que o Weightless-P tem o menor Opex seguido do LoRaWAN.

Table 4. Comparação entre critérios e subcritérios para o estudo de caso

Critério	G	L	C	Sub-critério (G.)	E1	E2	E3	E4	E5	Sub-critério(L.)	E6	E7	E8	E9	Sub-critério (C.)	E10	E11
G. Reqs Gerais	1	1/2	1/3	E1. Alcance	1	2	2	2	2	E6. Downlink	1	1/2	1/5	1/5	E10. CapEx	1	1/5
L. Reqs. Link	2	1	1/3	E2. ISM	1/2	1	1/2	2	2	E7. Payload	2	1	1/3	1/3	E11. OpEx	5	1
C. Custo	3	3	1	E3. Penetração	1/2	2	1	2	2	E8. Taxa dados	5	3	1	1			
				E4. Mobilidade	1/2	1/2	1/2	1	1/2	E9. Latencia	5	3	1	1			
				E5. Bateria	1/2	1/2	1/2	2	1								

Table 5. Resultados referentes as prioridades do estudo de caso

Tecnologia	Porcentagem da Preferência
SigFox	16.5%
Weightless-P	19.7%
LoRaWAN	17.48%
LTE CAT-M1	15.05%
NB-IoT	15.07%
5G	16.12%

O próximo experimento que realizamos procurou estudar a influência da variação do custo na escolha final. A partir de uma matriz de critérios onde todos os critérios tem peso igual (peso=1 nos elementos da subtabela de Critério da tabela 4), programamos a variação do peso do custo, acompanhando o critério de Link. Os resultados encontram-se na figura 3(a). Note que enquanto o custo tem peso pequeno a primeira opção é o 5G, seguido do LTE CAT-M1. A situação se inverte a medida que o custo se torna mais importante na equação. A partir do peso=2, o SigFox passa a ser a primeira opção.

Ainda no quesito custo, avaliamos o peso dos componentes CapEx/Opex na decisão final. Partimos de uma matriz de critérios que valoriza custo ao máximo, ou seja, 5G pelo alto custo não era uma boa opção. O programa variou os pesos relativos de Capex e

Opex. Os resultados encontram-se na Figura 3 (b). Aqui nota-se claramente a influencia de cada um dos subcritérios de custo. A medida que o CapEx se torna mais importante, as tecnologias de baixo CapEx sobem no ranking, destacando-se o SigFox.

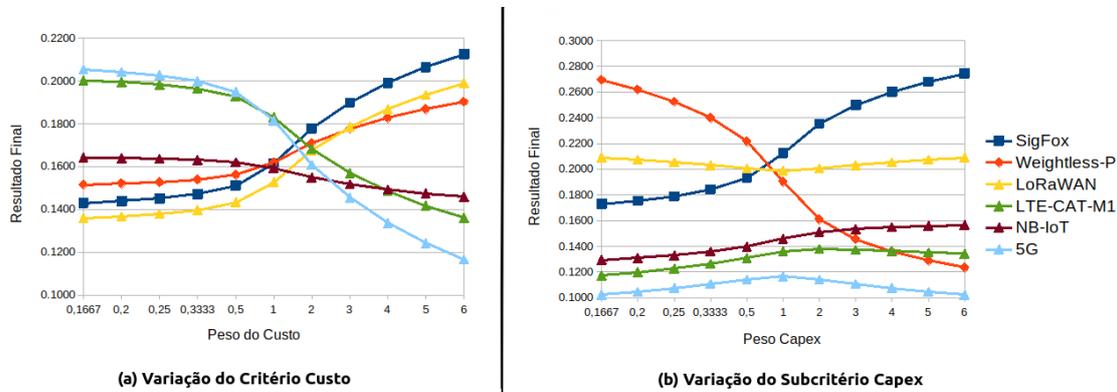


Figure 3. Influência dos parâmetros de custo na escolha de conectividade

5. Conclusão

Apresentamos um sistema de decisão flexível e adaptável para definição de conectividade em uma fazenda. O sistema considera aspectos relacionados às características do link (latência, taxa de dados, tamanho da carga útil, downlink), recursos de custos (CapEx e OpEx) e outras características de conectividade (alcance, mobilidade, penetração, banda ISM, bateria). Em nossos experimentos, em certa configuração, o sistema escolheu a tecnologia Weightless-P para a conexão das regiões monitoradas da fazenda com o escritório central. A tecnologia 5G, apesar de possuir excelentes características técnicas que poderiam pesar na decisão, não foi a escolhida devido à prioridade dada aos custos na avaliação geral. De fato, como os experimentos demonstraram, variações em um critério como Custo ou em um subcritério na hierarquia como o Capex pode alterar completamente a escolha da tecnologia a implantar. Nosso trabalho é mais do que um guia inteligente para conectividade: é uma metodologia reproduzível para expressar as demandas do usuário e assim permitir a conexão nos rincões do Brasil.

References

- Ding, J., Nemati, M., Ranaweera, C., and Choi, J. (2020). Iot connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, 8:67646–67673.
- Hwang, J. and Yoe, H. (2011). Study on the context-aware middleware for ubiquitous greenhouses using wireless sensor networks. *Sensors*, 11.
- Kondratenko, Y., Kondratenko, G., and Sidenko, I. (2018). Multi-criteria decision making for selecting a rational iot platform. In *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, pages 147–152.
- Li, Y., Jha, D. N., Aujla, G. S., Morgan, G., Zomaya, A. Y., and Ranjan, R. (2020). Iotwc: Analytic hierarchy process based internet of things workflow composition system. In *2020 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)*, pages 1–10.
- Liang Zhou, Sheng-Ming Jiang, T. Y. (2021). A network selection scheme based on the analytic hierarchy process for marine internet. volume 2021, page 8.

- Lin, L. (2019). Cost structure of iot connectivity services.
- Ly, P. T. M., Lai, W.-H., Hsu, C.-W., and Shih, F.-Y. (2018). Fuzzy ahp analysis of internet of things (iot) in enterprises. *Technological Forecasting and Social Change*, 136:1–13.
- Martinez, M. A. Q., González, G. A. L., Rios, M. D. G., and Vazquez, M. Y. L. (2020). Selection of lpwan technology for the adoption and efficient use of the iot in the rural areas of the province of guayas using ahp method. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, pages 497–503. Springer.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., and Meyer, F. (2019). A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, 5(1):1–7.
- Ministério da Agricultura, P. e. A. (2021). Cenários e perspectivas da conectividade para o agro. pages 1–74.
- Mishra, A. (2017). Analytic hierarchy process solver. <https://pyahp.gitbook.io/pyahp/>. Accessed: 2021-02-19.
- O., S., L., R., A., B., and G., M. (2021). 5g energy efficiency overview. *European Scientific Journal, ESJ*, 17(3).
- Ray, B. (2017). Costs in iot: lte-m vs. nb-iot vs. sigfox vs. lora. [Online; accessed: 2021-02-19].
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1):83–98.
- Saaty, T. L. and Vargas, L. G. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, volume 175. Springer New York, NY. ISBN 0-8493-7375-1.
- Silva, E. M., Agostinho, C., and Jardim-Goncalves, R. (2017). A multi-criteria decision model for the selection of a more suitable internet-of-things device. In *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, pages 1268–1276.
- Singla, C., Mahajan, N., Kaushal, S., Verma, A., and Sangaiah, A. K. (2018). Modelling and analysis of multi-objective service selection scheme in iot-cloud environment. In *Cognitive computing for big data systems over IoT*, pages 63–77. Springer.
- Uslu, B., Eren, T., Gur, S., and Ozcan, E. (2019). Evaluation of the difficulties in the internet of things (iot) with multi-criteria decision-making. *Processes*, 7(3).
- Vannieuwenborg, F., Verbrugge, S., and Colle, D. (2018). Choosing iot-connectivity? a guiding methodology based on functional characteristics and economic considerations. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 29(5):e3308. e3308 ETT-17-0322.R1.
- VK, Q., NV, H., DV, A., NM, Q., NT, B., S, L., G, R., and A., M. (2022). Iot-enabled smart agriculture: Architecture, applications, and challenges. *Applied Sciences*, 12.
- Wang, J., Yeh, W., Xiong, N. N., Wang, J., He, X., and Huang, C. (2019). Building an improved internet of things smart sensor network based on a three-phase methodology. *IEEE Access*, 7:141728–141737.